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



宇宙史研究センター

2018年10月

はじめに

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

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

この報告書は、宇宙史研究センターの、2017 年度の活動実績をまとめたものです。論文、学会発表などの データは、系や域の年次報告に合わせて 2017 年度当初から集計しており、前身の数理物質融合科学センター 時代のものを含みます。センターの活動記録等については、センターのウエブサイト

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

も御参照下さい。

2018 年 10 月 宇宙史研究センター長 金 谷 和 至

目次

第I部	全体報告	1
1	2017 年度活動概要	3
2	宇宙史研究センターの目的	3
3 3.1 3.2	設置の経緯 数理物質融合科学センターと数理物質系附属センターの改組・再編(2017年10月)について、 筑波大学先端研究センターとしての宇宙史研究センターについて	5 5 7
3.3	朝永センターの名称について	8
4	宇宙史研究センターの構成	9
5	宇宙史研究センターの活動スペース	11
6	構成教員・連携教員	12
6.1	国際テニュアトラック教員	12
6.2	海外教育研究ユニット招致	13
6.3	クロス・アポイントメント教員	13
6.4	その他	13
7	各種会議	15
7.1	運営協議会	15
7.2	運営委員会	17
8	主要研究集会等	18
8.1	Inaugural Symposium of the Tomonaga Center for the History of the Universe (宇宙史国	10
0.0	$ \begin{array}{c} & & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & $	18
8.2	手宙史ミニ・ワークショップ "QGP/CEP research with Fluctuation"	20
8.3		20
8.4	IIA 元・重于計測シンホンリム	22
8.5 8.6	Kick-off symposium of Quark Gluon Plasma Research Unit	$\frac{23}{24}$
9	2017 年度会計報告	25
第Ⅱ部	研究部門活動報告	29
10	南極天文学研究部門 (Division of Antarctic Astronomy)	31

11	素粒子構造研究部門 (Division of Elementary Particles)	40
12	クォーク・核物質研究部門 (Division of Quark Nuclear Matters)	60
13	光量子計測器開発部門 (Division for Development of Photon and Particle Detectors)	88
第Ⅲ音	图 資料	101
14	センター細則	103
15		105
16	競争的資金獲得状況	106
17	共同研究・受託研究	107
18	各種受賞等	107
19	新聞等報道・特記事項	107
20	学会活動・各種委員等	108

第 I 部

全体報告

1 2017 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)は、宇 宙の創生と物質・生命の起源を数理的手法で研究し、宇宙史の統一的理解と新たな学問分野の創出・牽引する ことを目的としている。そのために、素粒子物理学、原子核物理学、宇宙物理学分野をわたる理論と実験・観 測研究の融合を推進、宇宙史研究の国際共同研究拠点を形成する。なお、センターの英語略称は「TCHoU」 とし、「チャオ」と読む。

TCHoU が発足した 2017 年 10 月からの約半年間の活動概要を、図1と図2に示す。

TCHoU 2017活動概要 (1)

◆ 2017/10/1 発足

- 筑波大学の「先端研究センター群(R3:重点育成研究拠点)」として設置 [cf. CiRfSEは部局設置の「戦略イニシアティブ(A)学術センター」]
- 構成教員:36名、連携教員:18名、研究員:3名
- 「国立大学法人筑波大学宇宙史研究センター細則」制定
- 環境整備(セミナー室、TV会議システム、LAN、ウエブサイト等)

🌲 運営委員会

- 委員:センター長、副センター長、4部門長
- オブザーバー:小澤教授、久野教授
- 2017/10/19, 11/16, 12/21, 2018/1/18, 2/14, 3/15

🔷 運営協議会

- センター内委員:運営委員会委員
- センター外委員: 建古委員会委員
 センター外委員: 新井康雄教授(KEK)、小林秀行教授(NAOJ副台長)、梅村雅之教授(CCSセンター長)、 櫻井鉄也教授(C-AIRセンター長)、伊藤雅英教授(数理物質系長)
- 2018/2/6 第 1 回運営協議会
- 🔷 国際TT助教 テニュア審査

●2名ともテニュア獲得

- 🔷 海外教育・研究ユニット招致
 - ●ユトレヒト大 Th. Peitzmann教授, M. van Leeuwen教授 (PI) 2018/3/1 任用
 - QGP(ALICE フォトン実験、FOCAL検出器)
 - ●助教(副PI) 公募

図1 宇宙史研究センター 2017 年度活動概要(1)

2 宇宙史研究センターの目的

図 3 に、TCHoU の研究目的を示す。

筑波大学では、素粒子実験分野、原子核実験分野、宇宙観測分野の5つの大型実験プロジェクトが、日本学 術会議マスタープラン 2017 で、国をあげて推進すべき重点的研究計画に採択されている(筑波大学を中核機 関とする「宇宙背景ニュートリノ崩壊探索」、「高エネルギー重イオン衝突実験によるクォーク・グルーオン・ プラズマ相の解明」、「南極望遠鏡計画」、及び、筑波大学を推進機関に含む「RI ビームファクトリーの高度化 による重元素科学の躍進」、「高輝度大型ハドロン衝突型加速器(HL-LHC)による素粒子実験」)。理論面でも、



TCHoU 2017活動概要 (2)

◆ セミナー・研究集会

- 2017/12/11-12 宇宙史ミニ・ワークショップ "QGP/CEP research with Fluctuation"
- 2018/2/7 TIA 光・量子計測シンポジウム @ EPOCHAL
- 2018/3/7-8 Kick-off symposium of Quark Gluon Plasma Research Unit (オランダ・ユトレヒト大 教育研究ユニット招致)
- 2018/3/26-27 宇宙史国際シンポジウム @ 大学会館ほか







宇宙史セミナー
 2018/1/11 Prof. Yoo Jonghee (KAIST/IBS) Neutrino-Nucleus Scattering (CEvS)
 2018/1/19 Prof. Kim Soo-Bong (SNU/TCHoU) Sterile Neutrino (JSNS2)
 2018/1/26 松浦周二教授 (関西学院大/TCHoU連携教員) 近赤外宇宙背景放射 (CIBER)
 2018/2/14 齊藤直人教授 (KEK) J-PARC大強度ビーム
 2018/3/20 新井田貴文氏 (Wayne州立大) RHIC-STAR実験
 第1回運営協議会

● 2018/2/6 活動報告+運営協議会

🔷 一般向け広報活動

2017/11/4-5 筑波大学学園祭「雙峰祭」研究紹介
 2018/4/11 科学技術週間展示



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-」が採択されているほか、素粒子・原子核・宇宙分野で世界を牽引する先端 研究が展開されている。

宇宙史研究センターは、計算科学研究センターとの密接な連携のもと、これら5つの重要実験プロジェクト と1つの理論プロジェクトを含む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。

Mission:

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



図3 宇宙史研究センターの研究目的

3 設置の経緯

3.1 数理物質融合科学センターと数理物質系附属センターの改組・再編(2017 年 10 月) に ついて

TCHoUは、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の前身となる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」)は、2012 年 8 月に文部科学省により採択された「国立大学法人 筑波 大学 研究力強化実現構想」に基づき筑波大学に設置されることになった3つの学術センター(「地球・人類共 生科学センター」、「数理物質融合科学センター」、「人文社会国際比較センター」)のひとつとして、2014 年 9 月 1 日に数理物質系に設置された。「学術センター」は、筑波大学で研究力や国際性の強い分野をさらに強化 して、計算科学研究センターや生命領域学際研究センターに並ぶ世界的研究拠点形成を目指すものである。数 理物質系における研究力の強みを活用し系の将来構想に繋がる新センターとして、物理学の素粒子・原子核・ 宇宙分野の高い研究力を宇宙史の観点で融合した宇宙史国際研究拠点と、つくば地区連携・TIA 連携を活用し た基礎研究による革新的環境エネルギー材料創出を目指した環境エネルギー材料研究拠点を CiRfSE の 2 つの



図 4 数理物質融合科学センター (CiRfSE) 2013 年 9 月 ~ 2017 年 9 月



図 5 宇宙史の暗黒を照らす国際研究拠点形成事業(2016~2021年度)

核とした。また、両拠点に共通する大規模データ解析を逆問題の観点から数学的に俯瞰し研究の新たな展開を 牽引するための数学分野の逆問題研究推進室と、両拠点で進められている様々な最先端計測器開発の経験とア イデアを交換することにより開発を促進し、新たな展開を目指した光量子計測器開発推進室を置いた。

図4に、CiRfSEの構成を示す。CiRfSEの詳細は、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。

CiRfSE を含む「学術センター」は、筑波大学の各部局で独自に設置した組織であり、筑波大学としての正 式な教育研究施設では無いが、大学執行部直下に設置されている「研究戦略イニシアティブ推進機構」が支援 する「戦略イニシアティブ」(世界最高水準と呼ぶに相応しい実績と本学の特色を活かした学際融合性などを



数理物質系附属センターの改組・再編(2017年10月)

図6 数理物質系附属センターの改組・再編

有し、新たな学術研究分野を切り拓く教育研究施設へと発展させるべき研究拠点)のひとつとして位置づけら れた。対応して、CiRfSE を含む3つの学術センターは、2013年度の「戦略イニシアティブ(A)」として採 択された(2013年度~2017年度)。したがって、学術センターは、その成果に応じて、大学としての正式な 教育研究施設へと昇格されるかが判定される。

CiRfSE では、大学と協力して、外部資金獲得に向けた様々な活動を展開した。その結果、2016 年に公表さ れる筑波大学の第3期中期計画・中期目標にむけた構想に「朝永センター(仮称)」と「エネルギーデバイス開 発拠点(仮称)」の設置に向けたセンターの改組・改編が明記されることになり、概算要求の結果、宇宙史分野 (「宇宙史の暗黒を照らす国際研究拠点形成」:図5)と環境エネルギー材料分野(「革新的エネルギーデバイス 開発拠点整備」)の組織整備を含む国立大学機能強化経費、機能強化促進経費が、2016 年度と2017 年度にそ れぞれ採択された。CiRfSE 設立当初の予定では、2018 年度以降にセンターの評価と見直しを行う事になっ ていたが、これらを受けて、予定を大幅に前倒しして、2017 年 9 月末日に、数理物質系に所属する数理物質 融合科学センター(CiRfSE)と学際物質科学研究センター(TIMS)を拡充改組・再編することとなった。図6 に、この拡充改組・再編の概要を示す。これにより、2017 年 10 月 1 日に、2つの新センター – 「宇宙史研究 センター(TCHoU)」及び「エネルギー物質科学研究センター(TREMS)」 – が設立された。

3.2 筑波大学先端研究センターとしての宇宙史研究センターについて

筑波大学では、研究力強化に向けた大学改革の一環として、2017年度に大学付属センターの組織再編を行い、各センターは、機能別に「先端研究センター群」、「開発研究センター群」、「研究支援センター群」及び

「教育等センター群」に分類されることになった。「先端研究センター群」については、さらに、R1(世界級研 究拠点)、R2(全国級研究拠点)、R3(重点育成研究拠点)、R4(育成研究拠点)と級別され、R1~R3の研究 センターについては、中間評価(3年目に行う評価)及び期末評価(5年目に行う評価)を行い、研究活動の 進捗状況により、入れ替え又は廃止を行うものとなった。

2017 年 9 月に、研究戦略イニシアティブ推進機構ほかで審議が行われた結果、数理物質系で新たに設置する宇宙史研究センターとエネルギー物質科学研究センターは、いずれも先端研究センター群(R3)と認定された。

3.3 朝永センターの名称について

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 7)。

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。





図 7 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)

4 宇宙史研究センターの構成



図8 宇宙史研究センターの研究部門

TCHoUは、2節で述べた目的を達成するために、図8に示す3つの研究部門と1つの開発部門を置く。

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

光量子計測器開発部門 – Division of Photon and Particle Detectors TCHoU 各研究部門で進めている最先端 観測器開発の情報と経験を共有し、それらで共通の超伝導半導体検出器、SOI 技術などの光量子計測器 の開発基盤を提供する。

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



図 9 宇宙史研究センターの運営体制

図9に、TCHoUの運営体制を示す。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、7.1 節と7.2 節を参照。

5 宇宙史研究センターの活動スペース



TCHoUの活動の拠点として、各研究グループの数理物質系物理学域の研究室や実験室などに加え、人文社 会学系棟 B 棟 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。これは、CiRfSE 時代 の 2016 年 2 月に筑波大学の公募共用スペースに応募し、2016 年 4 月から使用が許可されたもので、数理物 質系附属センターの改組・再編にあたって TREMS と協議し、そのまま TCHoU で使用することとなってい る。毎年度使用希望を更新しなければならないが、センターの活動に必要との理解を得て、光熱水料とスペー スチャージ以外の使用料は免除されて来ている。

図 10 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。

6 構成教員・連携教員

2017 年 10 月の、TCHoU 発足当初の構成教員・連携教員を、図 11 に示す。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 引き継いでいる。筑波大学数理物質系の通常の教員に加えて、研究力強化に向けた様々な制度や事業を活用し た人事枠の教員も多く含んでいる。特に、国立大学機能強化経費「宇宙史の暗黒を照らす国際研究拠点形成」 (2016~2021 年度)に基づき、人員を含む研究推進体制の強化を進めた。CiRfSE 時代の人事の経緯について は、CiRfSE 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。



センター長:金谷和至(p) 副センター長:受川史彦(p)

南極天文学研究部門 部門長:中井直正(p)

構成教員: 久野成夫(p)、新田冬夢(a)、渡邉祥正(a)、徂徠和夫(apCA:北大) 連携教員: 瀬田益道(p:関西学院大)、梅村雅之(p)、笠井康子(p客員:NICT)、西堀俊幸(ap客員:JAXA)

素粒子構造研究部門 部門長:武内勇司(ap)

構成教員: 石橋延幸(p)、受川史彦(p)、原 和彦(ap)、佐藤構二(l)、大川英希(a国際TT)、伊敷吾郎(a)、 佐藤勇二(a)、飯田崇史(a)、金 信弘(p特命)、Soo-Bong Kim(p海外ユニットPI:Seoul大)、 吉田拓生(pCA:福井大)、池上陽一(apCA:KEK) 連携教員: 松浦周二(p客員:関西学院大)

クォーク・核物質研究部門 部門長:江角晋一(ap)

構成教員: 中條達也(I)、小澤 顕(p)、三明康郎(p)、Oliver Busch(a国際TT)、坂井真吾(a)、 金谷和至(p)、山口貴之(apCA:埼玉大)、小沢恭一郎(apCA:KEK)、佐甲博之(pCA:原研) 連携教員: 藏增嘉伸(p)、谷口裕介(ap)、鈴木伸司(a)、杉立徹(p客員:広大)、 濱垣秀樹(p客員:長崎総合科学大)、秋葉康之(p客員:理研)、若杉昌徳(p客員:理研)、永宮正治(p:理研)、 郡司卓(ap:東大)、志垣賢太(ap:広大)

光量子計測器開発部門 部門長:原和彦(ap)

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

融合研究企画調整室 室長:副センター長構成員:センター長、部門長、数理物質系融合研究企画室長

2017/10

図 11 宇宙史研究センター構成教員・連携教員(2017/10 発足当初): a/l/ap/p はそれぞれ、助教/講師/准教授/教 授を表し、「CA」はクロス・アポイントメント教員、「国際 TT」は国際テニュア・トラック教員を表す。

6.1 国際テニュアトラック教員

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

2017 年秋に両名のテニュア審査が行われ、両名とも高い評価でテニュアを獲得した。2018 年度から、通常の承継枠助教として、つくばに本拠地を移すこととなった。

このうち、Busch 助教は、2018 年 4 月のつくばでのテニュア助教としての着任準備を進めていたが、2018 年 3 月にインフルエンザからの肺炎が悪化し、2018 年 3 月 31 日に入院先のドイツ・マンハイムの病院で急逝 された。41 歳であった。2014 年に筑波大学国際テニュアトラック助教として採用されて以降、派遣先のドイ ツ・ハイデルベルク大学との国際共同研究で、CERN ALICE 実験によるクォーク・グルオン・プラズマの検 出実験に活躍し、筑波大学の学生の指導にも大きな貢献をした。

6.2 海外教育研究ユニット招致

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

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

2017 年秋には、筑波大学の教育国際化に向けた Campus in Campus (CiC)制度の一環として、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 とする教育研究ユニット招致を行うことになり、2018 年 3 月 8 日に、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 (8.5 節参照)。両教授は 2018 年 3 月 1 日に着任し、クォーク・グルオン・プラ ズマ研究プロジェクトを推進している。また、副 PI として助教人事も進めることとなった。

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

6.4 その他

任期付き助教(数理物質系) 機能強化経費の研究員雇用経費の一部を活用した数理物質系の任期付き助教枠 (3年間)の使用希望を 2016 年度に CiRfSE から提出したところ、物理学域と数理物質系で承認され、 宇宙観測分野の渡邉祥正氏を CiRfSE 南極天文部門で採用した(2017年4月1日着任)。

客員教員 クロスアポイントメント教員採用と並行して、従来の客員教員の制度も活用して、国内の研究連携 体制を強化した。CiRfSE 時代に、南極天文部門に西堀俊幸准教授(JAXA、2017 年 3 月 1 日委嘱)、 笠井康子教授(情報通信研究機構、2017 年 5 月 1 日委嘱)、素粒子構造部門に松浦周二教授(関西学院 大学、2017 年 11 月 1 日委嘱予定)、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。

研究員 機能強化経費に基づき、計算科学研究センターでの1名を含む、5名の研究員を採用した。

また、CiRfSE として筑波大学全学戦略ポイントを申請し、その採択により、素粒子構造部門の飯田崇史助 教(2017 年 4 月 1 日着任)を採用した。

上記各氏は、2017年10月に、それぞれ対応する TCHoU の研究部門に配属された。

南極天文学研究部門長の中井直正教授が、2018年3月末を持って、関西学院大学に転出することになった。 関西学院大学では、筑波大学から移籍した瀬田益道教授(南極天文学研究部門連携教員)が、筑波大学グルー プとの密接な協力のもと、南極天文台建設に向けた研究を推進している。中井教授を加えて、より強力な推進 拠点を形成することが目的である。南極天文学研究部門長の後任には、久野成夫教授が就任する。中井教授と は今後も密接に連携して、南極天文台プロジェクトを推進する。

2018年度当初の構成教員・連携教員を、図 12 に示す。

宇宙史研究センター 構成教員・連携教員

センター長:金谷和至(p) 副センター長:受川史彦(p)

南極天文学研究部門 部門長: 久野成夫(p)

構成教員:新田冬夢(a)、渡邉祥正(a)、中井直正(p:関西学院大)、徂徠和夫(apCA:北大) 連携教員: 瀬田益道(p:関西学院大)、梅村雅之(p)、笠井康子(p客員:NICT)、西堀俊幸(ap客員:JAXA)

素粒子構造研究部門 部門長:武内勇司(ap)

構成教員: 石橋延幸(p)、受川史彦(p)、原 和彦(ap)、佐藤構二(l)、大川英希(a)、飯田崇史(a)、 伊敷吾郎(a)、佐藤勇二(a)、金 信弘(p特命)、Soo-Bong Kim(p海外unitPl: Seoul大)、 吉田拓生(pCA:福井大)、池上陽一(apCA:KEK) 連携教員: 松浦周二(p客員:関西学院大)

クォーク・核物質研究部門 部門長:江角晋一(ap)

構成教員: 小澤 顕(p)、三明康郎(p)、中條達也(I)、金谷和至(p)、山口貴之(apCA:埼玉大)、 小沢恭一郎(apCA:KEK)、佐甲博之(pCA:原研)、Thomas Peitzmann(p海外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)、向井もも(a)、杉立徹(p客員:広大)、 濱垣秀樹(p客員:長崎総合科学大)、秋葉康之(p客員:理研)、若杉昌徳(p客員:理研)、 永宮正治(p:理研)、郡司卓(ap:東大)、志垣賢太(ap:広大)

光量子計測器開発部門 部門長:原和彦(ap)

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

融合研究企画調整室 室長:副センター長 構成員:センター長、部門長、数理物質系融合研究企画室長、ほか

2018/4/10

図 12 宇宙史研究センター構成教員・連携教員(2018/4)

7 各種会議

7.1 運営協議会

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

選出根拠	役職名	氏名	域	職名
第7条第1項	センター長	金谷和至	物理学	教授
第7条第2項	副センター長	受川史彦	物理学	教授
第7条第3項	南極天文学研究部門長	中井直正	物理学	教授
第7条第3項	素粒子構造研究部門長	武内勇司	物理学	准教授
第7条第3項	クォーク・核物質研究部門長	江角晋一	物理学	准教授
第7条第3項	光量子計測開発部門長	原和彦	物理学	准教授
第7条第4項	数理物質系長	伊藤雅英	物理工学	教授
第7条第5項	高エネルギー加速器研究機構 教授	新井康夫		教授
第7条第5項	自然科学研究機構国立天文台 副台長	小林秀行		教授
第7条第6項	計算科学研究センター長	梅村雅之	物理学	教授
第7条第6項	人工知能科学センター長	櫻井鉄也		教授

表1 2017 年度 宇宙史研究センター運営協議会委員

2017 年度の運営協議会委員名簿を表1に示す。学外の学識経験者として、高エネルギー加速器研究機構の 新井康夫教授と自然科学研究機構国立天文台副台長の小林秀行教授に運営協議員就任をお願いした。「セン ター長が指名する本学の職員」としては、当センターと密接な連携がある計算科学研究センター長の梅村雅之 教授と、人工知能科学センター長の桜井鉄也教授に務めていただいた。

7.1.1 第1回運営協議会(平成26年度第1回運営協議会)

日時 2018年2月6日14:00-16:00 (第1部)、16:20-17:45 (第2部)

場所 筑波大学 総合研究棟 B110(第1部), B204(第2部)

第1部 公開				
金谷和至	14:00-14:40	センター設置の経緯と目的		
久野成夫	14:40-15:00	南極天文学研究部門活動報告		
武内勇司	15:00-15:20	素粒子構造研究部門活動報告		
江角晋一	15:20-15:40	クォーク・核物質研究部門活動報告		
原 和彦	15:40-16:00	光量子計測器開発部門活動報告		
	第2部 運営協議	義員との質疑・応答(非公開)		
金谷センター長		運営協議会の役割について		
受川副センター長 平成 29 年度予算案及び執行計画について				
金谷センター長 センターの活動方針、中・長期計画について				
その他				



図13 第1回運営協議会(2018年2月6日)

宇宙史研究センターとしての最初の運営協議会を 2018 年 2 月 6 日に開催した。全体的報告は公開講演とし て総合研究棟 B110 で行い、その後、総合研究棟 B204 で運営協議会メンバーによる審議を行った。センター 教員からの設置経緯・活動状況などの報告に続き、センターの活動方針と中・長期計画について議論がかわさ れた。外部委員の先生方からは、生命の起源に関して朝永センターとして何ができるかの検討や、クロスアポ イントメント制度の成果を示すことの重要性など、貴重な示唆をいただいた。

7.2 運営委員会

センター運営委員会は、センター長、副センター長、部門長、及びセンター長が指名する者から構成され、 センターの運営と研究の実施・予算の使い方・研究会などの企画から、外部資金獲得に向けての活動や広報に 関わることまで、センターのほぼすべての活動について審議・決定する、センターの意思決定の中心機関であ る。2017 年度の運営委員会委員名簿を表 2 に示す。また、オブザーバーとして、久野教授、小澤教授にも出 席を依頼している。

選出根拠	役職名	氏名	域	職名
第9条第1項	センター長	金谷和至	物理学	教授
第9条第2項	副センター長	受川史彦	物理学	教授
第9条第3項	南極天文学研究部門	中井直正	物理学	教授
第9条第3項	素粒子構造研究部門	武内勇司	物理学	准教授
第9条第3項	クォーク・核物質研究部門	江角晋一	物理学	准教授
第9条第3項	光量子計測開発部門	原和彦	物理学	准教授

表 2 2017 年度 宇宙史研究センター運営委員会委員

運営室会議は、月に1回のペースで、毎回2~3時間程度開催された。 2017 年度の開催実績は、以下のとおり:

2017 年度 10/19, 11/16, 12/21, 1/18, 2/14, 3/15

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。

8 主要研究集会等

以下では、TCHoUが開催・共催などした研究集会等について、概要を報告する。各研究集会等のプログラ ムや発表資料、写真等については、TCHoU ウエブサイトのニュースコーナーも参照されたい。2017 年 10 月 以前の研究集会等については、CiRfSE の活動報告書や CiRfSE ウエブサイト(いずれも TCHoU ウエブサイ トからリンク)を参照。

CiRfSE 時代から Tsukuba Global Science Week (TGSW) のセッションとして毎年開催している国際ワー クショップ "Universe Evolution and Matter Origin (宇宙進化と物質起源)"は、TCHoU 発足直前の 2017 年 9 月末に CiRfSE として開催したため、TCHoU としては 2017 年度には開催していない。2018 年度以降 に継続する予定である。

8.1 Inaugural Symposium of the Tomonaga Center for the History of the Universe (宇宙史 国際シンポジウム)

日時 2018年3月26日(月)-27日(火)
場所 3/26: 筑波大学大学会館国際会議室、3/27: 総合研究棟 B 棟 1 階
講演数 3/26: 13件、3/27: 43件、合計56件
参加者 3/26: 56名、3/27: 46名

センター発足記念式典と兼ねて、宇宙史国際シンポジウムを開催した。宇宙史国際シンポジウムは、宇宙史 研究センターの国際融合研究ハブとしての活動の一環として、CiRfSE 時代から TGSW と並行して数年毎に 開催している。

第1日は、永田学長による挨拶に始まり、センター長・部門長によるセンター紹介と、国内外からの招待講 演者6名による講演が行われた。夕方には懇親会が開かれた。第2日には、3つの研究部門に分かれてのパラ レルセッションと、光量子計測器開発部門主催による合同セッションで、活発な議論が行われた。主要プログ ラムを表3に示す。(図14)

図 14 宇宙史研究センター発足記念国際シンポジウム(2018 年 3 月 26 日)

	0.30 17.45		
Wyoguko NACATA	President Univ Teukuba	Onemine address	
Kyösüke NAGAIA	Director TCUAL	Introduction to TCHoU	
Kazuyuki KANATA			
Yuji TAKEUCHI	TCHoU	Div. of Elementary Particles	
George W.S. HOU	Nat. Taiwan Univ.	Higgs, a second Higgs, and where it may lead us	
ShinIchi ESUMI	TCHoU	Div. of Quark Nuclear Matter	
Nu XU	LBNL / CCNU	Search for the QCD Critical Point in High-Energy Nuclear Collisions	
Naomasa NAKAI	TCHoU	Div. of Antarctic Astronomy	
Boonrucksar	Nat. Astron. Res. Inst.,	The status of astronomical development and	key
SOONTHORNTHUM	Minist. Sci. and Tech.,	research areas on Antarctic Astronomy in	Thailand
	Thailand		
Kazuhiko HARA	TCHoU	Div. for Develop. of Photon and Particle De	tectors
Yasuo ARAI	KEK	SOI Pixel Detector: Looking into History of Universe	
Soo-Bong KIM	Seoul Nat. Univ.	Reactor Neutrino Physics and Prospect	
Shunji NISHIMURA	RIKEN	Origin of Heavy Elements in the Universe: r-Process	
		Nucleosynthesis	
Fumihiko UKEGAWA	Codirector, TCHoU	Closing remarks	
第2日	パラレルセッション	/	講演数
南極天文部門	10:00-17:00 南極 30m 級テラ	ヘルツ望遠鏡計画 -高赤方偏移銀河・AGN の観測-	8
素粒子構造部門	9:00-11:40 COBAND, Cos	mic Background Neutrino Decay Search	6
	15:30-17:30 ATLAS Experi	ment at the LHC	5
クォーク・核物質部門	9:00-17:00 Quark-Nuclear-	Quark-Nuclear-Matter workshop	

表 3 宇宙史研究センター発足記念国際シンポジウム(2018 年 3 月 26-27 日)

8

合同セッション

光量子計測開発部門

13:00-15:00

8.2 宇宙史ミニ・ワークショップ "QGP/CEP research with Fluctuation"

日時 2017年12月11日(月)-12日(火)
場所 12/11: TCHoUセミナー室(人社棟 B108)、12/12: 1F棟201室
講演数 12/11: 5件、12/12: 2件、合計7件
参加者 16名(内、海外より5名)

10:00-17:00	
LBNL, CCNU, STAR	Recent results from RHIC BES-I
Frankfurt Univ., Jan Kochanowski Univ., NA61/Shine	Study of onset of deconfinement and search for critical point by NA61/SHINE at CERN SPS
GSI, Frankfurt Univ., HADES	Fluctuation analysis in HADES experiment at GSI
Frankfurt Univ., NA61/Shine	Charming future of NA61/SHINE
Osaka Univ.	On the efficiency correction for non-binomial efficiency loss
9:00-12:00	
Univ. Tsukuba	Flow correlation in d-Au
Univ. Tsukuba	2-part correlation in $200 GeV Au + Au$
	10:00-17:00 LBNL, CCNU, STAR Frankfurt Univ., Jan Kochanowski Univ., NA61/Shine GSI, Frankfurt Univ., HADES Frankfurt Univ., NA61/Shine Osaka Univ. 9:00-12:00 Univ. Tsukuba Univ. Tsukuba

クォーク・グルオン・プラズマと臨界端点の研究を主要テーマとする宇宙史ミニ・ワークショップを開催した。(図 15)

図 15 宇宙史ミニ・ワークショップ "QGP/CEP research with Fluctuation" (2017 年 12 月 11-12 日)

8.3 宇宙史セミナー

平成28年度に採択された国立大学機能強化促進経費「宇宙史の暗黒を照らす国際研究拠点形成」 (2016-2021) に基づく宇宙史プロジェクトを推進するために、計算科学研究センター (CCS) の協力体制を個々の研究者レベルで円滑にし、宇宙史プロジェクト内での素粒子・原子核・宇宙分野間および実験・理論間の連携を深めていくために、前身の CiRfSE の時代から、分野交流セミナー「宇宙史サロン」を定期的に開催してきた。 TCHoU では、宇宙史サロンの伝統を受け継ぎ、国際連携と分野融合を推進する「宇宙史セミナー」を開催している。毎回、分野を超えた活発な議論が行われている。 8.3.1 宇宙史セミナー "The First Observation of Coherent Elastic Neutrino-Nucleus Scattering"

日時 2018年1月11日(木) 15:15-16:30

場所 TCHoU セミナー室(人社棟 B108)

- 講演者 Prof. Yoo Jonghee (KAIST/IBS)
- タイトル The First Observation of Coherent Elastic Neutrino-Nucleus Scattering
- 参加者 20名(内、海外より2名)

- 8.3.2 宇宙史セミナー "Sterile Neutrino Search in the JSNS2 Experiment"
 - 日時 2018年1月19日(金) 15:15-16:30
 - 場所 TCHoU セミナー室(人社棟 B108)
 - 講演者 Prof. Kim Soo-Bong (SNU)
 - タイトル Sterile Neutrino Search in the JSNS2 Experiment
 - 参加者 17名(内、海外より1名)

8.3.3 宇宙史セミナー "ロケット実験 CIBER が示す近赤外線宇宙背景放射の謎"

日時	2018年1月26日(金)15:15-16:30
場所	TCHoU セミナー室(人社棟 B108)
講演者	松浦周二氏 (関西学院大学教授,筑波大学客員教授)
タイトル	ロケット実験 CIBER が示す近赤外線宇宙背景放射の謎
参加者	19 名

- 8.3.4 宇宙史セミナー"素粒子ミューオンに刻まれた宇宙の歴史"
 - 日時 2018年2月14日(水) 15:15-16:30
 - 場所 自然 D 棟 D413
 - 講演者 齊藤直人氏 (高エネルギー加速器研究機構・教授))
 - タイトル素粒子ミューオンに刻まれた宇宙の歴史- J-PARC の大強度ビームで探る新しい物理法則 -参加者15 名

- 8.3.5 宇宙史セミナー "Vortical fluid via polarization, and directed flow in heavy-ion collisions"
 - 日時 2018年2月20日(火)13:00-15:30
 - 場所 TCHoU セミナー室 (人社棟 B108)
 - 講演者 新井田貴文氏(Wayne 州立大学/RHIC-STAR 実験)
 - タイトル Vortical fluid via polarization, and directed flow in heavy-ion collisions
 - 参加者 19名

- 8.4 TIA 光・量子計測シンポジウム
 - 日時 2018年2月7日(水)9:30-17:00
 - 場所 つくば国際会議場 EPOCHAL 2F 中会議室 201, 202
 - 講演数 3
 - 参加者 88名

TCHoU 光量子計測器開発部門が参加している、第3回 TIA 光・量子計測シンポジウム「光・量子が繋ぐ TIA 計測連携〜新しい科学と産業の創生をめざして〜」が、2018 年2月7日につくば国際会議場で開催され た。3件の招待講演:三尾典克東大教授「重力波天文学の幕開け」、寺西信一静大特任教授「イメージセンサが 切り開く世界」、末永和知産総研主席研究員「電子顕微鏡と電子線分光を用いた最先端計測技術」に加え、多 くのポスター発表が行われた。(図 16)

図 16 TIA 光・量子計測シンポジウム (2018 年 2 月 7 日)

8.5 Kick-off symposium of Quark Gluon Plasma Research Unit

日時 2018年3月7日(水)9:00-16:30,3月8日(木)10:00-15:05

場所 筑波大学 計算科学研究センター 国際ワークショップ室

講演数 3/7:9件、3/8:9件、合計18件

参加者 22名、調印式:24名 (内、海外からの参加者:5名)

宇宙史研究センター クォーク・核物質研究部門で推進しているクォーク・グルオン・プラズマ研究と国際 的教育連携を促進するために、ユトレヒト大学 サブアトミック物理学研究機構(オランダ)に関する海外教 育研究ユニット招致 (CiC: Campus in Campus) を行うことになった。その発足にあたり、キックオフシン ポジウムを開催した。3/8 の 9:00-10:00 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。(図 17)

ユトレヒト大学を中心に、筑波大学も参加して進められている FoCal 測定器開発プロジェクトの現状と、 PHENIX や ALICE における QGP 研究に関する講演が行われ、プロジェクトの遂行に向けた技術的検討と 今後の計画について、密接な議論が行われた。

図 17 Kick-off symposium of Quark Gluon Plasma Research Unit (2018年3月7日)

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

日時	2017年11月4日~5日10:00-16:00			
場所	筑波大学 第3エリア 3A207			
参来場者数	11/4: 390 名、 11/5: 451 名、 合計 841 名			

学生・一般向けの広報活動として、「雙峰祭」の企画「つくば研究紹介」で、研究活動紹介(ブース展示)を 行った。つくば市長を含む多数の来場者があった。(図 18)

図 18 筑波大学学園祭「雙峰祭」企画展示「宇宙の歴史の暗黒部分を解明する」(2017 年 11 月)

9 2017 年度会計報告

宇宙史研究センターは 2017 年 10 月に、前身の数理物質融合科学センター(CiRfSE)の事務組織、研究スペースと研究組織の一部を引き継ぐ形で発足したが、年度途中であったため、CiRfSE 会計も宇宙史研究センターで管理することとし、CiRfSE として既に決まっていた年度内のいくつかの活動に関しては、年度末まで CiRfSE 会計から支援することとした。

宇宙史研究センターには、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 2017 年度 分として、2480 万円が配分された。この機能強化経費は、2016 年度から CiRfSE 宇宙史研究拠点に配分され ているが、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ているの で、以下では、2017 年度前半の CiRfSE 時代もまとめて報告する。

収 入		支出	
項目	金額	項目	金額
運営費交付金	24, 800, 000 円	研究員(助教アップシフト使用 料)人件費】渡辺祥正 4-11 月	4, 148, 430 円
繰越金	3, 810, 902 円	研究員【人件費】渡辺陽介,高水 祐一(宇宙理論)4-3月	9, 803, 224 円
		研究員・助教(2 名)【旅費】4 月	125, 150 円
		クロスアポイントメント教員 (吉田拓生、山口貴之、佐甲博之) 【人件費】10-3 月	1, 767, 356 円
		クロスアポイントメント教員 (徂徠和夫、小沢恭一郎、池上陽 一)【人件費】4-3月	3, 036, 014 円
		クロスアポイントメント教員 (吉田拓生、山口貴之、佐甲博之) 【旅費】10-3 月	274, 980 円
		クロスアポイントメント教員 (徂徠和夫)【旅費】4-3 月	437, 520 円
		TGSW 費用補填	68, 921 円
		センター立ち上げ準備旅費	21, 944 円
		運営協議会 (謝金・旅費)	34, 940 円
		原子核部門・消耗品費	43, 632 円
		原子核部門・旅費	548, 226 円
		南極部門・消耗品費 外	1, 005, 737 円
		南極部門・旅費	142, 000 円
		シンポジウム予定額	918, 568 円
		クロスアポイントメント教員 研究費	84, 888 円
		繰越金額	6, 149, 372 円
合 計	28, 610, 902 円	合 計	28, 610, 902 円

表4 2017年度予算執行報告 - 宇宙史プロジェクト(機能強化経費) -

※クロスアポイントメント教員人件費支出は所属によって月毎、半期毎、年度末等異なる。 ※渡邉助教の人件費は1か月の支給額中、部分的な振替不可の為 400 万円超過分は CiRfSE 共 通予算へ新たに入金された。 宇宙史プロジェクトの大半は、研究員・助教雇用、クロスアポイントメント教員経費などの人件費に使わ れ、残りで、旅費や、研究用の消耗品費などを賄った。また、2018 年度に予算が厳しくなることが見込まれ たため、繰越金を多めに捻出した。

宇宙史研究センターにはまた、新センターの整備経費として、2017 年度に 1050 万円が配分された。テレビ 会議システムの整備など、機能強化経費分と合算してセンターの体制強化に使用した(表 5)。

区分	当初額 (円)	当初予定> 実際	額(円)	小計/残
人件費	7, 450, 000	 教員人件費 研究員 武政健一 2018/1/1 - 2018/3/31 研究員 永田和樹 2017/12/16 - 2018/3/15 週21時間 海外研究ユニット招致 Kim Soo-Bong クロスアポイントメント教員4-9月人件費 吉田拓生教授、佐甲博之教授、山口貴之准教授 学園祭・催物 短期雇用 	1, 055, 376 460, 810 4, 222, 977 1, 670, 775 39, 649	7, 449, 587
運営費	1,400,000	消耗品費	195, 601	
		 加引 海外研究ユニット招致 Kim Soo-Bong クロスアポイントメント教員4-9月旅費 吉田拓生教授、佐甲博之教授、山口貴之准教授 客員教員旅費 TGSW旅費 	425, 714 303, 240 31, 600 455, 985	1, 412, 140
設備費	1, 650, 000	テレビ会議システム 本体 テレビ会議システム モニター, ラック (ケーブル含む)	1, 447, 848 190, 425	1, 638, 273
計	10, 500, 000		10, 500, 000	0

表5 2017年度予算執行報告 – 宇宙史研究センター整備経費 –

2017 年度の CiRfSE 共通費会計報告を、表 6 に示す。CiRfSE のセンター経費として、研究戦略イニシア ティブ推進機構から 400 万円と、9 月に開催された TGSW2017 の招聘旅費の一部が配分された。また、系か ら、TGSW 招聘旅費本部配分額と同額の補助と、CiRfSE 活動支援経費 120 万円が支給された。これらによ り、CiRfSE としてのセンター経費・活動費と、それを引き継ぐ宇宙史研究センター経費の一部を執行した。

収入		支出	
項目	金額	項目	金額
運営費交付金	4, 000, 000 円	事務補佐員(人件費)4 月−3 月	2, 734, 414 円
		スペースチャージ	121, 200 円
TGS 実施経費(本部支援)	200, 000 円	CiRfSE 活動報告書 【印刷製本費+郵送費】	438, 690 円
TGSW 実施経費(系支援)	200, 000 円	運営協議会 (旅費)	540 円
系からの支援	1, 200, 000 円	数理連携サロン(第 7 回) (旅費、謝金、会議費、短期雇用)	36, 855 円
系からの支援 (助教人件費超過分)	148, 430 円	宇宙史サロン(第3回) (短期雇用)	2, 465 円
系からの補填	778 円	特命教授人件費(旅費含む) (金先生、磯崎先生)4 月-3 月	532, 503 円
		コピー機トナー他【消耗品費】	241, 526 円
		名刺印刷代(金谷先生、徂徠先 生)	1, 400 円
		平成 2 8 年度年次報告書 【印刷製本費】	228, 312 円
		平成28年度年次報告書郵便料	50, 420 円
		郵便料金4月-3月	5, 528 円
		TGSW 実施経費	400, 000 円
		人社棟電話料金 (B105,B109,B111)	5, 575 円
		人社棟電話回線新設(B103)・移 設(B104→B102)	33, 480 円
		人社棟ルーター・アクセスポイ ント増設(見積額)	210, 816 円
		スキャナー機能付きコピー機等 消耗品費	100, 071 円
		南極望遠鏡講演会経費 会場費(新潟、つくば、埼玉) ポスター印刷費郵送代 新聞チラシ(3箇所) 短期雇用経費(3箇所) 旅費(2箇所)【広報活動費】	605, 413 円
合計	5, 749, 208 円	 合 計	5, 749, 208 円

表 6 2017 年度 CiRfSE 予算執行報告 - CiRfSE 共通費 -

^{第Ⅱ部} 研究部門活動報告
10 南極天文学研究部門 (Division of Antarctic Astronomy)

部門長

中井 直正(数理物質系物理学域教授)

構成教員

- 久野 成夫(数理物質系物理学域教授)
- 新田 冬夢(数理物質系物理学域助教)
- 渡邉 祥正(数理物質系物理学域助教)
- 徂徠 和夫(数理物質系物理学域 准教授)クロスアポイントメント教員

連携教員

- 瀬田 益道(関西学院大学理工学部教授)
- 梅村 雅之(計算科学研究センター 教授)
- 笠井 康子(情報通信研究機構 上席研究員)客員教授
- 西堀 俊幸(宇宙航空研究開発機構 主幹研究開発員)客員准教授

宇宙観測グループでは、地上で最も天体観測に適した南極内陸部に 10m 級テラヘルツ望遠鏡を建設し、可 視光では観測が困難な原始銀河の探査を行う計画を推進している。テラヘルツ望遠鏡に搭載する予定の広視野 超伝導電波カメラへ向けた実機1号機として、野辺山宇宙電波観測所 45m 電波望遠鏡に搭載する電波カメラ の開発を進めた。また、野辺山宇宙電波観測所 45m 鏡や ALMA など既存の望遠鏡を用いた銀河、銀河系、星 形成領域などの観測を行ってきた。さらに、情報通信研究機構鹿島宇宙技術センター 34m アンテナの性能評 価、VLBI 観測に参加している。

南極天文学の推進を中心として研究力強化のため、2017年4月1日に任期付助教として渡邉祥正、2017年4月1日に北海道大学准教授の徂徠和夫がクロスアポイントメント教員として着任した。また2017年5月1日に情報通信研究機構上席研究員の笠井康子が客員教授として着任した。

(1) 南極天文学の推進

南極 10m 級テラヘルツ望遠鏡計画

極寒の南極で、できるだけ簡単に鏡面を測定する方法として、点格子干渉計の検討を進めた。また、南 極 10m 級テラヘルツ望遠鏡は、広視野を得るためにリッチー・クレチアン(RC)式の光学系を使用す る予定であるが、RC式の望遠鏡に近傍界の Phase Retrieval Holography 法を用いる方法の検討を進 めた。400-500GHz 帯には CO(*J*=4-3) と CI という二つの重要な輝線が存在するが、この2 輝線が同 時に観測できるよう、南極での観測を想定して開発した 30cm 望遠鏡のヘテロダイン受信機の広帯域化 を進めた。平成 30 年度概算要求について文部科学省との交渉を行ったが、認められるには至らなかっ た。昨年に引き続き、南極望遠鏡計画について一般の人の理解と支持を得るために全国で講演会と署名 集めを行った。また、南極 10m 級テラヘルツ望遠鏡に向けた超伝導電波カメラ開発のためのクラウド ファンディングを実施し、期限までに目標額を達成することができた。

超伝導電波カメラの開発

南極 10m 級テラヘルツ望遠鏡計画に向けた連続波観測装置(=電波カメラ)の開発を進めている。 実機1号機である野辺山 45m 電波望遠鏡搭載用の 100GHz 帯超伝導電波カメラは 2016 年 12 月末から 2017 年 1 月上旬にかけて 37 素子で搭載試験を行ったが、昨年の報告の通りビーム幅が予想値と一致し ないことや、冷却時に生じる反射防止膜の破損等の課題が見つかった。本年度はこの対策に加え、素 子数を 37 素子から 109 素子へ拡張する開発も行った。ビーム幅の問題については、シミュレーション ソフト ZEMAX を用いて伝送光学系の見直しおよび物理光学伝搬による無限遠でのビームパターンシ ミュレーションを行い、ビーム幅約 16″という結果を得た。また、反射防止膜の破損の原因はレンズの 材質であるシリコンと、膜として使用しているエポキシ樹脂の熱膨張率の違いであるため、この負荷を 低減するためにガラスビーズを用いた反射防止膜の開発を行った。反射防止膜はエポキシ樹脂と最密に 並べた直径 400 μ m のガラスビーズを組み合わせた構造になっており、0.1 K への冷却時でも破損しな いことを確認した。また、検出素子である MKID は 3 インチシリコンウェハ上に 109 素子を配置した デザインとなっており、国立天文台先端技術センターのクリーンルームにて製作を行った。超伝導体に はアルミニウムを用いており、電子線蒸着により成膜した素子ではダーク環境にて Q 値 (Qi) の平均は 約 105、検出器歩留まりは 87%、検出器雑音を表す雑音等価電力 (NEP) は約 10⁻¹⁶ [W/ $\sqrt{\text{Hz}}$] となっ た。この他にも、データ取得システムの開発、ビームスイッチ観測のロックイン処理、観測の際の即時 監視システムの開発、光学的厚みの解析、サブ波長構造を用いた反射防止膜の解析等を進めた。(図 19)



図 19 100GHz 帯 MKID カメラと周辺システム

南極 30m 級テラヘルツ望遠鏡計画

南極 30m 級テラヘルツ望遠鏡による活動銀河およびスターバースト銀河の観測についての議論を深め るため、ワークショップ「南極 30m 級テラヘルツ望遠鏡による AGN と爆発的星形成銀河のサイエン ス」を 3 月 27 日に筑波大学にて開催した。台湾からの参加を含め全国から銀河研究者が参加し、この 分野における 30m 級テラヘルツ望遠鏡の持つ重要性を再確認することができた。

(2) 既存の観測装置を用いた研究

銀河面の ¹²CO、¹³CO、C¹⁸O 輝線によるサーベイ観測 FUGIN

FUGIN プロジェクトは、野辺山宇宙電波観測所 45m 電波望遠鏡に搭載されたマルチビーム受信機 FOREST を用いて、銀河系の ¹²CO、¹³CO、C¹⁸O 輝線(同時観測)によるサーベイを行い、分子ガ スの物理状態、分布、運動を明らかにするという計画である。銀河系の渦状腕、棒状構造、分子ガスリ ングが含まれる第 1 象限(10° $\leq l \leq 50^\circ$, $|b| \leq 1^\circ$)および第 3 象限(198° $\leq l \leq 236^\circ$, $|b| \leq 1^\circ$)が観 測領域である。FUGIN は、これまでの CO による銀河面サーベイでは最高の角分解を達成する。初期 成果として、フィラメント構造など分子雲の詳細な内部構造が明らかになっている。(図 20, 論文 10)



図 20 FUGIN によって観測された天の川の一部。¹²CO(赤)、¹³CO(緑)、C¹⁸O(青)のピーク温度を重ねてある。

近傍銀河 NGC2976 の分子ガス観測

野辺山 45m 電波望遠鏡を用いた近傍銀河の ¹²CO、¹³CO、C¹⁸O 輝線サーベイ COMING プロジェクト (CO Multi-line Imaging of Nearby Galaxies)のサンプルの中から、近傍矮小銀河 NGC2976の分子ガスの性質、星形成活動について調査した。その結果、分子ガスの割合は、渦状銀河同様に全ガスの面密度と星形成率に依存することがわかった。また、¹²CO(J = 3 - 2)と¹²CO(J = 1 - 0)の強度比から、分子ガス面密度の減少に伴って分子ガスの温度が上昇することがわかった。これは、希薄な分子ガスの割合が増えるため輻射場による加熱が効きやすくなるためと考えられる。¹²CO(J = 1 - 0)と¹³CO(J = 1 - 0)の強度比が 27±11と渦状銀河での値より有意に高いことも、光学的に薄い希薄なガスがこの銀河においては支配的であることを示唆する。(図 21, 論文 3)

NGC1808 中心部の高密度分子ガス観測

ALMA を用いて、銀河風をもつスターバースト銀河 NGC1808 の中心部の高密度ガストレーサーによ る高角分解能観測 (1″~50 pc) を行った。その結果、ALMA の性能を生かし HCN (1-0)、H13CN(1-0)、HCO⁺(1-0)、H13CO⁺(1-0)、HOC⁺(1-0)、HCO⁺(4-3)、CS(2-1)、C₂H(1-0)、SiO(2-1)、 HNCO(4-3) といった分子輝線を検出することができた。輝線強度比から銀河中心部の円盤部に存在す る分子ガスが高密度 ($n(H_2) \sim 10^5$ cm⁻³) で暖かい (20K < T_k < 100K) ことが示された。一方、ア ウトフロー内の分子ガスは、密度が $n(H_2) \sim 10^2 - 10^3$ cm⁻³ で温度が $T_k > 30$ K であることがわかっ た。また、アウトフローからも、HCN(1-0)、HCO⁺(1-0)、CS(2-1)、C₂H(1-0) といった高密度ガス のトレーサーが、今回始めて検出された。(論文 12)

巨大分子雲 W51 のマッピングスペクトル線サーベイ

Mopra 22m 電波望遠鏡を用いて、銀河系内の W51 領域の巨大分子雲の約 40pc×50pc の領域をマッピ ング観測した。周波数範囲は、85-101 GHz 及び 107-115 GHz である。スペクトルを観測領域全体で 平均し、24 GHz という広い周波数帯域にわたり系統的に分子雲の化学組成を調べた。この観測では 16



図 21 分子ガスの面密度と ¹²CO(J = 3 - 2)/¹²CO(J = 1 - 0)の関係。カラーは星形成率 (SFR)。星 印は、SFR > 10 M_☉yr⁻¹kpc⁻² とSFR < 10 M_☉ yr⁻¹kpc⁻² での平均値。

種類の分子及びその同位体種を検出し、その存在量を求めた。さらに、観測領域を¹³CO の強度に応じて5つの領域に分割し、各分子輝線の全フラックスに対するそれぞれの領域からのフラックスの割合を 見積もった。その結果、70%以上のフラックスはW51の星形成領域ではない分子雲の広がった領域からの寄与であることを明らかにした。さらに、近傍銀河 M51 の渦状腕領域の分子ガスの化学組成と比較したところ、W51 の分子雲全体で平均した化学組成とよく似ていることも分かった。(図 22, 論文 8)

中間質量の原始星連星 NGC 2264 CMM3 の観測

ALMA を使い、非常に若い原始星 NGC 2264 CMM3 の観測を行った。これまでの観測は単一の連続 波ピークのみが検出されていたことから、CMM3 は1つの大質量星の原始星であると考えられてきた。 しかし、今回の観測では CMM3A と CMM3B の 2 つの連続波ピークを検出した。この 2 つのピーク にはそれぞれ双極分子流が付随していることから、既に原始星が形成されていると考えられる。このこ とから、CMM3 は単一の大質量星原始星ではなく、中間質量の原始星の連星であることが分かった。 さらに、この 2 つの原始星のスペクトルパターンが大きく異なっていた。その原因として、原始星の進 化段階、原始星の質量、原始星周りのエンベロープの傾きの違いなどが考えられる。今後この違いの原 因を、ALMA を使った観測により検証する予定である。(図 23, 論文 13)

(3) 情報通信研究機構 鹿島宇宙技術センター 34m アンテナ

大学 VLBI 連携観測のサポート

大学 VLBI 連携による観測における鹿島宇宙技術センターの 34m アンテナの運用に参加した。今年度 は、鹿島局アンテナも用いた VLBI 観測が 2017 年 11 月 27-28 日、2017 年 12 月 5-6 日の 2 度実施さ



図 22 (a)Mopra 22m 望遠鏡で得られた観測領域全体で平均した W51 のスペクトル。(b) Mopra 22m 望遠鏡で得られた W51 の中の活発な星形成領域 e1/e2 のスペクトル。(c) IRAM 30m 望遠鏡で得られ M51 の渦状腕のスペクトル。



図 23 (a) NGC 2264 CMM3 における HCN の積分強度図。赤のコントアは 850µm の連続波。(b) HCN の積分強度図の拡大図。(c)HCN の速度場マップ。CMM3A と CMM3B に双極分子流が付随している様子が見られる。

れた。当日は、現地・鹿島宇宙技術センターに赴き、観測の実施、34m アンテナの監視等を行った。観 測は無事成功し、現在 PI により解析中である。

鏡面能率測定による鏡面精度の算出

電波望遠鏡の鏡面精度を求める方法は複数ある。その一つに、複数の周波数帯域に対する電波望遠鏡の 開口能率を測定し、その測定値からアンテナの鏡面精度を算出する方法がある。この手法を用いて鹿島 局 34m アンテナの鏡面精度の算出を行った。2017 年 12 月 29-30 日に観測を実施し、データの取得に 成功した。現在、過去の異なる周波数帯域のデータも踏まえて解析を行い、34m アンテナの鏡面精度の 算出を行っているところである。

〈査読付論文〉

- Morokuma, T., Tanaka, M., Tanaka, Y. T., Itoh, R., Tominaga, N., Gandhi, P., Pian, E., Mazzali, P., Ohta, K., Matsumoto, E., Shibata, T., Akimoto, H., Akitaya, H., Ali, G. B., Aoki, T., Doi, M., Ebisuda, N., Essam, A., Fujisawa, K., Fukushima, H., Goda, S., Gouda, Y., Hanayama, H., Hashiba, Y., Hashimoto, O., Hayashida, K., Hiratsuka, Y., Honda, S., Imai, M., Inoue, K., Ishibashi, M., Iwata, I., Izumiura, H., Kanda, Y., Kawabata, M., Kawaguchi, K., Kawai, N., Kokubo, M., Kuroda, D., Maehara, H., Mito, H., Mitsuda, K., Miyagawa, R., Miyaji, T., Miyamoto, Y., Morihana, K., Moritani, Y., Morokuma-Matsui, K., Murakami, K., Murata, K. L., Nagayama, T., Nakamura, K., Nakaoka, T., Niinuma, K., Nishimori, T., Nogami, D., Oasa, Y., Oda, T., Ohshima, T., Saito, Y., Sakata, S., Sako, S., Sarugaku, Y., Sawada-Satoh, S., Seino, G., Sorai, K., Soyano, T., Taddia, F., Takahashi, J., Takagi, Y., Takaki, K., Takata, K., Tarusawa, K., Uemura, M., Ui, T., Urago, R., Ushioda, K., Watanabe, J., Watanabe, M., Yamashita, S., Yanagisawa, K., Yonekura, Y., Yoshida, M., "OISTER Optical and Near-Infrared Monitoring Observations of a Peculiar Radio-Loud Active Galactic Nucleus SDSS J110006.07+442144.3", Publications of the Astronomical Society of Japan, 69, pp.82:1-20, (2017)
- Motogi, K., Hirota, T., Sorai, K., Yonekura, Y., Sugiyama, K., Honma, M., Niinuma, K., Hachisuka, K., Fujisawa, K., Walsh, A. J., "A Face-on Accretion System in High-mass Star Formation: Possible Dusty Infall Streams within 100 AU", The Astrophysical Journal, 849, pp.23:1-13, (2017)
- 3. Hatakeyama, T., Kuno, N., Sorai, K., Kaneko, H., Miyamoto, Y., Muraoka, K., Takeda, M., Yanagitani, K., Kishida, N., Umei, M., Tanaka, T., Tomiyasu, Y., Nakanishi, H., Saita, C., Ueno, S., Salak, D., Matsumoto, N., Morokuma-Matsui, K., Pan, H.-A. Nakai, N., "CO Multi-line Imaging of Nearby Galaxies (COMING). II. Transitions between atomic and molecular gas, diffuse and dense gas, gas and stars in the dwarf galaxy NGC 2976", Publications of the Astronomical Society of Japan, 69, id.67 (2017).
- Yamauchi, A., Miyamoto, Y., Nakai, N., Terashima, Y., Okumura, T., Zhou, B., Taniguchi, K., Kaneko, H., Matsumoto, N., Salak, D., Nishimura, A., Ueno, S., "Discovery of H2O megamasers in obscured active galactic nuclei", Publications of the Astronomical Society of Japan, 69, L6 (2017).
- Kaneko, H., Kuno, N., Iono, D., Tamura, Y., Tosaki, T., Nakanishi, K., Sawada, T., "Properties of molecular gas in galaxies in the early and mid stages of interaction. II. Molecular gas fraction", Publications of the Astronomical Society of Japan, 69, id.66 (2017).
- 6. Matsuo, M., Nakanishi, H., Minamidani, T., Torii, K., Saito, M., Kuno, N., Sawada, T., Tosaki, T., Kobayashi, N., Yasui, C., Mito, H., Hasegawa, T., Hirota, A., "Discovery of a distant molecular cloud in the extreme outer Galaxy with the Nobeyama 45 m telescope", Publications of the Astronomical Society of Japan, 69, L3 (2017).
- Pan, H.-A., Kuno, N., "Variation in GMC Association Properties across the Bars, Spiral Arms, Inter-arms, and Circumnuclear Region of M100 (NGC 4321) Extracted from ALMA Observations", The Astrophysical Journal, Volume 839, id. 133, 18 pp. (2017).
- Watanabe, Y., Nishimura, Y., Harada, N., Sakai, N., Shimonishi, T., Aikawa, Y., Kawamura, A., Yamamoto, S., "Molecular-cloud-scale Chemical Composition. I. A Mapping Spectral Line Survey toward W51 in the 3 mm Band", The Astrophysical Journal, Volume 845, id. 116, 30 pp. (2017).
- Sakai, N., Oya, Y., Higuchi, A. E., Aikawa, Y., Hanawa, T., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Lpez-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Sakai, T., Hirota, T., Caux, E., Vastel, C., Kahane, C., Yamamoto, S., "Vertical structure of the transition zone from infalling rotating envelope to disc in the Class 0 protostar, IRAS 04368+2557", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 467, L76-L80 (2017).
- Umemoto, T., Minamidani, T., Kuno, N., Fujita, S., Matsuo, M., Nishimura, A., Torii, K., Tosaki, T., Kohno, M., Kuriki, M., Tsuda, Y., Hirota, A., Ohashi, S., Yamagishi, M., Handa, T., Nakanishi, H., Omodaka, T., Koide, N., Matsumoto, N., Onishi, T., Tokuda, K., Seta, M., Kobayashi, Y., Tachihara, K., Sano, H., Hattori, Y., Onodera, S., Oasa, Y., Kamegai, K., Tsuboi, M., Sofue, Y., Higuchi, A. E., Chibueze, J. O., Mizuno, N., Honma, M., Muller,

E., Inoue, T., Morokuma-M., K., Shinnaga, H., Ozawa, T., Takahashi, R., Yoshiike, S., Costes, J., Kuwahara, S., "FOREST unbiased Galactic plane imaging survey with the Nobeyama 45 m telescope (FUGIN). I. Project overview and initial results, Publications of the Astronomical Society of Japan, 69, id.78, (2017)

- Ando, R., Nakanishi, K., Kohno, K., Izumi, T., Martín, S., Harada, N., Takano, S., Kuno, N., Nakai, N., Sugai, H., Sorai, K., Tosaki, T., Matsubayashi, K., Nakajima, T., Nishimura, Y., Tamura, Y., "Diverse Nuclear Starforming Activities in the Heart of NGC 253 Resolved with 10-pc-scale ALMA Images", The Astrophysical Journal, 849, article id. 81, 11 pp., (2017)
- Salak, D., Tomiyasu, Y., Nakai, N., Kuno, N., Miyamoto, Y., Kaneko, H., "Evolution of Molecular Clouds in the Superwind Galaxy NGC 1808 Probed by ALMA Observations", The Astrophysical Journal, Volume 849, Issue 2, article id. 90, 20 pp., (2017)
- Nishimura, Y., Watanabe, Y., Harada, N., Shimonishi, T., Sakai, N., Aikawa, Y., Kawamura, A., Yamamoto, S., "Molecular-cloud-scale Chemical Composition. II. Mapping Spectral Line Survey toward W3(OH) in the 3 mm Band", The Astrophysical Journal, 848, article id. 17, 18 pp., (2017)
- Soma, T., Sakai, N., Watanabe, Y., Yamamoto, S., "Complex Organic Molecules in Taurus Molecular Cloud-1", The Astrophysical Journal, 854, article id. 116, 11 pp., (2018)
- Nitta, T., Sekimoto, Y., Noda, K., Sekiguchi, S., Shu, S., Matsuo, H., Dominjon, A., Naruse, M., Kuno, N., Nakai, N., "Broadband Pillar-Type Antireflective Subwavelength Structures for Silicon and Alumina", IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, Volume 7, Issue 3, pp.295–301, (2017)
- Miyamoto, Y., Nakai, N., Seta, M., Salak, D., Nagai, M., Kaneko, H., "ALMA multiline observations toward the central region of NGC 613", Publications of the Astronomical Society of Japan, 69, id.83, (2017)
- 19. Ló pez-Sepulcre, A., Saka, N., Neri, R., Imai, M., Oya, Y., Ceccarelli, C., Higuchi, A.E., Aikawa, Y., Bottinelli, S., Caux, E., Hirota, T., Kahane, C., Lefloch, B., Vastel, C., Watanabe, Y., Yamamoto, S., "Complex organics in IRAS 4A revisited with ALMA and PdBI: Striking contrast between two neighbouring protostellar cores", Astronomy & Astrophysics, 606, article id. 121, 12 pp., (2017)

〈研究成果発表〉

[国際会議]

- Nitta, Tom, "Pyramid-type Antireflective Structures on Silicon Lenses for Millimeter-wave Observations", 17th International Workshop on Low Temperature Detectors, (久留米, 2017 年 7 月 17-21 日) (一般講演)
- 2. Watanabe, Yoshimasa, "Enhancement of CH_3OH Abundance by Interactions between Molecular Clouds in a Nearby Galaxy", TGSW2017, "Universe Evolution and Matter Origin", (Univ. of Tsukuba, 2017年9月26日) (一般講演)

[国内学会・研究会]

- 1. 飯田美幸,中井直正,齋藤弘雄,瀬田益道,永井誠,他つくば 32m アンテナ観測グループ、「巨大分子雲 W3 のアンモニア観測」、 日本天文学会 2017 年秋季年会、2017 年 9 月 11 日、北海道大学
- 2. 齋藤弘雄, 久野成夫, 梅本智文, 鳥居和史, 西村淳, 長谷川哲夫, 松尾光洋, 南谷哲宏, 河野樹人, 西村淳, 藤田真司, 半田利弘, 中西裕之, 瀬田益道, 小野寺幸子, 濤崎智佳, 大西利和, 徳田一起, 他 FUGIN チーム、「NRO 銀河面サーベイプロジェクト (FUGIN): 銀河系内域における分子雲同定」、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017 年 9 月 11 日、北海道大学
- 3. 徂徠和夫, 久野成夫, 村岡和幸, 宮本祐介, 金子紘之, 中西裕之, 中井直正, 柳谷和希, 田中隆広, 佐藤佑哉, Dragan Salak, 梅井 迪子, 諸隈佳菜, 松本尚子, 上野紗英子, Pan Hsi-An, 野間勇斗, 竹内努, 依田萌, 黒田麻友, 保田敦司, 矢島義之, 大井渚, 柴田修 吾, 瀬田益道, 渡邉祥正, 馬路博之, 瀬川陽子, 田代貴美, 武田美保, 岸田望美, 畠山拓也, 冨安悠人, 齊田智恵, 他 COMING メン バー、「NRO レガシープロジェクト COMING(11): 観測のまとめ」、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017 年 9 月 12 日、北 海道大学
- 4. 金子紘之,宮本祐介,徂徠和夫,矢島義之,柴田修吾,中井直正,久野成夫,渡邉祥正,田中隆広,佐藤佑哉,保田敦司,大井渚,諸隈 佳菜,竹内努,依田萌,村岡和幸,黒田麻友, Dragan Salak,野間勇斗,瀬田益道,松本尚子,中西裕之,上野紗英子, Pan Hsi-An, ほか COMING メンバー、「NRO レガシープロジェクト COMING (12):銀河群による近傍銀河のガスの性質に与える環境 効果の研究」、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017 年 9 月 12 日、北海道大学
- 5. 矢島義之, 徂徠和夫, 久野成夫, 村岡和幸, 宮本祐介, 金子紘之, 田中隆広, 柳谷和希, 佐藤佑哉, 他 COMING メンバー、「NRO レガシープロジェクト COMING(13):棒渦巻銀河 NGC 4303 における分子ガスの物理状態」、日本天文学会 2017 年秋季年会、 2017 年 9 月 12 日、北海道大学

- 6. 黒田麻友, 村岡和幸, 祖徠和夫, 矢島義之, 柴田修吾, 中井直正, 久野成夫, 渡邉祥正, 田中隆広, 佐藤佑哉, 保田敦司, 諸隈佳菜, 宮本祐介, 金子紘之, 竹内努, 依田萌, Dragan Salak, 野間勇斗, 松本尚子, 中西裕之, 上野紗英子, Pan Hsi-An, 他 COMING メンバー、「NRO レガシープロジェクト COMING(14): 近傍棒渦巻銀河の円盤領域における分子ガス速度分散と星形成効率の関係」、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017 年 9 月 12 日、北海道大学
- 7. 佐藤佑哉, 久野成夫, 田中隆広, 保田敦司, 中井直正, 徂徠和夫, 矢島義之, 金子紘之, 宮本祐介, 村岡和幸, 黒田麻友, 依田 萌, Dragan SALAK, 上野紗英子 他 COMING メンバー、「NRO レガシープロジェクト COMING(15): 12CO(1-0) と 13CO(1-0) を用いた星形成則の比較」、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017 年 9 月 12 日、北海道大学
- 8. 宮本祐介, 金子紘之, 徂徠和夫, 久野成夫, 中井直正, 田中隆広, 佐藤佑哉, 保田敦司, Dragan SALAK, 瀬田益道, 野間勇斗, 村岡 和幸, 黒田麻友, 竹内努, 依田萌, 諸隈佳菜, 松本尚子, 中西裕之, 上野紗英子, Pan Hsi-An, 他 COMING メンバー、「NRO レ ガシープロジェクト COMING(16): 近傍渦巻銀河 NGC 628 におけるガスの速度ベクトル」、日本天文学会 2017 年秋季年会、 2017 年 9 月 12 日、北海道大学
- 9. Dragan Salak, Yuto Tomiyasu, Naomasa Nakai, Nario Kuno, Yusuke Miyamoto, Hiroyuki Kaneko、「Distribution of dense molecula」、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017 年 9 月 12 日、北海道大学
- 10. 中西康一郎, 松林和也, 徂徠和夫, 中井直正, 久野成夫, 河野孝太郎, 安藤亮, 菅井肇、「High angular resolution and high sensitivity millimeter-wave continuum imaging toward the NGC 253 starburst nucleus」、日本天文学会 2017 年秋季年 会、2017 年 9 月 12 日、北海道大学
- 11. 安藤亮, 中西康一郎, 河野孝太郎, 泉拓磨, Sergio Martin, 原田ななせ, 高野秀路, 久野成夫, 中井直正, 菅井肇, 徂徠和夫, 濤崎智 佳, 松林和也, 中島拓, 田村陽一, 西村優里、「5pc 分解能で見た近傍星形成銀河 NGC 253 中心部の星形成活動の多様性 (2)」、 日本天文学会 2017 年秋季年会、2017 年 9 月 13 日、北海道大学
- 12. 渡邉祥正, 西村優里, 坂井南美, 徂徠和夫, 原田ななせ, 久野成夫, 山本智、「NGC 3627 における分子雲同士の相互作用の化学組成への影響」、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017 年 9 月 13 日、北海道大学
- 13. 田中隆広, 徂徠和夫, 柳谷和希, 金子紘之, 藤田真司, 久野成夫, 村岡和幸, 宮本祐介, 佐藤佑哉, 矢島義之, 依田萌, 黒田麻友, 他 COMING メンバー、「NRO レガシープロジェクト COMING(10):自動リダクションシステムの開発」、日本天文学会 2017 年 秋季年会、2017 年 9 月 11 日、北海道大学
- 14. 永井誠, 新田冬夢, 服部将吾, 村山洋佑, Zhai Guangyuan, Pranshu Mandal 中井直正, 久野成夫, 関本裕太郎, 木内等, 野口卓, 松尾宏, Dominjon Agnes, 福嶋美津広, 三ツ井健司, 福田武夫, 岩下光, 関口繁之, 成瀬雅人, 前川淳, 南谷哲宏, 御子柴廣, 藤茂, 宮澤千栄子, 齋藤正雄, 45m 運用メンバー、「野辺山 45m 電波望遠鏡搭載用 MKID カメラの搭載試験」、日本天文学会 2017 年 秋季年会、2017 年 9 月 11 日、北海道大学
- 15. Zhai Guangyuan, 永井誠, 新田冬夢, 中井直正, 久野成夫, Pranshu Mandal, 村山洋祐, 服部将吾, 関本裕太郎, 木内等, 野口 卓, 松尾宏, Dominjon Agnes, 関口繁之, 成瀬雅人, 前川淳, 南谷哲宏, 齋藤正雄、「野辺山 45m 電波望遠鏡搭載用 MKID カメ ラの解析ハイフライン」、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017 年 9 月 11 日、北海道大学
- 16. 米倉覚則, 秋田谷洋, 齋藤悠, 青木健悟, 山口貴大, 會川航平, 大島理穂, 齋藤偉, 百瀬宗武, 小川英夫, 藤沢健太, 高羽浩, 中井直正, 面高俊宏, 本間希樹, 小林秀行, 杉山孝一郎, 他大学間連携 VLBI group、「高萩/日立 32 m 電波望遠鏡の整備状況 (16)」、日本 天文学会 2017 年秋季年会、2017 年 9 月 11 日、北海道大学
- 17. 鳥居和史, 白崎裕治, Zapart Christopher, 宮本祐介, 金子紘之, 徂徠和夫, 南谷哲宏, 梅本智文, 大石雅寿, 「Japanese Virtual Observatory (JVO) を通じた野辺山 45m 電波望遠鏡レガシー プロジェクト COMING および FUGIN の観測データ公開プ ランについて」, 日本天文学会 2018 年春季年会, 2018 年 3 月 14 日-17 日, 千葉大学
- 18. 諸隈佳菜, 諸隈智貴, 児玉忠恭, 中西康一郎, 小山佑世), 小山舜平, 山下拓時, 中西裕之, 徂徠和夫, "HI & H2 gas properties of 80 Virgo galaxies on the phase-space diagram", 日本天文学会 2017 年秋季年会, 2017 年 9 月 11 日, 北海道大学
- 19. 徂徠和夫, 他 COMING メンバー, "CO Multi-line Imaging of Nearby Galaxies, COMING", NRO45m/ASTE Single Dish Science Workshop 2017, 2017 年 8 月 1 日,国立天文台野辺山宇宙電波観測所
- 20. 久野成夫、"銀河スケールでの分子ガス分布"、Science Workshop 2018 on FUGIN: The Galactic Plane Legacy Survey for Molecular Clouds、2018 年 2 月 26 27 日、名古屋大学
- 21. 久野成夫、"NRO 銀河面 CO サーベイ FUGIN"、天の川銀河研究会 2017、2017 年 10 月 24 26 日、鹿児島大学
- 22. 久野成夫、"南極望遠鏡"、宇宙電波懇談会シンポジウム FY2017:「未来を拓く技術開発とその将来展望」、2018 年 3 月 19 20 日、国立天文台
- 23. 村山洋佑、新田冬夢,服部将吾,中井直正,久野成夫, Pranshu Mandal, Guangyuan Zhai(筑波大学),関本裕太郎 (宇宙研), 永井誠,松尾宏, Dominjon Agnes, 野口卓, Wenlei Shan,江崎翔平,宮地晃平 (国立天文台),成瀬雅人 (埼玉大学) "野辺山 45m 電波望遠鏡用 100-GHz 帯カメラの 109 素子 Al-MKID の製作と評価"、第 18 回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ、 2018 年 2 月 22 - 23 日、国立天文台
- 24. 河野樹人, 立原研悟, 藤田真司, 西村淳, 大浜晶生, 福井康雄 (名古屋大), 鳥居和史, 梅本智文, 南谷哲宏, 松尾光洋 (国立天文台野 辺山), 久野成夫, 栗木美香 (筑波大), 津田裕也 (明星大), 徳田一起 (大阪 府立大/国立天文台), 切通僚介, 大西利和 (大阪府立 大), FUGIN チーム、"NRO 銀河面サーベイプロジェクト (FUGIN): 爆発的星形成領域 W43 の CO 輝 線観測 I"、日本天文 学会 2018 年春季年会、2018 年 3 月 16 日、千葉大学
- 25. 藤田真司, 西村淳, 河野樹人, 立原研悟, 大浜晶生, 佐野栄俊, 林克洋, 榎谷玲依, 吉池智史, 堤大陸, 大河一貴, 福井康雄 (名古屋 大), 久野成夫 (筑波大), 梅本智文, 南谷哲宏, 鳥居和史 (NAOJ), 山岸光義 (ISAS/JAXA), 松尾光洋 (鹿児島大), 濤崎智佳 (上 越教育大), 津田裕也 (明星大), 他 FUGIN チーム、"NRO 銀河面サーベイプロジェクト (FUGIN) : Spitzer Bubble N4 の

星形成"、日本天文学会 2018 年春季年会、2018 年 3 月 16 日、千葉大学

- 26. 佐藤一樹 (東京大学),長谷川哲夫,梅本智文,南谷哲宏,鳥居和史,阪本成一 (国立天文台),久野成夫 (筑 波大学),半田利弘 (鹿児島大学),瀬田益道 (関西学院大学),他 FUGIN チーム、"NRO 銀河面サーベイプロジェクト (FUGIN):ホットコアの無バイアスサーベイ (2) 解析手法の改良と銀経 10° 20°の解析結果"、日本天文学会 2018 年春季年会、2018 年 3 月 16 日、千葉大学
- 27. 佐野栄俊, 吉池智史, 山根悠望子, 長屋拓郎, 西村淳, 山本宏昭, 田村陽一, 立原研悟, 福井康雄 (名古屋大学), 久野成夫 (筑波 大学), 鳥居和史, 南谷哲宏, 梅本智文 (国立天文台), 瀬田益道 (関西学院大), Nigel Maxted (ニューサウスウェールズ大学), Gavin Rowell (アデレード大学), 他 FUGIN チーム、"シェル型 TeV ガンマ線超新星残骸 HESS J1912+101 に付随する分 子雲の発見"、日本天文学会 2018 年春季年会、2018 年 3 月 16 日、千葉大学
- 28. 小出凪人, 中西裕之 (鹿児島大学), 坂井伸行 (国立天文台水沢), 倉山智春 (帝京科学大学), 羽部朝男, 島和宏 (北海道大学), 梅本 智文, 南谷哲宏, 鳥居和史, 松尾光洋 (国立天文台野辺山), 藤田真司, 西村 淳, 河野樹人 (名古屋大学), 久野成夫, 栗木美香 (筑波 大学), 津田裕也 (明星大学), FUGIN チーム、"野辺山 45m 鏡と VERA による銀河系外縁部星形成領域 WB886 の観測的研 究"、日本天文学会 2018 年春季年会、2018 年 3 月 16 日、千葉大学
- 29. 野間勇斗、Dragan Salak、瀬田益道 (関学大)、徂徠和夫、矢島義之、柴田修吾 (北大)、宮本祐介、金子紘之(国立天文台)、田 中隆広、佐藤佑哉、久野成夫、保田敦司、中井直正(筑波大)、竹内 努、依田萌(名古屋大)、村岡和幸、黒田麻友(大阪府立大)、 中西裕之、上野紗英子 (鹿児島大)、 他 COMING メンバー、"NRO レガシープロジェクト COMING(17): 近傍銀河におけ る分子ガス速度場 のフーリェ解析"、日本天文学会 2018 年春季年会、2018 年 3 月 14 日、千葉大学
- 30. 佐藤佑哉, 久野成夫, 田中隆広, 保田敦司, 中井直正, 渡邉祥正 (筑波大学), 祖徠和夫, 矢島義之, 柴田修吾 (北海道大学), 金子紘之, 宮本祐介 (国立天文台), 村岡和幸, 黒田麻友 (大阪府立大学), 竹内努, 依田萌 (名古屋大学), Dragan SALAK, 野間勇斗 (関西学院大学), 中西裕之, 上野紗英子 (鹿児島大学) 他 COMING メンバー、"NRO レガシープロジェクト COMING(18):近傍銀河の 12CO(J = 1 0)/ 13CO(J = 1 0) 比に関する統計的研究"、日本天文学会 2018 年春季年会、2018 年 3 月 14日、千葉大学
- 31. 宮本祐介(国立天文台野辺山)、瀬田益道(関西学院大)、中井直正、渡邉祥正(筑波大学)、 Dragan SALAK (関西学院大)、石 井峻(国立天文台)、"ALMA による近傍銀河 NGC 613 中心領域の [CI] 観測"、日本天文学会 2018 年春季年会、2018 年 3 月 15 日、千葉大学
- 32. 村山洋佑, 新田冬夢, 服部将吾, 中井直正, 久野成夫, Pranshu Mandal, Guangyuan Zhai (筑波大学), 関本裕太郎 (宇宙研), 永井誠, 野口卓, 江崎翔平, 宮地晃平, Wenlei Shan, Dominjon Agnes, 松尾宏 (国立天文台), 成瀬雅人 (埼玉大学), 関口繁之 (東京大学)、"野辺山 45 m 電波望遠鏡搭載用 100-GHz 帯電波カメラの MKID アレイ開発"、日本天文学会 2018 年春季年会、 2018 年 3 月 15 日、千葉大学
- 33. 服部将吾、新田冬夢、村山洋佑、中井直正、久野成夫、Zhai Guangyuan、Mandal Pranshu (筑波大 学)、関本裕太郎、長谷 部孝 (宇宙航空研究開発機構)、永井誠、野口卓、松尾宏、福嶋美津広、三ツ 井健司 (国立天文台)、"100 GHz 帯連続波カメラ 冷却光学系で用いる Si レンズの反射防止コーティン グの開発"、日本天文学会 2018 年春季年会、2018 年 3 月 15 日、千葉大学
- 34. 佐藤雄登, 中井直正, 久野成夫 (筑波大学), 瀬田益道 (関西学院大学), 長崎岳人 (KEK), 関本裕太郎 (ISAS/JAXA)、"南極望 遠鏡用 500GHz 帯 2SB 受信機の中間周波数 (IF) 帯域の広帯域化"、日本天文学会 2018 年春季年会、2018 年 3 月 15 日、千 葉大学
- 35. 新田冬夢 他, "Development of 100-GHz band MKID camera for Nobeyama 45m telescope", NRO45m/ASTE Single Dish Science Workshop 2017, 2017 年 8 月 2 日, 国立天文台野辺山宇宙電波観測所
- 36. 新田冬夢、"南極テラヘルツ望遠鏡計画に向けた広視野電波カメラの開発"、宇宙電波懇談会シンポジウム FY2017:「未来を拓く 技術開発とその将来展望」、2018 年 3 月 19 - 20 日、国立天文台

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

部門長

武内 勇司 (数理物質系物理学域 准教授)

構成教員

- 石橋 延幸(数理物質系物理学域教授)
- 受川 史彦(数理物質系物理学域 教授)
- 原 和彦(数理物質系物理学域 准教授)
- 佐藤 構二 (数理物質系物理学域 講師)
- 大川 英希(数理物質系物理学域 国際テニュアトラック助教)スイス連邦 CERN 研究所在駐
- 伊敷 吾郎 (数理物質系物理学域 助教)
- 佐藤 勇二 (数理物質系物理学域 助教)
- 飯田 崇史(数理物質系物理学域 テニュアトラック助教)
- 金 信弘(数理物質系物理学域 特命教授)
- KIM, Soo-Bong (ソウル国立大学 教授) 海外教育研究ユニット招致 PI
- 吉田 拓生(福井大学教授)クロスアポイントメント教員
- 池上 陽一 (KEK 准教授) クロスアポイントメント教員

連携教員

松浦 周二 (関西学院大学教授) 客員教授

素粒子構造部門では、大きく分けて3つの研究を行った。それらは、(1) ビーム衝突型の高エネルギー粒子 加速器を用いた陽子陽子衝突実験、(2) 宇宙背景ニュートリノを用いたニュートリノ崩壊探索、(3) 超弦理論 の研究である。

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

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

さらに 2020 年代半ばには LHC 加速器の輝度の大幅な向上が予定されており、ATLAS 検出器も増強が必要となる。そのための粒子飛跡検出器の開発を並行して行っている。当検出器開発は光量子計測器開発部門の プロジェクトの一つとして密接な連携のもと進められており、当報告書の光量子計測器開発部門活動報告に詳細が記述されている。

(2) は、ニュートリノがクォークやレプトンと比べてはるかに小さな質量を持つことに着目し、その質量の 絶対値を決定して素粒子質量の起源を解明することを目標とする。ニュートリノの輻射崩壊で生じる赤外線領 域の光子を観測するために、超伝導接合素子(Superconducting Tunnel Junction、STJ)を用いた、高いエ ネルギー分解能を持つ光検出器を開発している。将来は、宇宙背景ニュートリノの観測のために、ロケットお よび人工衛星を利用した実験を計画している。なお、宇宙背景ニュートリノが観測されれば、素粒子物理学を 超えて、宇宙論にも大きな影響を与える。

(3) は、素粒子が点でなく弦(ひも)であるという考えに基づき、重力を含めた素粒子の基礎理論を構築し ようという研究である。現在の素粒子標準理論は、相対論的な場の量子論をその枠組みとしているが、重力の 量子論はまだ作られていない。超弦理論はその可能性を持つ最も有力な理論である。

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

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

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

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

教 授 吉田 拓生 (クロスアポイントメント教員,福井大学)

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

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

(1) LHC ATLAS 実験(受川、原、佐藤構二、大川、池上、金)

欧州原子核研究機構 CERN の Large Hadron Collider (LHC) は、世界最高エネルギーでの陽子・陽 子衝突型加速器である。2011-2012 年の Run-1 実験では重心系エネルギー7~8 TeV での陽子・陽子 衝突を行った。2013-2014 年のエネルギー増強のための改良を経て、2015 年からの Run-2 実験では、 重心系エネルギー13 TeV で衝突実験を続けている。図 24 に ATLAS 実験で取得したデータ量を、年 ごとに示す。Run-2 実験では、2015 年に 3.7 fb⁻¹、2016 年に 35.9 fb⁻¹の衝突データを取得したのに 引き続き、2017 年には LHC 加速器、ATLAS 検出器ともに順調に運転し、46.8 fb⁻¹ のデータを記録 した。図 24 には、2018 年についても本稿執筆中の 5 月までの状況について示されている。

2017 年度にも、われわれは精力的に取得した衝突データを解析している。多くの物理解析では、2015~2016 年の 2 年間に取得した約 36 fb⁻¹ のデータ^{*1}を用いて研究を行った。

ヒッグス粒子の精密測定

ヒッグス粒子は、2012 年に LHC 加速器で陽子・陽子衝突のデータを観測している ATLAS および CMS 両実験により約 125 GeV/ c^2 の質量をもって発見されていた。Run-1 のデータの解析によりす でに、スピン・パリティの測定結果が標準理論の予言値 0⁺ と整合がよいことが確認された。また、 ヒッグス粒子が弱ゲージボソン対に崩壊する $H \rightarrow ZZ^*$ 、 $H \rightarrow WW^*$ の崩壊モードおよび、トップ

^{*1} 上記の記録された全データ量は2年間で39.6 fb⁻¹ だが、検出器に不具合がある中で取得したデータは物理解析には用いない。こうした検出器の運転状況の影響の重大性は解析ごとに異なるため、同じ2年間のデータであっても使用したデータ量は、解析ごとに多少異なる。



図 24 ATLAS 実験で取得したデータ量の推移を、年ごとに示している。

 $クォークのループ・ダイアグラムが寄与する H \to \gamma\gamma$ 崩壊が、5σを超える有意度で観測された。と くに、 $H \to ZZ^* \to 4\ell$ と $H \to \gamma\gamma$ の崩壊チャンネルは、バックグラウンドを抑えながら崩壊粒子 をすべて検出できるため、ヒッグス粒子の精密測定に使いやすい。2017年にこれら2崩壊チャンネ ルを解析した質量測定結果を図 25に示す。ヒッグス粒子の質量は 124.97±0.28 GeV/ c^2 と測定さ れた。ATLAS 実験単独でのこの結果は、Run-1 データでの ATLAS、CMS 両実験の複合測定の結果 125.09±0.24 GeV/ c^2 に精度の上で迫っている。



図 25 ATLAS 実験でのヒッグス粒子の質量測定結果。 $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell \ge H \rightarrow \gamma\gamma$ の2 チャンネルを合わせて測定しているが、同時に各チャンネルの単独の結果はお互いによく一致している。

これら Run-1 で確立した解析チャンネルは、Run-2 では事象数が大幅に増え、ヒッグス粒子の生成、崩壊過程の詳細な研究に用いられはじめるようになった。2017 年度には $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ チャンネルではヒッグス粒子の生成および崩壊過程の詳細な研究結果が論文になった。ヒッグス 粒子の生成断面積と $H \rightarrow ZZ^*$ 崩壊分岐比の積が標準理論予言値が 1.34 ± 0.09 pb のところ、 $1.73^{+0.24}_{-0.23}(stat.)^{+0.10}_{-0.08}(exp.) \pm 0.04(th.)$ pb と測定されたほか、図 26 に示すように、Run-1 では全解析 チャンネルを複合することで行っていたヒッグス粒子の結合に関するフィットが単独チャンネルのデー タだけで行われた。2018 年度には、 $H \rightarrow \gamma \gamma$ 崩壊での同様な解析結果やヒッグス粒子事象の微分断面 積も論文発表される予定である。



図 26 $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ 事象の解析結果から得られた ggF と VBF 生成過程の生成断面積と $H \rightarrow ZZ$ 崩壊分岐比 の積 $\sigma_{ggF} \cdot B$ と $\sigma_{VBF} \cdot B(\underline{c})$ 、およびヒッグス粒子のベクトル・ボソンとフェルミオンに対する結合の強さの測定結 果を標準理論予言値で規格化した値 κ_V と $\kappa_F(\overline{c})$ に対する制約。

ヒッグス粒子のクォーク対への崩壊モードの観測

Run-1のデータの詳細な解析により、 $H \to \tau \tau$ が ATLAS と CMS 両実験の複合結果で 5 σ を超える有 意度で観測され、Run-2が始まる前には、ヒッグス粒子のフェルミオン対への崩壊も観測されていた。 しかし、ヒッグス粒子とクォークとの結合を直接観測することは Run-2 での課題として残っていた。 標準理論では 125 GeV/ c^2 のヒッグス粒子のボトムクォーク対への崩壊分岐比は 58% と予想されてい る。一方で、ボトムクォークに起因するジェットは陽子・陽子の QCD 反応で高い頻度で生成されるた め、膨大なバックグラウンドに $H \to b\bar{b}$ 事象は埋もれてしまって観測が難しい。ヒッグス粒子が弱ボソ ン W および Z を伴って生成される WH および ZH 生成過程で、W や Z ボソンがレプトンまたは ニュートリノに崩壊する事象を探すことでバックグラウンドは大幅に減らすことができる。ATLAS 実 験ではこれら解析チャンネルで $H \to b\bar{b}$ 崩壊の観測を目指してきたが、2017 年度に Run-2 データの解 析において 3.5 σ の有意度で信号の兆候を観測した。標準理論の予言値で規格化した WH および ZH 過程の生成断面積の測定結果と、2 つのボトムクォークの不変質量を図 27 に示す。

トップクォークは、湯川結合によって質量を得るフェルミオンの中でもっとも重く、したがってヒッグ ス粒子との結合が強い。そして、フェルミオンの中で唯一、電弱対称性が敗れるエネルギー・スケール に質量がある。トップクォークとヒッグス粒子の結合を測定することは、とくに興味深い。これを直接 測定できる解析チャンネルが、 $t\bar{t}H$ 生成過程で、ATLAS 実験ではこのトップクォーク対を伴ったヒッ グス粒子生成過程の発見を目指してきた。2017 年度には、ヒッグス粒子 WW*, ZZ*, $\gamma\gamma$, $b\bar{b}$ に崩壊す る解析チャンネルの解析結果を足し合わせることで、4.3 σ の有意度で信号の兆候を観測することがで きた。モンテ・カルロ事象を使った解析感度の予想では 3.8 σ の有意度が予想されていた。事象の信号 らしさを全チャンネルで一つにまとめてプロットした図と、 $t\bar{t}H$ 生成断面積と各崩壊モードの分岐比の 積を標準理論の予言値で規格化した値を、図 28 に示す。



図 27 (左)WH および ZH 過程の生成断面積の測定結果。(右)事象内の2つのボトムクォークの不変質量の分布。 電弱相互作用で生成される WZ と ZZ バックグラウンド事象以外のバックグラウンドの寄与は差し引いた後の分布で あり、灰色の部分がバックグラウンド。ヒッグス粒子の信号のベストフィットを赤いヒストグラムで表している。



図 28 (左)ttH 事象探索の各解析チャンネルで評価した事象の信号らしさを、全チャンネルまとめてプロットしたもの。ここでの信号らしさは各解析の最終段階のヒストグラムの S/B の値を使っている。(右) ヒッグス粒子の崩壊モードごとに測定した ttH 生成断面積と各崩壊モードの分岐比の積と標準理論の予言値の比。

ヒッグス粒子の稀崩壊の探索

ヒッグス粒子の稀崩壊事象の探索は、湯川結合と標準理論の検証を行う上で、極めて重要である。標準 理論を超える物理が存在した場合に、既存の崩壊モードの比率が増大したり、標準理論では存在しえな い崩壊モードが可能になるためである。ヒッグス粒子のミューオン対への崩壊は、背景事象の少ないク リーンなイベントトポロジーで測定することが可能で、第2世代粒子の湯川結合に対して、最も高い感 度を持つチャンネルである。図 29 は、2015・2016 年の全データを用いた、ベクターボソンフュージョ ン生成過程における、ミューオン対の不変質量分布である。昨年度の暫定的な結果を、査読付き論文に 提出した。ヒッグス粒子のミューオン対への崩壊比は、95%の信頼度で標準理論からの予測の 2.8 倍以 下であることがわかった。ヒッグス粒子のミューオン対への崩壊モードは、シグナル強度に対する不定 性が、100% に追っており、近いうちに、観測又は、兆候を捉えることが可能になるかもしれない。 同じく第二世代の湯川結合に起因する、チャームクォークへの崩壊に対しても探索を行った。LHC Run 1 では、 $H \rightarrow J/\psi\gamma$ チャンネルを用いて探索が行われたが、Run 2 では、新たにチャームクォー ク由来のジェットを同定する、c-tagging が開発され、LHC で初めて $H \rightarrow cc$ チャンネルの探索が行わ れた (図 29(右))。標準理論の予測値通りであれば、LHC で $H \rightarrow cc$ を測定することは極めて困難であ るが、新物理が存在すれば、その崩壊比が大きく増大する可能性があるため、その探索は大変に重要で ある。ヒッグス粒子のチャームクォーク対への崩壊比は、95%の信頼度で標準理論からの予測の 110 倍以下であることがわかった。



図 29 ATLAS 実験の Run-2 のデータを用いた、ヒッグス粒子の (左) ミューオン対崩壊事象および (右) チャーム クォーク対崩壊事象の探索。

標準理論では存在しない (又は、ほぼ無視しうる) 崩壊モードとして、非可視 (インビジブル) 崩壊や、 未知のボソンを介した崩壊、フレーバー対称性が破れた崩壊などが挙げられる。

ヒッグス粒子のインビジブル崩壊の探索は、暗黒物質とヒッグス粒子の全崩壊幅の観点から非常に重要 な研究である。暗黒物質が、ヒッグス粒子のみと相互作用するという、ヒッグスポータル暗黒物質モデ ルは、数多くある暗黒物質モデルの中でも最有力で、繰り込み可能であり、又、現在の暗黒物質の直接 探索実験の結果とも整合する。

2015 年と 2016 年の Run-2 の全データを用いて、ヒッグス粒子の Z/W ボソン随伴生成過程を用いた探 索を行った。Z ボソン随伴生成過程については、Z ボソンのレプトン崩壊とハドロン崩壊の両者につい て考慮した。W ボソン随伴生成過程については、ハドロン崩壊のみを考えて、探索を行った。ニュート リノや暗黒物質などの、弱い相互作用をする粒子の横運動量の間接測定である、消失横運動量 (E_{T}^{miss}) 分布において、標準理論予測からの若干の超過は見られたが、現時点では有意ではない (図 30)。非可 視崩壊比への制限は、95% の信頼度で、Z ボソンのレプトン崩壊を用いたチャンネル (図 30(左)) で、 67% (期待感度 39%) 以下であり、Z/W ボソンのハドロン崩壊を用いたチャンネル (図 30(右)) では、 83% (期待感度 58%) であった。どちらのチャンネルでも、Run-1 での期待感度を超えるに至った。最 もシグナル感度が高い vector boson fusion (VBF) 過程を用いた探索は、現在進行中である。



図 30 ATLAS 実験の Run-2 のデータを用いた、Z ボソン随伴生成過程でのレプトン崩壊事象 (左)、および Z/W ボソン随伴生成過程でのハドロン崩壊事象 (右) における、ヒッグス粒子のインビジブル崩壊の探索での消失横運動量 分布。

標準理論を超えた重いヒッグス粒子の探索

標準理論を超えた物理の多くのモデルにおいて、複数のヒッグス粒子が存在することが示唆されている。その中でも、ZZ モードへの崩壊は、多くのモデルで予測されるため、探索チャンネルとして重要である。2015 年と 2016 年の Run-2 の全データを用いて、ZZ 共鳴事象の探索を行った。その際には、Z ボソンの崩壊モードに対応して、4ℓ,ℓℓνν,ℓℓqq,ννqq,4q (ℓ: 電子又はミューオン,ν: ニュートリノ,q: クォーク) というように多様なチャンネルについて、探索を行った。4ℓ では、不変質量が 250 GeV と 700 GeV 付近で、3σ を超える超過が観測されたが (図 31)、ℓℓνν チャンネルでは整合する超過は見られなかった。両チャンネルを合わせた結果、現時点で、質量域 200 GeV から 2.0 TeV にかけて、標準理論からの有意な逸脱は、観測されなかった (図 31)。ℓℓνν チャンネルでは、bulk Randall-Sundrum Graviton について、 $\kappa/M_{\rm Pl} = 1.0$ の条件下で、1.3 TeV の質量域を、95% の信頼度で棄却し、昨年度を超える結果を得た。

 $\ell\ell qq, \nu\nu qq, 4q チャンネルは、ZZ だけでなく、WZ や WW (後者は 4q チャンネルのみ)の共鳴事$ $象にも感度がある。これらのチャンネルに加えて、<math>\ell\nu qq$ チャンネルからも、W' 粒子の探索が行われ、 Heavy Vector Triplet モデルにおいて、ベクターボソンとの結合 g_V が3の場合に、3 TeV を超える質 量域が 95% の信頼度で棄却された (図 32)。

暗黒物質の探索

未発見である暗黒物質は、LHC における衝突で生成される可能があり、現在に至るまで様々な新物理 のシナリオを考慮した広範な探索が行われている。

暗黒物質が直接対生成されるシナリオでは、initial state radiation を伴った事象で、モデル依存性の 少ない Simplified Models を用いた探索および解釈が行われてきた。このモデルは、媒介粒子と暗黒 物質の質量、および3つの結合定数という、高々計5つのパラメータで記述される。この仮定のもと では、興味深いことに、dijet 事象からも暗黒物質の存在可能領域に対して、強力な制限をつけること



図 31 4 ℓ チャンネルにおける不変質量分布 (左) と 4 ℓ と $\ell\ell\nu\nu$ チャンネルを合わせて得られた重いヒッグス粒子の生成断面積及び崩壊分岐比への制限 (右)。



図 32 WZ 共鳴事象に対する W'の質量域への制限。

ができる (図 33(左))。又、よりモデル依存性が生じるものの、ヒッグス粒子と未知の媒介粒子の相互 作用を評価できる、mono-Higgs チャンネルについても探索を行った。この探索は、暗黒物質に対して ヒッグス粒子が反跳するような事象の発見を目指している。最もシグナルへの感度が優れているのは、 mono- $H(\rightarrow bb)$ チャンネルである。現時点では、標準理論からの有意な逸脱はなく、Z'-2HDM と呼ば れるモデルでの二つの媒介粒子の質量域に対して、強い制限を与えた (図 33(右))

この他にも、超対称性理論などのシナリオにおいても、暗黒物質の探索が精力的に行われている。

(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、S.B. Kim、吉田、金) COBAND 実験は、宇宙背景ニュートリノ崩壊探索を目的とした、筑波大学を中心とする国際共同実験 である。宇宙初期に生成されたニュートリノの名残とされる宇宙背景ニュートリノは、現在温度 1.9 K、 各質量固有状態の世代ごとに数密度 110 個/cm³ で宇宙全体にわたって存在していると予言されてい る。最も重い質量固有状態のニュートリノは、軽い質量固有状態に波長約 50 μm の光子を放出して崩



図 33 Simplified models における媒介粒子と暗黒物質の質量域に対する制限 (左) と、Z'-2HDM モデルに対する mono- $H(\rightarrow bb)$ チャンネルから得られた棄却域 (右)。

壊することが可能であり、我々 COBAND 実験では、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 10¹² 年を超える感度で宇宙背景ニュートリノの崩壊に伴う光子を観測するロケット実験、 およびそれに続く衛星実験を計画中である。実験に要求される光検出器は、波長 50 µm (エネルギー 25 meV)の光子をエネルギー分解能 2% 以下の精度で一光子ずつ測定可能な性能である。この要求を 満たす検出器の候補として、我々のグループでは、超伝導トンネル接合素子 (Superconducting tunnel junction, STJ) による光検出器を開発してきた。当超伝導トンネル接合素子の開発は光量子計測器開 発部門のプロジェクトの一つであり、光量子計測器開発部門や産総研、KEK の測定器開発室などと密 接な連携のもと進められており、詳細については、当報告書の光量子計測器開発部門活動報告に記述さ れているので、そちらを参照されたい。

ロケット実験用の光学系の開発は、2017 年度着任した飯田助教が福井大、関西学院大等との共同研究 により開始し、福井大が持つ遠赤外線分子レーザ装置による波長約 50 µm の単色光源を用いた回折格 子のテストを行っている。

(3) 超弦理論の研究(石橋、佐藤勇二、伊敷)

超弦理論グループは弦の場の理論、行列模型、ゲージ重力対応という3つの関連するテーマを中心と して研究を進めている。弦の場の理論と次元正則化、弦の場の理論の古典解の研究、重力理論/ゲージ 理論双対性とグルーオン散乱振幅、弦理論の非幾何学的背景時空、行列模型における古典極限と幾何学 の関係、行列模型を用いた M5 ブレーンの記述等の超弦理論に関連する様々な分野についての研究を 行った。

光円錐ゲージの超弦の場の理論の次元正則化とループ振幅

超弦理論は散乱振幅の摂動論に紫外発散がないことが知られているが、超弦の場の理論においてはコン タクトタームの問題と呼ばれる問題があり、tree 振幅でさえ見かけ上発散してしまうため、正則化を与 えなければ定義することが出来ない。また、D-ブレーンの影響等の散乱振幅とは異なる量を計算する際 には、弦の理論のうまい正則化の方法を与えることが必要不可欠になる。

石橋は村上(釧路高専)らとのこれまでの研究で、様々な場合について光円錐ゲージの超弦の場の理論 の次元正則化を用いた計算により、第一量子化の計算と一致する結果を得ることができるということ を示してきた。今年度は、外線が NS sector に属し、odd spin structure の世界面に対応する振幅の場合、次元正則化を用いた超弦の場の理論から計算される結果が第一量子化の結果を再現することを示した(論文 101)。

Kodaira-Spencer 重力と Calabi-Yau 多様体の複素構造の変形

Calabi-Yau 多様体 X の poly-vector 場の空間 B は odd フーリエ変換により微分形式の空間 A と ベクトル空間として同型対応する。毛利は、これを利用して、A の Hodge 双対作用素 * や SU(2)の生成子を B に移植し、* は B にほぼ algebra 準同型として作用すること、及び B の積演算が SU(2) を保存することを発見した。副産物として、Marcus-Yankielowicz が提出した謎の整合性条件 が Kodaira-Spencer 方程式と等価であることが判った。更に B に、Barannikov-Kontsevich とは別 の、differential Gerstenhaber-Batalin-Vilkovisky 代数の構造が入ることを示した。

Kodaira-Spencer 重力において、運動方程式の解による場の凝縮は Calabi-Yau 多様体 X に複素構造 のカイラルな変形を誘導するが、これが数学的な X の複素構造の変形のカイラル極限で得られること を計算で示した (論文 102)。

ゲージ-重力双対性と可積分性に基づく強結合ゲージ理論の研究

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

佐藤は、伊藤(東京工業大)、鈴木(静岡大)と共に、6 点強結合散乱振幅を与える Z₄ 可積分模型の熱 力学的ベーテ仮説方程式が、化学ポテンシャル・質量項が大きな極限で解析的に解けることを示し、対 応する強結合 6 点散乱振幅を求めた。これは、散乱振幅の研究で重要な役割を果たしてきた Z₆ 対称性 を持つ運動学的配位および soft/collinear 極限での強結合散乱振幅を内挿する解析的表式を与えるもの である。また、これまでに解析されてきた運動学的配位と対照的に、こうした運動学的配位においては 強弱結合の散乱振幅の振舞いが大きく異なることを明らかにした(論文 103)。

コヒーレント状態を用いた行列幾何の研究

超弦理論の非摂動的定式化として期待されている行列模型では、弦や D ブレーンといった物体は、行 列幾何と呼ばれる離散的な幾何の枠組みにより記述される。過去に伊敷は、量子力学のコヒーレント状 態を応用した行列幾何の定式化の方法を提案している。本年度、伊敷・村木・松本はこの方法について 研究し、その結果、この方法が数学分野における Berezin-Toeplitz 量子化と呼ばれる方法と密接に関係 していることが明らかになった (論文 104)。また、慶応大学の松浦教授、前橋工科大学の浅川嗣彦准教 授らも共同研究に加わり、この方法の物理的な系への応用についての研究を行った。その結果、この方 法が超弦理論におけるタキオン凝縮と呼ばれる現象において重要な役割を果たすことが示された (論文 105)。

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

弦の場の理論の運動方程式の厳密解は、Schnabl によるタキオン真空解の発見以来活発に研究されてい る。最近 Erler と Maccaferri は、時間に依らない運動方程式の解の場合、任意の BCFT に対応する厳 密解を書き下すことができることを示した。石橋は、岸本 (新潟大)、増田 (プラハ物理学研究所)、高 橋 (奈良女子大) らとともに、Erler と Maccaferri の方法を用いて構成された constant magnetic field に対応した弦の場の理論の厳密解のベクトル場の配位とトポロジーとの関係を調べた (論文 106)。

弦理論における非幾何学的背景時空と宇宙項問題

弦理論の対称性である弦双対性により、リーマン幾何学的な時空とは異なる非幾何学的な時空も弦理論 の背景時空として可能となる。このような背景時空(非対称オービフォルド、T-fold など)は、弦理論 の真空・対称性(双対性)を理解する上で重要であり、典型的には真空のモジュライが弦スケールの場 合に可能となる。

佐藤は菅原、上床(立命館大学)と共に、弦の世界面の共形場理論に基づき、弦スケールでも有効な非 幾何学的背景時空の解析を進め、非対称オービフォルド模型を用いて超対称性を破るが対応する円筒振 幅が消える D-ブレインが容易に構成できることを明らかにした(論文 107)。この結果を含むこれまで の我々の結果に基づき、超対称性を破るが小さな宇宙項を持つ興味深い弦の真空を得ることが可能と なる。

行列模型を用いた M5 ブレーンの記述

M 理論には M2 ブレーンと M5 ブレーンと呼ばれる 2 種類の基本的な物体が存在することが知られて いる。行列模型はそのような M 理論の第二量子化を与えていると期待されているが、M5 ブレーンが 行列模型の枠内でどのように記述されるのかはこれまで分かっていなかった。伊敷は島崎信二研究員 (慶応大学)、浅野侑磨研究員 (Dublin Institute for Advanced Studies)、寺嶋靖治助教 (京都大学基 礎物理学研究所) らとともにこの問題を研究し、行列模型に M5 ブレーンが含まれていることを初めて 示した (論文 108, 109)。伊敷らは行列模型に局所化と呼ばれる計算方法を適用し、物理量の非摂動的 な計算を実行した。その結果、M5 ブレーンが行列模型の低エネルギーの行列配位として実現されてい ることが明らかになった。また、伊敷・島崎・浅野らが執筆した、この研究の基礎となる過去の論文は 2017 年度の素粒子メダル奨励賞を受賞した。



図 34 CaI₂ 結晶を作成するのに用いたブリッジマン育成炉の概念図(左)と、作成した CaI₂ 結晶、CaBr₂ 結晶、CaCl₂ 結晶の写真(右)。

(4) 新規大発光量シンチレータの開発(飯田)

宇宙暗黒物質の直接探索実験やニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊(0νββ)探索実験などの、 低エネルギー極稀事象探索のための新規無機シンチレータ結晶の開発を東北大学と共同で行っている。



図 35 CaI₂ 結晶に ¹³⁷Cs の 662 keV ガンマ線を当てた時の発光量分布(左)。赤が CaI₂、黒が NaI(Tl) であり、 ピークの位置から 2.7 倍の発光量であることが確認された。CaI₂ の光電ピークの左にある小さいピークは特性 X 線の エスケープピークである。右は作成した Ca(Br,I)₂ 結晶各種。Br の割合によって異なる性質が得られた。

暗黒物質による原子核の反跳エネルギーは指数関数的に分布しており、どれだけ低いエネルギーまで観 測出来るかが非常に重要になる。一方の $0\nu\beta\beta$ 探索実験では、ニュートリノを放出する二重ベータ崩壊 $(2\nu\beta\beta)$ が究極の 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、ど ちらの事象も極めて稀なため、大量の標的を用意する必要がある。これらの問題を解決するためには、 大発光量のシンチレータを開発することが一つの鍵となりうる。

ヨウ化カルシウム(CaI₂)結晶は 1964 年に R. Hofstadter らによって発見されており、一般的に用い られる NaI(Tl)の2倍以上の発光量であることが知られている。しかし、当時の未熟な結晶育成・加 工技術のせいで、一般に広まることなく技術が埋没してしまった。我々は、無機シンチレータの育成加 工に高い実績を誇る東北大学金属材料研究所の吉川研究室と共同で、同研究室が所有する最新の装置と 技術を駆使して CaI₂を含む新規高性能シンチレータ結晶の技術を確立することを目指している。

2016 年度から 2017 年度にかけて二重ベータ崩壊核の ⁴⁸Ca を含むアルカリハライド結晶である CaI₂,CaBr₂,CaCl₂の開発を行った。結晶作成には図 34 左に示すようなブリッジマン結晶育成法を用 いた。各種粉末原料を調合し、9N アルゴン雰囲気下で石英アンプルに投入し、'300°C でのベーキング の後、石英アンプルを封止した。実際に作った結晶の写真を図 34 右に示したが、3 種類すべてにおい て無色透明な結晶が得られた。作製した結晶は、湿度 1 %以下のドライルーム中での切断、研磨の後、 発光、シンチレータ特性評価を行った。

3 種類の結晶のうち、CaI₂ で NaI(Tl) の 2.7 倍、CaF₂ と比べると約 10 倍となる 107,000 photon/MeV の大発光量が確認された(図 35)。発光波長は 410 nm と光電子増倍管の感度波長と一致しており、発 光の時定数は 834 ns であった。総合的に見て非常に良い性能のシンチレータであることが分かった。

しかしながら CaI₂ 結晶は、劈開性が極めて強く加工や取り扱いが困難であることが判明した。そこで 我々は、CaI₂ のヨウ素 (I) を一部臭素 (Br) で置き換えた、Ca(Br,I)₂ 結晶の開発も並行して進めるこ とにした。石英封止型ブリッジマン法を用い作製した Eu 添加 Ca(Br, I)₂ 結晶を図 35 右に示す。作成 した 3 種類のうち、Eu2%:CaBr_{0.5}I_{1.5}、Eu2%:CaBrI の組成について透明性を有する結晶が得られ た。全てにおいて劈開性は改善が見られたが、発光量特性などに関しては現在測定を進めているところ である。今後は Br の割合を最適化することで、大発光量でかつ加工性に優れた結晶を開発していく。

- (5) <u>陽子・反陽子衝突実験 CDF</u>(受川、原、武内、佐藤構二、S.B. Kim、 吉田、金)
 - CDF 実験は、米国フェルミ国立加速器研究所のテバトロン加速器を用いた陽子・反陽子衝突実験であ り、日本をはじめアジア、北米、欧州の計 14 ヶ国の研究機関・大学からなる国際協力により行なわれ ている。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。2017-18 年には 7 篇 の原著論文が公表された。

〈論文〉

- T. Aaltonen, K. Hara, S. B. Kim, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa, T. Yoshida *et al.* [CDF Collaboration], "Observation of the Y(4140) structure in the J/ψφ mass spectrum in B[±] → J/ψφK[±] decays," Mod. Phys. Lett. A **32**, 1750139 (2017).
- T. Aaltonen, K. Hara, S. B. Kim, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa, T. Yoshida *et al.* [CDF Collaboration], "Measurement of sin² θ^{lept}_{eff} using e⁺e⁻ pairs from γ^{*}/Z bosons produced in pp̄ collisions at a center-of-momentum energy of 1.96 TeV," Phys. Rev. D 93, 112016 (2016) Addendum: [Phys. Rev. D 95, 119901 (2017)].
- 3. T. Aaltonen, K. Hara, S. B. Kim, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa, T. Yoshida *et al.* [CDF Collaboration], "Measurement of the D^+ Meson Production Cross Section at Low Transverse Momentum in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV," Phys. Rev. D **95**, 092006 (2017).
- 4. T. Aaltonen, K. Hara, S. B. Kim, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa, T. Yoshida *et al.* [CDF Collaboration], "Measurement of the inclusive-isolated prompt-photon cross section in pp̄ collisions using the full CDF data set," Phys. Rev. D 96, 092003 (2017).
- T. Aaltonen, K. Hara, S. B. Kim, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa, T. Yoshida *et al.* [CDF Collaboration], "A search for the exotic meson X(5568) with the Collider Detector at Fermilab," Phys. Rev. Lett. **120**, 202006 (2018).
- T. Aaltonen, K. Hara, S. B. Kim, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa, T. Yoshida *et al.* [CDF Collaboration], "Combined Forward-Backward Asymmetry Measurements in Top-Antitop Quark Production at the Tevatron," Phys. Rev. Lett. **120**, 042001 (2018).
- 7. T. Aaltonen, K. Hara, S. B. Kim, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa, T. Yoshida *et al.* [CDF Collaboration], "Search for $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ and $B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ decays with the full CDF Run II data set," Phys. Rev. D 87, 072003 (2013) Erratum: [Phys. Rev. D 97, 099901 (2018)].
- G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Topological cell clustering in the ATLAS calorimeters and its performance in LHC Run 1," Eur. Phys. J. C 77, 490 (2017).
- M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Performance of the ATLAS Trigger System in 2015," Eur. Phys. J. C 77, 317 (2017).
- 10. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Jet energy scale measurements and their systematic uncertainties in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. D **96**, 072002 (2017).
- 11. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for new high-mass phenomena in the dilepton final state using 36 fb^{\sharp f 1} of proton-proton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **1710**, 182 (2017).
- 12. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for new phenomena in dijet events using 37 fb⁻¹ of *pp* collision data collected at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. D **96**, 052004 (2017).
- G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for lepton-flavour-violating decays of the Higgs and Z bosons with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C 77, 70 (2017).
- 14. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of the $t\bar{t}$ production cross-section using $e\mu$ events with b-tagged jets in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Lett. B **761**, 136 (2016) Erratum: [Phys. Lett. B **772**, 879 (2017).]
- M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Electron efficiency measurements with the ATLAS detector using 2012 LHC proton 窶菟 roton collision data," Eur. Phys. J. C 77, 195 (2017).

- 16. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Evidence for the $H \rightarrow b\bar{b}$ decay with the ATLAS detector," JHEP **1712**, 024 (2017).
- 17. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Performance of algorithms that reconstruct missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 8$ TeV proton-proton collisions in the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C 77, 241 (2017).
- 18. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Precision measurement and interpretation of inclusive W^+ , W^- and Z/γ^* production cross sections with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C **77**, 367 (2017).
- 19. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurements of long-range azimuthal anisotropies and associated Fourier coefficients for *pp* collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ and 13 TeV and *p*+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. C **96**, 024908 (2017).
- 20. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of the charge asymmetry in top-quark pair production in the lepton-plus-jets final state in pp collision data at $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C **76**, 87 (2016) Erratum: [Eur. Phys. J. C **77**, 564 (2017).]
- 21. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of the inclusive cross-sections of single top-quark and top-antiquark *t*-channel production in *pp* collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **1704**, 086 (2017).
- 22. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for new resonances decaying to a W or Z boson and a Higgs boson in the $\ell^+\ell^-b\bar{b}$, $\ell\nu b\bar{b}$, and $\nu\bar{\nu}b\bar{b}$ channels with pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Lett. B **765**, 32 (2017).
- 23. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of multi-particle azimuthal correlations in *pp*, *p*+Pb and low-multiplicity Pb+Pb collisions with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C **77**, 428 (2017).
- 24. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Evidence for light-by-light scattering in heavy-ion collisions with the ATLAS detector at the LHC," Nature Phys. 13, 852 (2017).
- 25. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of the $t\bar{t}Z$ and $t\bar{t}W$ production cross sections in multilepton final states using 3.2 fb⁻¹ of *pp* collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C **77**, 40 (2017).
- 26. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for new phenomena in high-mass diphoton final states using 37 fb⁻¹ of proton-proton collisions collected at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Lett. B **775**, 105 (2017).
- 27. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for dark matter at $\sqrt{s} = 13$ TeV in final states containing an energetic photon and large missing transverse momentum with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C 77, 393 (2017).
- 28. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for a scalar partner of the top quark in the jets plus missing transverse momentum final state at \sqrt{s} =13 TeV with the ATLAS detector," JHEP **1712**, 085 (2017).
- 29. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for heavy resonances decaying to a Z boson and a photon in *pp* collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Lett. B **764**, 11 (2017).
- 30. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for direct top squark pair production in final states with two leptons in $\sqrt{s} = 13$ TeV *pp* collisions with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C **77**, 898 (2017).
- 31. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for pair production of vector-like top quarks in events with one lepton, jets, and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 13$ TeV *pp* collisions with the ATLAS detector," JHEP **1708**, 052 (2017).
- 32. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for supersymmetry in final states with two same-sign or three leptons and jets using 36 fb⁻¹ of $\sqrt{s} = 13$ TeV *pp* collision data with the ATLAS detector," JHEP **1709**, 084 (2017).
- 33. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for pair production of heavy vector-like quarks decaying to high- p_T W bosons and b quarks in the lepton-plus-jets final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **1710**, 141 (2017).
- 34. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of jet fragmentation in Pb+Pb and *pp* collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector at the LHC," Eur. Phys. J. C **77**, 379 (2017).
- 35. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration],

"Measurement of the cross section for inclusive isolated-photon production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector," Phys. Lett. B **770**, 473 (2017).

- 36. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of the prompt J/ ψ pair production cross-section in pp collisions at √s = 8 TeV with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C 77, 76 (2017).
- 37. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for dark matter in association with a Higgs boson decaying to *b*-quarks in *pp* collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Lett. B **765**, 11 (2017).
- 38. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Fiducial, total and differential cross-section measurements of *t*-channel single top-quark production in *pp* collisions at 8 TeV using data collected by the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C 77, 531 (2017).
- 39. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for top quark decays t → qH, with H → γγ, in √s = 13 TeV pp collisions using the ATLAS detector," JHEP **1710**, 129 (2017).
- M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Reconstruction of primary vertices at the ATLAS experiment in Run 1 proton 窶菟 roton collisions at the LHC," Eur. Phys. J. C **77**, 332 (2017).
- 41. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of forward-backward multiplicity correlations in lead-lead, proton-lead, and proton-proton collisions with the ATLAS detector," Phys. Rev. C **95**, 064914 (2017).
- 42. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for new phenomena in a lepton plus high jet multiplicity final state with the ATLAS experiment using $\sqrt{s} = 13$ TeV proton-proton collision data," JHEP **1709**, 088 (2017).
- 43. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of the W boson polarisation in $t\bar{t}$ events from pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV in the lepton + jets channel with ATLAS," Eur. Phys. J. C 77, 264 (2017).
- 44. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "A measurement of the calorimeter response to single hadrons and determination of the jet energy scale uncertainty using LHC Run-1 *pp*-collision data with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C 77, 26 (2017).
- 45. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for heavy resonances decaying to a W or Z boson and a Higgs boson in the $q\bar{q}^{(\prime)}b\bar{b}$ final state in *pp* collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Lett. B **774**, 494 (2017).
- 46. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurements of the production cross section of a Z boson in association with jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C **77**, 361 (2017).
- 47. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for new phenomena in events containing a same-flavour opposite-sign dilepton pair, jets, and large missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 13 \ pp$ collisions with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C **77**, 144 (2017).
- 48. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of W[±]W[±] vector-boson scattering and limits on anomalous quartic gauge couplings with the ATLAS detector," Phys. Rev. D **96**, 012007 (2017).
- 49. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for Heavy Higgs Bosons A/H Decaying to a Top Quark Pair in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector," Phys. Rev. Lett. **119**, 191803 (2017).
- 50. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for the dimuon decay of the Higgs boson in *pp* collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. Lett. **119**, 051802 (2017).
- 51. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurements of top-quark pair differential cross-sections in the $e\mu$ channel in *pp* collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C **77**, 292 (2017).
- 52. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "High- $E_{\rm T}$ isolated-photon plus jets production in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector," Nucl. Phys. B **918**, 257 (2017).
- 53. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Searches for the $Z\gamma$ decay mode of the Higgs boson and for new high-mass resonances in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **1710**, 112 (2017).
- 54. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration],

"Probing the W tb vertex structure in t-channel single-top-quark production and decay in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **1704**, 124 (2017).

- 55. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for squarks and gluinos in events with an isolated lepton, jets, and missing transverse momentum at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. D **96**, 112010 (2017).
- 56. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for Dark Matter Produced in Association with a Higgs Boson Decaying to $b\bar{b}$ using 36 fb⁻¹ of *pp* collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS Detector," Phys. Rev. Lett. **119**, 181804 (2017).
- 57. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of the inclusive jet cross-sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **1709**, 020 (2017).
- 58. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for supersymmetry in events with *b*-tagged jets and missing transverse momentum in *pp* collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **1711**, 195 (2017).
- 59. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for dark matter in association with a Higgs boson decaying to two photons at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. D **96**, 112004 (2017).
- 60. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurements of electroweak Wjj production and constraints on anomalous gauge couplings with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C 77, 474 (2017).
- 61. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurements of $\psi(2S)$ and $X(3872) \rightarrow J/\psi \pi^+\pi^-$ production in *pp* collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **1701**, 117 (2017).
- 62. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of the ZZ production cross section in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ZZ $\rightarrow \ell^{-}\ell^{+}\ell'^{-}\ell'^{+}$ and $ZZ \rightarrow \ell^{-}\ell^{+}\nu\bar{\nu}$ channels with the ATLAS detector," JHEP **1701**, 099 (2017).
- 63. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of inclusive and differential cross sections in the $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ decay channel in *pp* collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **1710**, 132 (2017).
- 64. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of the $t\bar{t}\gamma$ production cross section in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **1711**, 086 (2017).
- 65. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurements of integrated and differential cross sections for isolated photon pair production in *pp* collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. D **95**, 112005 (2017).
- 66. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurements of top-quark pair to Z-boson cross-section ratios at $\sqrt{s} = 13, 8, 7$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **1702**, 117 (2017).
- 67. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for anomalous electroweak production of WW/WZ in association with a high-mass dijet system in *pp* collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Rev. D **95**, 032001 (2017).
- 68. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurements of top quark spin observables in $t\bar{t}$ events using dilepton final states in $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions with the ATLAS detector," JHEP **1703**, 113 (2017).
- 69. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurements of top-quark pair differential cross-sections in the lepton+jets channel in *pp* collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector," JHEP **1711**, 191 (2017).
- 70. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of jet $p_{\rm T}$ correlations in Pb+Pb and pp collisions at $\sqrt{s_{\rm NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Lett. B **774**, 379 (2017).
- M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Performance of the ATLAS Track Reconstruction Algorithms in Dense Environments in LHC Run 2," Eur. Phys. J. C 77, 673 (2017).
- 72. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Analysis of the *Wtb* vertex from the measurement of triple-differential angular decay rates of single top quarks produced in the *t*-channel at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **1712**, 017 (2017).
- 73. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa et al. [ATLAS Collaboration],

"Determination of the strong coupling constant α_s from transverse energy-energy correlations in multijet events at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C **77**, 872 (2017).

- 74. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for direct top squark pair production in events with a Higgs or Z boson, and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 13$ TeV *pp* collisions with the ATLAS detector," JHEP **1708**, 006 (2017).
- 75. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of charged-particle distributions sensitive to the underlying event in $\sqrt{s} = 13$ TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector at the LHC," JHEP **1703**, 157 (2017).
- 76. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for triboson W[±]W[±]W[∓] production in *pp* collisions at √s = 8 TeV with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C 77, 141 (2017).
- 77. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Studies of $Z\gamma$ production in association with a high-mass dijet system in *pp* collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **1707**, 107 (2017).
- 78. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Top-quark mass measurement in the all-hadronic $t\bar{t}$ decay channel at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector," JHEP **1709**, 118 (2017).
- 79. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of jet activity produced in top-quark events with an electron, a muon and two *b*-tagged jets in the final state in *pp* collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C **77**, 220 (2017).
- 80. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of W boson angular distributions in events with high transverse momentum jets at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector," Phys. Lett. B **765**, 132 (2017).
- 81. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of the W^+W^- production cross section in *pp* collisions at a centre-of-mass energy of $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS experiment," Phys. Lett. B **773**, 354 (2017).
- 82. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurements of charge and CP asymmetries in *b*-hadron decays using top-quark events collected by the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV," JHEP **1702**, 071 (2017).
- 83. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for new phenomena with large jet multiplicities and missing transverse momentum using large-radius jets and flavour-tagging at ATLAS in 13 TeV *pp* collisions," JHEP **1712**, 034 (2017).
- 84. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Femtoscopy with identified charged pions in proton-lead collisions at $\sqrt{s_{\rm NN}} = 5.02$ TeV with ATLAS," Phys. Rev. C 96, 064908 (2017).
- 85. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of lepton differential distributions and the top quark mass in $t\bar{t}$ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C **77**, 804 (2017).
- 86. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of WW/WZ → ℓνqq' production with the hadronically decaying boson reconstructed as one or two jets in *pp* collisions at √s = 8 TeV with ATLAS, and constraints on anomalous gauge couplings," Eur. Phys. J. C 77, 563 (2017).
- M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Identification and rejection of pile-up jets at high pseudorapidity with the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C 77, 580 (2017). Erratum: [Eur. Phys. J. C 77, 712 (2017).]
- 88. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Jet reconstruction and performance using particle flow with the ATLAS Detector," Eur. Phys. J. C 77, 466 (2017).
- 89. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of the cross-section for electroweak production of dijets in association with a Z boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Lett. B **775**, 206 (2017).
- 90. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Study of $WW\gamma$ and $WZ\gamma$ production in *pp* collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV and search for anomalous quartic gauge couplings with the ATLAS experiment," Eur. Phys. J. C **77**, 646 (2017).
- M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Study of the material of the ATLAS inner detector for Run 2 of the LHC," JINST **12**, P12009 (2017).
- 92. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of the k_t splitting scales in $Z \to \ell \ell$ events in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,"

JHEP 1708, 026 (2017).

- 93. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of detector-corrected observables sensitive to the anomalous production of events with jets and large missing transverse momentum in *pp* collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector," Eur. Phys. J. C 77, 765 (2017).
- 94. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of *b*-hadron pair production with the ATLAS detector in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV," JHEP **1711**, 062 (2017).
- M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Study of ordered hadron chains with the ATLAS detector," Phys. Rev. D 96, 092008 (2017).
- 96. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of the $t\bar{t}$ production cross section in the τ + jets final state in *pp* collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector," Phys. Rev. D **95**, 072003 (2017).
- 97. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of the Drell-Yan triple-differential cross section in *pp* collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV," JHEP **1712**, 059 (2017).
- 98. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], "Performance of the ATLAS Transition Radiation Tracker in Run 1 of the LHC: tracker properties," JINST 12, P05002 (2017).
- K. Kamada, T. Iida, et al., "Single crystal growth and scintillation properties of Ca(Cl, Br, I)₂ single crystal," Ceramics International, 43 (Suppl. 1), S423-S427 (2017).
- 100. K. Nakajima, T. Iida, *et al.*, "Background studies of high energy γ rays from (n, γ) reactions in the CANDLES experiment," Astroparticle Physics, 100, 54-60 (2018).
- N. Ishibashi and K. Murakami, "Multiloop Amplitudes of Light-cone Gauge Superstring Field Theory: Odd Spin Structure Contributions," JHEP 1803 (2018) 063.
- 102. K. Mohri, "Algebra of Kodaira-Spencer Gravity and Deformation of Calabi-Yau Manifold," Rev. Math. Phys. Vol.29 No.4 (2017) 1750010.
- 103. Katsushi Ito, Yuji Satoh and Junji Suzuki, "MHV amplitudes for small conformal cross-ratios and linearized TBA equations," preprint UTHEP-718.
- 104. G. Ishiki, T. Matsumoto and H. Muraki, "Information metric, Berry connection and Berezin-Toeplitz quantization for matrix geometry," arXiv:1804.00900 [hep-th], UTHEP-716.
- 105. T. Asakawa, G. Ishiki, T. Matsumoto, S. Matsuura and H. Muraki, "Commutative Geometry for Non-commutative D-branes by Tachyon Condensation," arXiv:1804.00161 [hep-th], UTHEP-715 (PTEP に掲載決定).
- 106. N. Ishibashi, I. Kishimoto, T. Masuda and T. Takahashi, "Vector profile and gauge invariant observables of string field theory solutions for constant magnetic field background," arXiv:1804.01284 [hep-th], UTHEP-717 (JHEP に掲載決定).
- 107. Yuji Satoh, Yuji Sugawara and Takahiro Uetoko, "Non-supersymmetric D-branes with vanishing cylinder amplitudes in asymmetric orbifolds," JHEP **1708** (2017) 082.
- 108. Y. Asano, G. Ishiki, S. Shimasaki and S. Terashima, "Spherical transverse M5-branes from the plane wave matrix model," JHEP 1802, 076 (2018).
- 109. Y. Asano, G. Ishiki, S. Shimasaki and S. Terashima, "Spherical transverse M5-branes in matrix theory," Phys.Rev. D96 (2017) no.12, 126003.

〈著書・総説等〉

1. 金 信弘, 受川史彦, 「CDF 実験 30 年の軌跡と物理成果」, 日本物理学会誌 60, 388 (2017).

〈研究成果発表〉

[国際会議]

- 1. H. Okawa, "Search for Dark Matter in Events with a Single Boson and Missing Transverse Momentum using the ATLAS Detector", An Alpine LHC Physics Summit (ALPS) 2017, April 17 22, 2017, Tirol, Austria. (招待講演)
- 2. K. Sato, "Search for neutral and charged BSM Higgs Bosons with the ATLAS detector", Phenomenology 2017 Symposium, May 5 8, 2017, Pittsburgh, USA. (招待講演)
- S. Honda, "Measurement of cross sections and couplings of the Higgs Boson using the ATLAS detector", QCD17, 20th High-Energy Physics International Conference in Quantum Chromodynamics, July 3 – 7, 2017, Montpellier, France. (招待講演)
- 4. S. Honda, "Search for the Standard Model Higgs boson produced in association with top quarks and decaying into

 $b\bar{b}$ in the ATLAS detector", 3rd International Conference on Particle Physics and Astrophysics, October 2 – 5, 2017, Moscow, Russia. (招待講演)

- 5. H. Okawa, "Latest LHC Results & Prospects on Measurements & Searches in the Higgs Sector", 20th New Higgs Working Group Meeting, August 18 19, 2017, Osaka, Japan. (招待講演)
- H. Okawa, "Highlights of LHC Higgs Results, Related Searches & Prospects for Future", 21st New Higgs Working Group Meeting, December 22 – 23, 2017, Osaka, Japan. (招待講演)
- 7. T. Iida, "COBAND Project for Cosmic Background Neutrino Decay Search and Rocket Experiment Design", Tsukuba Global Science Week 2017 (TGSW2017), Sep. 25 – 27, 2017, EPOCHAL Tsukuba, Tsukuba-shi, Japan. (招待講演)
- 8. S. B. Kim, "New Results from RENO", Tsukuba Global Science Week 2017 (TGSW2017), September 25 27, 2017, EPOCHAL Tsukuba, Tsukuba-shi, Japan. (招待講演)
- 9. H. Okawa, "Highlights from the ATLAS Experiment", Tsukuba Global Science Week 2017 (TGSW2017), September 25 27, 2017, EPOCHAL Tsukuba, Tsukuba-shi, Japan. (招待講演)
- Y. Takeuchi, "Superconducting Tunnel Junction Detectors", 18th International Workshop on Next generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN17), October 26 – 28, 2017, University of Warwick, Coventry, UK. (招 待講演)
- 11. S. H. Kim *et al.*, "Cosmic Background Neutrino Decay Search COBAND experiment", Unification and Development of the Neutrino Science Frontier, March 5 6, 2018, Kyoto University, Kyoto, Japan. (招待講演)
- Y. Takeuchi, "Division of Elementary Particles", Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26 – 27, 2018, Tsukuba, Japan. (招待講演)
- S. B. Kim, "Reactor Neutrino Physics and Prospect", Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26 - 27, 2018, Tsukuba, Japan. (招待講演)
- Y. Takeuchi, "Introduction to COBAND project", Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26 – 27, 2018, Tsukuba, Japan. (招待講演)
- 15. K. Sato, "Standard Model measurements at the ATLAS experiment", Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26 27, 2018, Tsukuba, Japan. (招待講演)
- 16. H. Okawa, "Searches for physics beyond the Standard Model at the ATLAS experiment", Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26 – 27, 2018, Tsukuba, Japan. (招待講演)
- S. Honda, "Search for the Higgs boson produced in association with top quarks and decaying into bottom quarks with the ATLAS detector", Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26 – 27, 2018, Tsukuba, Japan. (招待講演)
- M. Hagihara, "Search for charged Higgs bosons decaying into top and bottom quarks in pp collisions at 13 TeV with the ATLAS detector", Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26 – 27, 2018, Tsukuba, Japan. (招待講演)
- 19. S. H. Kim, "Cosmic Background Neutrino Decay Search COBAND Experiment -", NAPP Seminar, April 28, 2017, Seoul National University, Seoul, Korea. (セミナー)
- 20. S. H. Kim, "Cosmic Background Neutrino Decay Search COBAND Experiment ", KASI Colloquium, Jul. 19, 2017, KASI, Taejong, Korea. (セミナー)
- 21. S. H. Kim, "Cosmic Background Neutrino Decay Search COBAND Experiment Continuous Spectral Measurement in Far-Infrared Region using STJ", Research Technique Seminar, November 21, 2017, FNAL, Illinoise, USA. (セミナー)
- H. Okawa, "Unveiling the Higgs & Dark Sectors at the LHC", Seminar at the University of Science and Technology of China, Hefei, China, January 11, 2018. (セミナー)
- 23. S. H. Kim, "Cosmic Background Neutrino Decay Search COBAND Experiment Continuous Spectral Measurement in Far-Infrared Region using STJ", KNRC seminar, March 19, 2018, Seoul National University, Seoul, Korea. (セミナー)
- 24. T. Iida *et al.*, "Astro-particle physics with newly developed inorganic scintillator", 8th International Conference on New Development In Photodetection (NDIP17), July 3 7, 2017, Tours, France. (ポスター)
- 25. T. Iida *et al.*, "Multi-purpose detector using high light yield CaI2 crystal," XV International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2017), July 24 28, 2017, Sudbury, Canada. (ポスター)
- 26. Y. Furuya, T. Iida *et al.*, "Crystal growth and scintillation properties of Eu doped Ca(Br_xI_{1-x})₂ solid solution," 7th International Workshop on Photoluminescence in Rare Earths: Photonic Materials and Devices (PRE' 17), November 30 – December 2, 2017, Rome, Italy. (ポスター)
- 27. Nobuyuki Ishibashi, "Multiloop amplitudes of light-cone gauge superstring field theory: Odd spin structure contributions," SFT@HIT, (Holon Institute of Technology, Holon, Israel, June 23-25, 2017). (招待講演)
- Yuji Satoh "A world-sheet approach to T-folds," New developments in AdS₃/CFT₂ holography, Galileo Galilei Institute for Theoretical Physics, Florence, Italy, March 20, 2017. (招待講演)

- 29. Goro Ishiki, "Matrix geometry and string theory," Noncommutative Geometry and K-theory at Rits The Fourth China-Japan Conference , Ritsumeikan University, Mar. 26-28, 2018. (招待講演)
- Goro Ishiki, "Spherical transverse M5-branes from the plane wave matrix model," International workshop "Nonperturbative and Numerical Approaches to Quantum Gravity, String Theory and Holography, ICTS, Tata institute, Bangalore, India, Jan. 29 - Feb. 2, 2018. (招待講演)
- 31. Takaki Matsumoto, "Information metric for matrix geometry," APCTP workshop "Discrete Approaches to the Dynamics of Fields and Space-Time," APCTP, Pohang, Korea, Sep. 19-23, 2017. (招待講演)
- 32. Goro Ishiki, "Spherical transverse M5-branes from the plane wave matrix model," APCTP workshop "Discrete Approaches to the Dynamics of Fields and Space-Time," APCTP, Pohang, Korea, Sep. 19-23, 2017.
- 33. Hisayoshi Muraki, "Contravariant Gravity -A Gravity on Poisson Manifolds-," APCTP workshop "Discrete Approaches to the Dynamics of Fields and Space-Time," APCTP, Pohang, Korea, Sep. 19-23, 2017.
- 34. Takaki Matsumoto, "Spectral action for large-N matrices," East Asia Joint Workshop on Fields and Strings 2017, KEK, Nov. 13-17, 2017. (ポスター)
- Takaki Matsumoto, "Information metric for matrix geometry," 10th Taiwan String Workshop, NCTS, Taiwan, Oct. 26-29, 2017.
- Takaki Matsumoto, "Information metric and Berry phase in matrix geometry," YITP workshop "Strings and Fields 2017, YITP, Kyoto, Aug. 7-11, 2017.

[国内学会・研究会]

- 本多俊介: LHC-ATLAS 実験 Run2 における H→ bb 崩壊過程でのヒッグス粒子 tH 生成過程探索, 日本物理学会 2017 年秋季大会(2017 年 9 月 12–15 日), 宇都宮大学.
- 大川英希: ATLAS 実験 13TeV データを使ったヒッグスなどの測定と新物理探索, 日本物理学会 2017 年秋季大会(2017 年 9 月 12–15 日),宇都宮大学. (企画講演)
- 3. 飯田崇史: CaI2 シンチレータの開発, Scintillator for Medical, Astroparticle and Environmental Radiation Techniques 2017 (SMART2017) (2017 年 11 月 11 日), 蔵王温泉ホテル樹林. (招待講演)
- 大川英希:素粒子実験における多変量解析・機械学習・深層学習などのビッグデータ解析-LHC-ATLAS実験を例に、 大規模複雑データの理論と方法論,及び、関連分野への応用(2017年12月1-3日)、筑波大学. (招待講演)
- 5. 飯田崇史:チュートリアル講演:シンチレータの原理と応用例,
 第4回超新星ニュートリノ研究会(2018年1月9日),箱根・強羅青雲荘. (招待講演)
- 6. 本多俊介:LHC-ATLAS 実験 Run2 における $H \rightarrow b\bar{b}$ 崩壊過程でのヒッグス粒子 $t\bar{t}H$ 生成過程探索結果,
- 日本物理学会第 73 回年次大会(2018 年 3 月 22–25 日),東京理科大学野田キャンパス.
 7. 伊敷吾郎,松本高興,村木久祥: Spectral action for large-N matrices,
- 日本物理学会第73回年次大会(2018年3月22日-25日),東京理科大学野田キャンパス.
- 8. 伊敷吾郎, 松本高興, 村木久祥: 行列幾何とベリー位相, 日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017 年 9 月 12 日-15 日), 宇都宮大学.

〈その他特記事項〉

1. 伊敷吾郎:国際会議・研究会の実施(世話人)

APCTP workshop 「Discrete Approaches to the Dynamics of Fields and Space-Time」, 2017 \mp 9 \exists 19 \exists -23 \exists , APCTP, Pohang, Korea.

2. 伊敷吾郎:国際会議・研究会の実施 (世話人)

YITP workshop 「Quantum Gravity, String Theory and Holography」, 2017 年 4 月 3 日-7 日, 京都大学基礎物理学研究所.

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

部門長

江角 晋一(数理物質系物理学域 准教授)

構成教員

- 三明 康郎 (数理物質系物理学域 教授)
- 小澤 顕(数理物質系物理学域 教授)
- 中條 達也(数理物質系物理学域 講師)
- Oliver Busch (数理物質系物理学域 国際テニュアトラック助教) ドイツ国ハイデルベルグ大学在駐
- 坂井 真吾(数理物質系物理学域 助教)
- 金谷 和至(数理物質系物理学域 教授)宇宙史研究センター長
- 山口 貴之(埼玉大学准教授)クロスアポイントメント教員
- 小沢 恭一郎(高エネルギー加速器研究機・素粒子原子核研究所 准教授)クロスアポイントメント教員 佐甲 博之(日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・ハドロン原子核物理研究グループ 研 究主幹)クロスアポイントメント教員

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

連携教員

- 蔵増 嘉伸(数理物質系物理学域 教授)
- 谷口 裕介(数理物質系物理学域准教授)
- 鈴木 伸司 (数理物質系物理学域 助教)
- 杉立 徹(広島大学・理学研究科教授) 客員教授
- 濱垣 秀樹(長崎総合科学大学・新技術創成研究所 教授) 客員教授
- 秋葉 康之(理化学研究所・仁科加速器研究センター・延與放射線研究室 副主任研究員)客員教授
- 若杉 昌徳(理化学研究所・仁科加速器研究センター 実験装置開発室長)客員教授
- 永宮 正治(高エネルギー加速器研究機構 名誉教授、理化学研究所 研究顧問)
- 郡司 卓(東京大学・理学系研究科・原子核科学研究センター 准教授)
- 志垣 賢太 (広島大学・理学研究科 准教授)

スイス・フランスの欧州共同原子核研究機構 (CERN) の LHC 加速器と、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原子核衝突によるクォーク・グルーオン・プラズマの実験 的研究を行い、宇宙初期のような高温領域から中性子内部のような高密度領域へ広がる QCD 相図の性質を研 究した。ジェットや重クォーク等のハードな指針を用いた研究と、集団運動的な非等方的な膨張や多粒子相 関、揺らぎ測定等のソフトな指針を用いた研究を推進した。また理研の RI ビームファクトリーを用いた不安 定核の研究を行い、超新星爆発や中性子星衝突による元素合成の起源や謎を探る研究を行った。

宇宙誕生直後の QCD 相転移において、カラー電荷が中性でない粒子は観測されないという「カラー閉じ込め」や、物質の質量の 99% の起源である 「カイラル対称性の破れ」など、非常に奇妙で、非常に魅力的な現象が、強い相互作用により発生し、宇宙の様相は現在の姿に劇的に変化した。また、その QCD 相転移は非常に 高密度では一次相転移であるといわれており、中性子星など超高密度の星の中、もしくは、星がつぶれていく 過程で一次相転移が実現すると期待される。宇宙誕生の謎、星の終焉の謎の解明にむけて、強い相互作用のダ イナミクスの理解が不可欠である。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。

(1) LHC-ALICE 実験における pp 及び Pb-Pb 衝突実験での荷電粒子ジェット生成についての研究

通常、ハドロン内に閉じ込め状態にあるクォークやグルーオン (パートン) は、高エネルギー原子核衝 突によって生み出される超高温・高密度環境下では一定領域内を自由粒子のように振る舞うことができ る Quark-Gluon Plasma(QGP) 相へと相転移する。衝突実験において高運動量を持つ粒子が一定領域 内に束になって観測されることがあり、この現象はジェットと呼ばれる。ジェットは衝突初期における パートン間での高運動量移行を伴う相互作用過程を起源とし、衝突によって生成された QGP との相互 作用を経て観測されると考えられ、QGP 物性を探る上での非常に良いプローブである。

我々は 2015 年に収集された $\sqrt{s_{\rm NN}} = 5.02$ TeV での pp 及び Pb-Pb 衝突実験の現在使用可能である全統計量を用いて荷電粒子生成量の測定を行った。原子核衝突における原子核効果を定量的に評価するため、pp 衝突における結果を基準として Nuclear modification factor($R_{\rm AA}$)を測定した。測定された荷電粒子ジェットの $R_{\rm AA}$ を図 36 に示す。 $R_{\rm AA} < 1$ は pp 衝突と比較して Pb-Pb 衝突ではジェット収量が抑制されていることを示し、これは QGP との相互作用によるパートンのエネルギー損失があったためであると解釈できる。

本結果は今後、pp 衝突におけるジェット生成量や QGP 中でのエネルギー損失効果についての理論モ デル計算との比較等を含め、査読付き論文としてまとめる予定である。



図 36 荷電粒子ジェットの R_{AA}

(2) LHC-ALICE 実験におけるチャーム・ボトムクォークの測定

チャームクォークやボトムクォークは質量が QGP の温度よりも大きいために熱的に生成されることは なく、衝突初期のハード散乱によってのみ生成される。陽子-陽子衝突でのハード散乱によるチャーム・ ボトムクォークの生成は QCD 計算で記述できその生成機構がよくわかっているため、高エネルギー重 イオン衝突によって生成される高温高密度物質 (QGP)の性質を探索する上で重要な観測量として盛ん

に測定が行われている。図 37 は ALICE 実験で測定されたチャーム・ボトムクォークを含む D 中間子 及び B 中間子の崩壊を起源とする電子の R_{AA} (重イオン衝突における粒子収量を陽子 + 陽子衝突にお ける収量 × 平均核子衝突回数で割ったもの)である。陽子-鉛衝突では R_{AA} は 1 と無矛盾である一方、 鉛-鉛衝突においては $R_{AA} < 1$ であり、これはチャーム・ボトムクォークが QGP 通過中にエネルギー を失い、生成量が減少したことを示唆する。

また、7 TeV 陽子-陽子衝突においてチャームクォークを含むバリオンである Ξ_c^0 粒子が ALICE 実験に おいて始めて測定された。図 38 は Ξ_c^0 粒子と D⁰ 中間子の生成断面積の比をとったバリオン/メソン比 と呼ばれる量である。既存のモデル計算が実験結果を過小評価していることが分かり、より詳細なハド ロン化機構の理解が必要であることを示した。今後は陽子-鉛衝突及び陽子-陽子衝突における D 中間子 及び B 中間子の崩壊起源電子の高横運動量領域における詳細な測定や、チャーム・ボトムクォークを 起源とするジェット (パートンが破砕した粒子群)の研究を推進する予定である。



図 37 D 中間子及び B 中間子起源の電子の R_{AA} (赤:5.02 TeV 鉛-鉛衝突、青:5.02 TeV 陽子-鉛衝突)



図 38 7 TeV 陽子-陽子衝突における Ξ_c^0/D^0 比

(3) LHC-ALICE 実験における HBT 測定

重イオン衝突では、発生するハドロン同士の量子力学的な干渉効果を測定することにより QGP のフ リーズドアウト時の大きさや衝突後の時空発展の描像を調べることのできる HBT 測定がある。QGP の性質の一つに、衝突に参加した粒子の空間的な異方性による、衝突後の楕円的な集団膨張運動が知ら れているが、フリーズドアウト時の楕円的な空間的異方性は衝突初期の形状を反映しているということ が、この HBT 測定により理解されている。

LHC-ALICE 実験では、さらにこの現象を理解するために集団膨張運動の大きさによって事象を選択 する Event Shape Engineering 法を適用した。その結果、集団膨張運動のより大きい事象ではフリー ズドアウト時の楕円的な空間的異方性がより強く残っていることがわかった。この結果は、集団膨張運 動とフリーズドアウト時の空間的な異方性の起源が初期の形状によるものということを強く支持するも のである。

(4) RHIC-STAR 実験における event shape engineering を用いた 2 粒子相関の反応平面依存性の測定 原子核衝突実験において初期に起こるパートン同士の二体散乱を起源とした高エネルギーの粒子群であ るジェットが生成される。ジェットは QGP 中で相互作用し、そのエネルギーを損失する。このことか



図 39 フリーズドアウト時の楕円率 $\left(-2R_{out,2}^2/R_{side,0}^2, 2R_{side,2}^2/R_{side,0}^2\right)$ と Centrality 及び q_2 selection との関係 [1]

ら、ジェットは QGP 中でのエネルギー損失機構の解明のために用いられてきた。

近年、粒子多重度による中心衝突度の決定に加えて、集団膨張運動 (flow) の強度を用いて事象の形状を 選択する手法として、Event Shape Engineering(ESE) が提案された [2]。これを用いることで、ジェッ トの QGP 中でのエネルギー損失の通過距離依存性および、QGP との相互作用によって失われたエネ ルギーの再分配と系の膨張運動に関してより詳細な測定を行うことができる。

図 40 は、2 粒子相関の反応平面依存性を楕円フローが強い事象と弱い事象で測定した結果である。反応平面方向の収量が増大しており、楕円フローがより強い方向、つまり通過距離が短い方向での収量が 増大していることが明らかになった。

(5) RHIC-STAR 実験における unfolding を用いた net-proton 分布の高次キュムラント測定

QCD 相構造の解明および臨界点探索を目的として、理論的・実験的に様々なアプローチで研究が行われてきた。実験においては net-proton をはじめとした保存量の衝突事象ごとの高次揺らぎが重要な測定量の一つとして測定が行われてきた。[3]

また、近年実験によって得られた揺らぎに対する検出効率の補正に関する研究も進められており、そ の一つが unfolding (図 41) である。通常検出効率の補正として行われるのは二項分布を前提とした 補正であるが、実際の実験でこの前提が破れていた場合は正しく補正することができない。一方で unfolding を用いればシミュレーションの input と output の情報を用いて分布自体を再構成すること ができ、2 項分布を前提としない場合にも応用が可能であり、より正確な補正が期待される。実験の検 出器を再現する詳細な Geant シミュレーションにより、検出器の応答関数が、従来の efficiency 補正に おいて仮定されてきた二項分布より広い分布を持つ beta-binomial 分布に近いことが示された。図 42 に示す様に、実験において測定された net-proton 分布から、その応答関数を用いて、unfolding を用い て C_6/C_2 を計算し比較した [4]。

(6) RHIC-STAR 実験 $\sqrt{s_{NN}}$ =4.5GeV 固定標的における方位角異方性の測定

現在 RHIC-STAR 実験では衝突エネルギーを 7.7~200 GeV までスキャンすることで QCD 相図の臨 界点やハドロン相とパートン相の相転移の境界についての研究が行われている (Beam Energy Scan)。 Cern の NA49 で行われた実験で、 $\sqrt{s_{NN}}=7.7$ GeV において相転移と考えられるシグナルが観測され た [5]。RHIC では固定標的に対してビームを衝突させることでより低い $\sqrt{s_{NN}}=4.5$ GeV を実現し方



図 40 2 粒子相関分布の反応平面及び q2 依存性

位角異方性を測定し、AGS で取得された $\sqrt{s_{NN}}$ =4.9 GeV の結果と比較された。 粒子識別された荷電粒子ごとに 1 次の方位角異方性の傾きが測定された。 $\pi \ge K_s^0$ については BES の 結果を支持するものとなり、proton の結果については AGS の proton と A の結果を支持するものと なり以前の結果を一通り再現する結果となった (図 43)。同様に 2 次の異方性の p_T 依存性についても AGS の結果を再現するものとなった (図 44)。

(7) 飛行時間測定器 MRPC に対する構造による時間分解能の改善

J-PARC 重イオン衝突実験では、飛行時間測定器として MRPC が採用される予定である。広い検出面 積を持ち、かつ高い時間分解能を有する大型 MRPC の開発が求められている。[7]

基本構造の MRPC には、信号誘起パッド部分での信号の反射による波形劣化や、雑音による信号劣化 などの課題を抱えていた。そこで、金属導体の構造中への導入、信号誘起パッドの形状変更を施すこと によって、高周波信号の伝送特性や、耐雑音特性の改善を目指した。

20 cm × 30 cm の検出面積を持つ、金属導体を導入した大型 MRPC を設計・制作し、宇宙線の TOF の 測定実験を行った結果、信号を観測することに成功した。更に観測されたデータから TOF を解析した 結果、213.9 ± 6.6 ps の時間分解能を得た。

また新設計の信号誘起パッドのSパラメータ解析を行った結果、インピーダンス分布について顕著な改善が見られ、信号の伝送線路上での反射量の減少に成功したことが期待される。この信号誘起パッドを用いた MRPC を制作し、TOF 検出器としての性能を確認することが求められる。



図 41 toy model simulation において unfolding を適用し、再構成された分布 [4]



図 42 net-proton の C_6/C_2 における unfolding と efficiency 補正の比較 [4]

(8) <u>LHC-ALICE 実験 Si-W 型電磁カロリメータ実証機に向けた APV25 搭載 front-end 読み出しシステム</u>の評価

QGP の性質の解明を目的として、スイス・ジュネーブにある欧州原子核機構 (CERN) では LHC 加速 器を用いて ALICE 実験が行れている。この実験の改良を目的として、新たな検出器である FoCal を作 る FoCal project がある。FoCal のは超前方方向に設置され、目的は重イオンの衝突後ビーム軸の前方 方向に生成される高い運動量を持った光子・ハドロン・ジェットの測定である。この測定により QGP の生成の初期条件の解明が期待されている。この project は 4 年前に始動し、過去様々な試作機を作っ ては CERN でのテストを行ってきた。2017 年度は過去の結果をもとにノイズを減らす新たな読み出し 方法を搭載した試作機を作り、東北大学電子光学研究センターの加速器施設でテストを行った。その結 果として、ノイズを減らし MIP(最小電離損失粒子) の観測に成功した。図 46 電磁シャワーを起こし読



図 43 1次の方位角異方性の傾きのエネルギー依存性 [6]

図 44 2次の方位角異方性の pr 依存性 [6]



図 45 金属導体を導入した大型 MRPC によって測定された TOF の分布

み出した信号は Geant4 でのシミュレーションと比較しても良い一致が見られた。今後は今回の結果を 踏まえて、2018 年度に CERN で行われるテストに向けて新たな試作機を作っていく。

(9) 稀少 RI リング

稀少 RI リング (R3) は、約 10 年間の開発研究の末、2015 年 3 月に完成した。2017 年度は 4 回目の コミッショニング実験を行った。2017 年度は、入射ラインの一部として利用している SHARAQ 上流 に OEDO が導入され、入射ラインの磁石の配置が一部変更されたとともに、ビーム光学が変更され た。一方、これまでのコミッショニング実験では、R3 への入射効率が、設計値より 1 桁以上小さい(約 0.14%) ことが問題であった。今回の入射ラインの変更に伴い、R3 へのビーム光学計算を再検討し、入 射効率の改善を図った。実験セットアップおよび RI ビームを発生する BigRIPS の設定等は、2016 年 度に行なった第 3 回コミッショニング実験とほぼ同じである。238U の一次ビームから核分裂破砕片と して、78Ge 周辺の不安定核を生成した。生成直後に、エネルギー吸収板により、不安定核を約 180 A MeV まで減速させた。新しいビーム光学により、78Ge の入射効率を測定したところ、入射効率は、約


図 46 GEANT4 によるシミュレーションと実際の測定されたデータの比較

1.9% となり、以前より1桁以上改善されたとともに、ほぼ設計値の入射効率を得ることができた。今後は、この新しいビーム光学により質量測定を行う予定である。2017年10月には、重元素合成過程解明に関連して、R3による Sn の領域の質量測定のプロポーザルを理研 RI ビームファクトリーに提出した。プロポーザルは、12月の PAC で審査され、採択された。2018年度の秋以降に質量測定実験を行う予定である。

(10) 偏極陽子ビームによる不安定核の生成

我々は、不安定核の核モーメント測定を目標として、偏極陽子ビームによる核偏極した不安定核の生 成を試みている。2017 年度は、2016 年 3 月から供用が開始された 6MV タンデム加速器で実験を行 なった。不安定核の核モーメント測定は、不安定核からのベータ線の非対称放出を利用した核磁気共 鳴法 (ベータ NMR) により行う。我々は、6MV タンデムの A6 コースに、ベータ NMR の実験装置 (静磁場、高周波磁場、ベータ線検出器などから構成)を設置し、実験を行なった。まずは、我々のベー タ NMR 装置のシステムチェックとして、先行研究において、核偏極生成が確認されている偏極陽子 12MeV と Si 標的の系で実験を始めた。この系では、(p,n)反応、(p, α)反応により、それぞれ不安定 核 29P (T_{1/2}=4.2s) と 25Al (T_{1/2}=7.2s) が生成される。これらの不安定核の核磁気モーメントは既 知である。6MV タンデム加速器により 12 MeV に加速された偏極陽子ビームを、A6 コースのベータ NMR の実験装置内に設置した厚さ 0.5mm の Si 標的に照射した。偏極陽子ビーム(偏極度、約 70%、 ビーム強度、約 20 nA)を 10 秒間照射後、 β 線の時間スペクトルを観測し、29P、25Al および 30P (T_{1/2}=150s)の生成を確認した。生成した不安定核の核偏極量は、標的の上下に置いたベータ線検出器 の非対称度から推定できる。今回の測定結果は、約 0.7% の非対称度を示した。この非対称度は、先行 研究の結果と同程度である。先行研究と同程度の核偏極生成が確認できたので、今後は、29P および 25Al に対して核磁気共鳴を行い、我々のベータ NMR 実験装置のシステムチェックを進める。

(11) KISS の研究・開発状況

KEK Isotope Separation System (KISS) では、r-過程の解明に重要な中性子数 N = 126 近傍の原

子核の性質を多角的に調べるため、ガスジェット内レーザー共鳴イオン化核分光装置(超微細構造測定)、低バックグラウンドかつ高効率なβ-γ核分光測定系、多重反射型飛行時間測定式質量分析器(MR-TOF-MS)(精密質量測定)の開発を行っている。

【中性子過剰 Os 同位体の $\beta - \gamma$ 核分光】 2017 年度には、198 Pt 回転標的と 136 Xe ビームを用いて 195 - 198 Os (Z = 76, N = 119 - 122)を生成し、レーザー共鳴イオン化により元素選択的にイオン 源から引き出した後、新たに開発した低バックグラウンド複数分割型比例係数ガス検出器(MSPGC) と高立体角なクローバー型 y 線検出器(SCGe)で構成される検出器系で精密な $\beta - \gamma$ 核分光を行った。 これにより、198 Os の β 崩壊半減期 125(28) s を初めて測定することに成功した。また、多重度を考 慮した MSPGC のイベントと同時測定した、 γ 線のエネルギースペクトル及び崩壊寿命測定から 195 Os の長寿命な準安定状態を発見した。基底状態からの β 崩壊遅延 γ 線も含めた、より詳細な解析が進 行中である。

【β線検出器の改良】 希少核種のより精密なβ崩壊核分光のために、MSPGCの3次元位置読み出し 化の開発を行っている。比例係数管の陽極線をBeCu線から高抵抗な炭素線に変更し、両端から読みだ される電荷量の解析から3mmの位置分解能が得られた。オンライン実験に向けて本番機での性能試 験が進行中である。

【ガスジェット内レーザー共鳴イオン化核分光】 原子核の電磁モーメントの精密測定に向けて、ガス ジェット内レーザー共鳴イオン化核分光系を開発中である。速度の均一なガスジェット生成のためのラ バルノズル、コリニアレーザー分光のために必要なイオン輸送装置である S型 RFQ、高分解能なレー ザー分光のための狭線幅ダイオードレーザー等を導入した。2018 年度より、本格的な性能試験を行う 予定である。

【質量測定系の開発】 KISS から引き出した希少核種の精密質量測定のために MR-TOF を導入して いる。2017 年度には、β – y 核分光と両立するための二次ビームスイッチング偏向電極と、MR-TOF 入射のための二次ビーム再熱化用 He ガスセルを導入した。今後、MR-TOF へのイオンの導入に必要 なイオントラップとバンチャー系を設置する予定である。

(12) 5480 BC 宇宙線イベントの原因究明に向けた長寿命放射性核種 36Cl の AMS 試験測定

5480BC 周辺で、宇宙線フラックスの増加が単年年輪中の 14C(半減期 $T_{1/2} = 5,730$ yr)測定によっ て観測された。しかしその原因については大規模な太陽プロトン爆発現象の可能性が指摘されている が、詳細は不明である。同じ宇宙線生成核種である 36Cl は、銀河宇宙線や太陽宇宙線などと地球大気 の構成成分との相互作用により生成される放射性核種であり、大気中の生成過程や輸送過程が 14C とは 異なる。36Cl 生成率は地球に入射する宇宙線の強度に依存して変化するため、海底堆積物やアイスコ アに蓄積した 36Cl フラックスの変動から過去の宇宙線強度の変動を復元することができる。そこで南 極ドームふじで掘削されたアイスコア中の 36Cl について加速器質量分析(AMS)による測定を行い、 5480 BC 周辺の宇宙線フラックスの変動について調査した。36Cl の AMS 測定では同重体の 36S が重 大な妨害核種になる。そこで、同重体の 36S を抑制するために AgBr を用いたバッキングを行った。ま たこの AgBr について、36S の混入が少ない作製方法を検討し、市販試薬の AgBr と比較を行った。そ の結果、36S の混入量が少ない AgBr を得ることに成功し、検出限界は 36Cl/Cl ~ 3 × 10⁻¹⁵ を達成 することができた。この AgBr をバッキング材として用いて南極ドームふじアイスコア中の 36Cl につ いて AMS 試験測定を行い、宇宙線フラックスの変動について調査した。図 47 に南極ドームふじアイ スコア中の 5480BC 付近の 36Cl 濃度変動の測定結果を示す。5480BC 付近に 36Cl 濃度の増大ピーク が認められるが、今回測定を行ったサンプルでは時間分解能が不十分であった。今後は、より高時間分 解能を持つサンプルを用いた測定を検討する予定である



図 47 南極ドームふじアイスコア中の 5480BC 付近の 36Cl 濃度の測定結果

- (13) 構造材料計測用マイクロビーム分析装置による元素イメージング測定
 - 筑波大学 6 MV タンデム加速器 A3 コースに構造材料計測用マイクロビーム分析装置を設計開発した。 収束イオンビームスキャン照射の特長を生かせる透過型反跳粒子検出分析法(Elastic Recoil Detection Analysis: ERDA)を実施して、構造材料中の水素についてマイクロメートルオーダーの位置分解能を 有するイメージングを実現した。また、PIXE 測定と両立させることにより、水素を含む多元素同時イ メージングを実用化した。図 48(左)は、透過 ERDA-PIXE 同時測定の配置図である。水素を含んだ 材料を模擬したものとして、電子顕微鏡調整用銅メッシュ、有機膜、アルミニウムの3層構造を持った 試料(全体厚さ約 90 μ m)を作成した。銅メッシュ側からヘリウムビームをスキャン照射し、反跳水 素(透過 ERDA)と銅の特性 X 線(PIXE)を観測した。測定結果の例を図 48(右)に示す。照射領 域は 250 μ m × 250 μ m で、図左は透過 ERDA による水素分布図である。ヘリウムビームが銅メッ シュに照射された位置には有機膜中の水素は反跳放出されず、直接有機膜に照射された位置でのみ反跳 水素が検出されているのがわかる。図右には、PIXE による銅メッシュ(太さ 12 μ m)の像が見られ る。本計測手法により、試料中の水素分布をマイクロメートルオーダーの精度でイメージング化するこ とが可能になった。また、他の元素分布も同時に取得することで、水素と他元素の分布の関連性につい ても情報を得られる。その他、非破壊分析という特長を生かして電子顕微鏡画像などの手法による情報 とリンクさせることで、亀裂や結晶粒界など試料中の微細構造との関係についても情報を得ることが可 能となった。
- (14) 加速器質量分析法によるストロンチウム 90 の迅速定量法の開発

筑波大学 6 MV タンデム加速器質量分析装置を用いてストロンチウム 90 (90Sr: 半減期 28.79 年)の 迅速定量法の開発を進めている。90Sr は、ウランやプルトニウムなどの核分裂生成物であり、原子力 発電所での事故や 1950 年代に実施された大気圏内核実験により、環境中に供給された放射性核種であ る。しかし、純β線放出核種である 90Sr の分析には複雑な化学操作と時間が掛かるため、迅速な定量 手法の開発が求められている。本研究では、90Sr を加速することで、物質(検出器内のガス)でのエ ネルギー損失差を利用して妨害となる同重体(同重分子や 90Zr など)を分離識別して、直接的に検



図 48 (左図)透過 ERDA-PIXE 同時測定配置図、(右図)透過 ERDA-PIXE 同時測定の例(左:水素、右:銅)

出する手法を開発した。Sr は電子親和力が低いために負イオンを形成し難い。そのため、フッ化スト ロンチウム (SrF2) から、負分子イオン SrF3 –を引き出した。なお、Cs+ ビームのスパッタリング によるチャージアップを防ぐために、導電性の PbF2 粉末を重量比 SrF2 : PbF2 = 1 : 4 で混合し た。88SrF3 – のビーム電流として、最大で約 400 nA を得ている。相対比較検定のための標準試料は、 IAEA の Proficiency Test 試料を希釈したものを用いた。90Sr の AMS 測定では、加速電圧 6 MV に より 90Sr8+ を 51.8 MeV まで加速した。測定系では、5 枚電極型 Δ E-E ガス電離箱についてガス圧 力等の最適測定条件を調べて、同重体の 90Zr との分離識別を試みた。標準試料 (90Sr/Sr = 3.38 × 10^{-9}) とブランク試料についての 2 次元スペクトルの測定図 49 (左) を示す。本研究成果として、国 内初となる 90Sr の AMS による直接検出に成功した。図 49 (右) に 90Sr-AMS における検量線の結果 を示す。90S の検出限界として、90Sr/Sr ~ 6 × 10^{-13} (~ 3 mBq) を達成している。30 分程度の計 測時間で、測定精度 ~ 3% (90Sr/Sr ~ 10^{-10}) を得た。AMS による 90Sr の測定性能として世界最高 感度であり、従来の β 線計測による 90Sr 定量方法と同等の検出限界を得ることができた。



図 49 (左図)標準試料 (90 Sr/Sr = 3.38 × 10⁻⁹) とブランク試料の 2 次元スペクトル図、(右図) 標準 試料を用いた 90 Sr 検量線の結果。横軸は既知の値で縦軸が測定値となる。

(15) 宇宙線生成核種 36Cl 降下フラックスの変動評価

36Cl(半減期 30.1 万年)は大気中で宇宙線とArとの核反応(40Ar(p, X)36Cl など)によって生成され,地表へ降下する。このような核種は宇宙線生成核種と呼ばれており,その生成率は宇宙線強度変動

に依存する。地球へ降り注ぐ宇宙線量は、主に太陽活動と地磁気の強度に依存することが知られてい る。よって、宇宙線生成核種の降下フラックスを測定することで、宇宙線強度変動の復元が期待されて いる。本研究では、降水中に含まれる 36Cl について注目し太陽黒点数との比較をおこなった。降水中 の 36Cl を分析するにあたり、筑波大学構内で 2010 年 1 月から 2014 年 9 月まで一ヶ月ごとに降水を 採取した。そして、筑波大学 AMS システムを用いて降水中 36Cl 同位体比(36Cl/Cl)を測定し、結 果から 36Cl 降下フラックスを計算した。図 50 は測定から得られた一ヶ月ごとの 36Cl 降下フラックス を一年ごとに平均した結果(2004 年から 2009 年のデータは Y. Tosaki et al., 2012 による)と、太陽 黒点数との比較を示している。ただし、2011 年は 3 月に発生した福島第一原子力発電所事故によって 放出された 36Cl の影響が大きい。2011 年および 1 月から 9 月までのみデータを取得した 2014 年を除 いて、36Cl 降下フラックスと太陽黒点数との相関係数を計算すると相関係数 r = -0.4 となった。なお、 計算の際には 36Cl が大気中で生成されてから地表へ降下するまで 2 年かかると仮定している。以上の 結果より、36Cl 降下フラックスと太陽黒点数は逆相関することが本研究において確認された。



図 50 36Cl 降下フラックスと太陽黒点数との比較

(16) Lamb シフト型偏極イオン源の偏極陽子ビームの偏極度測定

筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門の Lamb シフト型偏極イオン源(PIS)は、東日本大震 災による大きな被害を受けたが、2014 年度末までに再構築を終え、その後、偏極ビームの生成を確認 している。 2017 年度は、主に、6MV タンデム加速器によって加速させた偏極陽子ビームの偏極度測 定を行った。

本測定では、PIS からの偏極陽子を 12 MeV まで加速させ、測定室の A6 コースへと輸送させた。コースの末端には、⁴He との弾性散乱を利用したポラリメータを設置した。ポラリメータの内部は ⁴He ガス (約1気圧) で満たされており、左右には弾性散乱をした陽子を検出するためのシリコン半導体検出器が装填されている。偏極度 P は、 $A \cdot P = \frac{N_L - N_R}{N_L + N_R}$ によって表すことできる。A は偏極分解能で、12 MeV の陽子と ⁴He との弾性散乱の場合、A = 1 と近似できる。 N_L と N_R は、それぞれポラリメータの左側と右側のシリコン半導体検出器で検出された弾性散乱陽子のイベント数である。図 51 は、左右のシリコン半導体検出器によって得られたエネルギースペクトルである。図 51 中のメインピークは弾

性散乱イベントであり、スピンが上向き(下向き)の場合、左側(右側)の方が他方に比べてイベント 数が多いのがわかる。この結果から、ビームコース末端における偏極陽子ビームの偏極度は約44%(ス ピン上向き)と37%(スピン下向き)だった。これらの偏極度は、PIS下流における偏極度(約80%) に比べると低い。この減偏極の原因としては、ビームライン中の残留ガスの影響が考えられるが、原因 は調査中である。



図 51 ポラリメータの左側 (赤線) と右側 (青線) のシリコン半導体検出器によって得られたエネルギース ペクトル。(a) と (b) は、それぞれスピンが上向きと下向きの偏極陽子ビームを用いた場合の結果である。

(17) 固体水素標的を用いた不安定核のスキン厚導出手法の開発

不安定核にはスキン構造と呼ばれる安定核に見られない現象がある。スキンとは不安定核の表面に現れ る過剰の中性子もしくは陽子の層を指す。不安定核におけるスキン厚の実験値は、これまで、オプティ カルアイソトープシフト(OIS)の測定と反応断面積の測定から導出してきた。ところが、OISの測定 は実験的な制限により測定可能な同位体が限られており、不安定核のスキン厚の実験データは乏しいの が現状である。本研究は、反応断面積測定だけから不安定核の陽子密度分布と中性子密度分布を別々に 求め、それらからスキン厚を導出することを目的としている。

実験は、放射線医学総合研究所のシンクロトロン施設 HIMAC で進めている。前年度はテスト実験を実施し、測定システムに問題ないことを確認した。2017 年度は、固体水素標的を用いて ¹⁷Ne と ¹⁷F の反応断面積測定を実施した。¹⁷Ne のスキン厚は実験的に報告されており、本研究の結果と比較が可能である。一方、¹⁷F のスキン厚の実験値はこれまでに報告されていない。一次ビームとして 180 MeV/u、もしくは、400 MeV/u の ²⁰Ne を Be 標的に照射し、¹⁷Ne と ¹⁷F の二次ビームを生成した。実験では、ビームエネルギーによって ϕ 50 × 30 mm³ と ϕ 50 × 100 mm³ の固体水素標的を使い分けた。プラスチックシンチレータやイオンチェンバー等の検出器を用いて、固体水素標的の上流と下流の粒子識別を行い、入射粒子数と出射粒子数の比から反応断面積を求めた。図 52 は、本研究で得た ¹⁷Ne と ¹⁷F の反応断面積のエネルギー依存性である。¹⁷Ne に関しては、スキン厚導出にとって重要とされる 100 MeV/u 以下のデータを中心に取得した。また、¹⁷F に関しては、100 MeV/u 以下のデータは今後取得する予定である。現在、これらの実験データと Glauber モデルを用いた解析を進めており、スキン厚の導出を試みている。

(18) 稀少 RI リングでの精密質量測定に用いる飛行時間検出器の開発 稀少 RI リングを用いた質量測定では、飛行時間の測定から粒子の速度とリング内周期をそれぞれ決定 して質量を求める。飛行時間検出器に求められる性能は、(1) 100 ps 以下の時間分解能、(2) 検出器内で の速度変化が 10^{-4} 以下であること、(3) 100% の検出効率、(4) $\phi 30 \text{ mm}$ 以上のアクセプタンスを有す ることである。これらの要請を満足する飛行時間検出器の開発を行なっている。開発中の検出器は、荷 電粒子が薄膜を通過した時に等方的に放出される二次電子を、静電磁場を用いてマイクロチャンネルプ レート (MCP) へと誘導し、荷電粒子の通過を検出する仕組みとなっている (図 53)。この検出器は、 電磁場による二次電子の等時性輸送と薄膜を用いるため、上述の要求を満たすことが原理的に可能であ る。重イオンの薄膜通過においては十分な量の二次電子が生成されるため、理想的な検出効率も見込 める。

昨年度は、 ϕ 45 mm の薄膜と ϕ 42 mm の MCP を備えることによりビームに対する有効領域をの拡大を 図った。重イオンビームを用いた性能試験では、時間分解能は $\sigma \sim 60 \text{ ps}$ であり、検出効率は最大 99 % を得ることができた。

今年度は、ビームに軸に対して検出器の前後に位置する正電極の薄膜を無くすことによって検出器内での速度変化をさらに抑えた。これにより、速度変化を 2×10^{-5} にすることができる。放射線医学総合研究所の HIMAC(Heavy Ion Accelerator in Chiba) から供給される ⁸⁴Kr ビームを用いた性能評価実験では、時間分解能は $\sigma = 53(2)$ ps であり、検出効率は最大 98(7)% を得た。しかしながら正電極の薄膜を薄膜を無くしたことによる電場の歪みは無視できず、二次電子の輸送時間には 150 ps 程度の位置依存性があり、満足できる性能ではなかった。

今後は、電極の形状を変化させることにより、二次電子の輸送時間を荷電粒子の通過位置に依らないよ う改善し、質量測定に使用できるよう完成を目指す。

(19) 新しい準非破壊的な位置検出器の開発

稀少 RI リングを用いた質量測定実験では、飛行時間検出器の他に、粒子の磁気剛性率を測定するため の位置検出器も必要である。位置検出器は、粒子の通過位置が運動量分散に依存する Dispersive な焦 点面に置かれる。これまでの稀少 RI リングのコミッショニング実験では、RIBF で一般的に利用され ている PPAC [Kumagai ら NIM2013] を用いてきた。PPAC はガス放電を検出原理とし、数 10 Torr のガスとガスを封じ込めるマイラー膜から構成されている低物質量の位置検出器である。しかし、それ でも粒子の速度変化は約 1 × 10⁻³ と無視できず、粒子の速度から決定される質量精度に制限を与える。 そこで本研究では、PPAC に置き換わる速度変化を無視できる薄膜を利用した位置検出器の開発を進



図 52 固体水素標的を用いた¹⁷Ne と¹⁷Fの反応断面積。



図 53 飛行時間検出器の模式図。負電極中央に取り付けられた薄膜から発生した二次電子を検出する。

めている。この位置検出器は、薄膜を用いた飛行時間検出器の原理を応用した全く新しいオリジナルの 位置検出原理を持つ。どちらの検出器も、荷電粒子が薄膜を通過する際に放出される二次電子を電場と 磁場を用いてマイクロチャンネルプレート (MCP) に導く。飛行時間検出器では、二次電子を 180 度偏 向するため、荷電粒子の通過位置によらず二次電子の輸送時間はほぼ一定である。一方、位置検出器で は、 MCP の位置を薄膜に対して 90 度に設置することにより、二次電子の輸送時間に位置依存性を持 たせている。そして、薄膜の前方及び後方に放出される二次電子の輸送時間の差から荷電粒子の薄膜通 過位置を測定する (図 54)。

原理検証のため、 ϕ 45 mm の薄膜と ϕ 15 mm の MCP 検出器を備えた小型試作機を作成した。薄膜に は 1 μ m のマイラーの両面に約 100 nm のアルミニウムをコーティングしたものを使用し、PPAC と比 べて約 $\frac{1}{45}$ の厚さに抑えられている。磁場と電場はそれぞれ、約 90 Gauss と約 230 V/mm である。重 イオンビームを用いた検証実験では、±20 mm の範囲で、約 2.5 ns の時間差を観測した(図 55)。こ れにより、前方と後方に輸送される二次電子の時間差から位置を測定できることを実証した。検出効率 は約 99%、位置分解能は 2 mm 以下と性能も良好であった。今後は、質量測定実験で使用する有効領 域を拡大した大型実機の作成を行う。





図 54 新しい位置検出器の模式図。前方・後方の二次電子の輸送時間は荷電粒子の水平入射位置に依存する。

図 55 荷電粒子の入射位置と前方・後方 の二次電子の輸送時間差の相関を表す2次 元ヒストグラム。

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

金谷、谷口らは、新潟大学江尻信司准教授、広島大学梅田貴士准教授、九州大学鈴木博教授、大阪大学 北沢正清助教らとの共同研究で、有限温度・有限密度 QCD 相構造とクォーク物質の熱力学的諸性質 を、改良ウイルソン型格子クォークを用いた格子 QCD シミュレーションにより研究し、エネルギー運 動量テンソルから、圧力、エネルギー密度、エントロピー密度などの熱力学量を評価し、カイラル凝集 や位相感受率から、カイラル相転移やアクシオン質量の評価を行った。

格子上ではエネルギー運動量テンソルを並進対称性に伴う保存カレントとして定義できない。これに起 因して、格子 QCD によるエネルギー運動量テンソルの評価には、5種類の演算子の非自明な繰り込み と混合を非摂動論的に求めなければならないという理論的・数値的な困難が存在している。本研究は、 この非摂動論的なくりこみの問題に関して、勾配流 (グラジエントフロー)を用いて根本的な解決を図 る点に特徴がある。Lüscher らにより提案された勾配流は格子上の物理量計算に様々な革新をもたらし ているが、特に、共同研究者である鈴木らにより、これまで格子での計算や定義に大きな困難が伴って いた様々な物理量の非摂動論的評価に新しい方法が提案された。この方法は、ウイルソン型クォーク作 用で大きな困難となっていたカイラル凝集や位相感受率などの評価にも有効である。我々は鈴木らの方 法を動的クォークを含む full QCD シミュレーションに世界で初めて適用して、クォーク物質の熱力学 特性を研究している。

2017 年度は、2016 年度に開始したクォークが重い場合の $N_F = 2 + 1$ QCD で最初の研究を完成させ、 エネルギー運動量テンソルの一点関数やカイラル凝集、位相感受率に関して非常に良い結果を得た。こ の成果を受けて、次の段階の研究にむけて、 $N_F = 2 + 1$ QCD の物理点における研究を開始し、同時 に、エネルギー運動量テンソルの2 点関数から輸送係数などを引き出す研究も開始した。また、これま でに開発してきた多重点再重み付け法やヒストグラム法とグラジエントフロー法を組み合わせ、QCD のグルオン部分である SU(3) ゲージ理論における潜熱などの研究を進めた。

Gradient flow を用いた有限温度 (2+1)-flavor QCD の研究(1): クォークが重い場合

第一段階の研究として、2016 年に、s クォーク質量は現実の値に近いが u,d クォークは現実より重く $(m_{\pi}/m_{\rho} \simeq 0.63)$ 、格子間隔が $a \simeq 0.07 \text{fm}$ 1 つだけの場合について、固定格子間隔法による計算を開始した。2017 年度は、系統誤差評価などの一連の解析を行って、論文にまとめた。

我々の研究により、状態方程式の評価が動的クォークを含む場合でも精度良く遂行可能であることが 示された。図 56 に状態方程式の最終結果を示す。赤丸がグラジエントフロー法による評価の結果で、 黒三角は、同じ配位上で通常の T-積分法を用いて評価した先行研究の結果である。通常の方法では、 ベータ関数の非摂動的評価結果と格子上の測定結果を組み合わせてトレースアノマリ e - 3p を評価 し、それと、低温相からシミュレーション点まで測定結果を数値積分して計算する圧力 p を組み合わせ て、e + p などを計算する。グラジエントフロー法では、各におけるシミュレーション点エネルギー運 動量テンソルを直接評価して、状態方程式を計算する。T < 300 MeV ($N_t > 8, N_t$ は温度軸方向の格 子点の数) でこれらの全く違う方法の結果がよく一致することが示された。これは、この試験研究の格 子間隔 a が連続極限に十分近いことを示唆している。他方、T > 300 MeVで両者が一致しなくなるの は、 $O((aT)^2 = N_t^{-2})$ のaに依らない格子化誤差が $N_t < 8$ では無視できなくなるからと考えられる。 (論文 1)

さらに、同じ有限温度配位を用いて、グラジエントフロー法を用いたカイラル凝集と位相感受率の評価 も行った。格子 QCD ではこれらの物理量に複雑なくりこみが要求されるが、グラジエントフローに基



図 56 グラジエントフロー法による有限温度 (2+1)-flavor QCD の状態方程式の研究。クォークが重い場合の結果。 左図:エントロピー密度 $\epsilon + p$ 。右図:トレース・アノマリ $\epsilon - 3p$ 。赤丸がグラジエントフロー法による評価の結果で、 黒三角は、同じ配位上で T-積分法を用いて評価した先行研究の結果。横軸は温度 T。(論文 1)

づく鈴木法を用いればくりこまれた量を直接評価可能となり、計算コストを大きく抑えられる可能性 がある。図 58 の左図にカイラル感受率の結果を示す。我々は、カイラル感受率がクロスオーバー温度 *T*~190MeV でピークを示すことを示した。また、s クォークよりも、軽い u,d クォークのカイラル感 受率の方がより強い特異性を示しており、これも理論的期待と一体する。格子上でカイラル対称性を陽 に壊してしまうウイルソン型クォークでこれらが示されたのは初めてである。(論文 1)



図 57 グラジエントフロー法による (2+1)-flavor QCD の熱力学特性の研究。クォークが重い場合の結果。左図:カ イラル凝集。右図:カイラル感受率。赤丸は u,d クォーク、黒三角は s クォークのカイラル凝集/感受率。(論文 1)

Gradient flow を用いた有限温度 (2+1)-flavor QCD の研究 (2):現実のクォーク質量の場合 グラジエントフロー法による状態方程式の評価は、従来の方法で必要であった、非摂動的ベータ関数の 評価などが不要で、全体的計算コストを大きく抑えられる可能性がある。この結果は、計算コストの高 い物理点での評価を推進する上で、グラジエントフロー法が大きな役割を担いうることを示唆してい る。クォークが重い場合にグラジエントフロー法が有効であるという前述の結果を受け、次の段階とし て、現実のクォーク質量での研究と格子間隔を変えたシミュレーションを開始し試験研究を行った。 PACS-CS Collaboration が生成した、改良ウイルソンクォークを用いた、格子間隔 $a \simeq 0.09$ fm の $32^3 \times 64$ 格子のゼロ温度配位を利用し、固定格子間隔法で $T \approx 160-550$ MeV ($N_t = 14, 13, \dots, 4$)の 温度を研究した。クォークが重い場合は $T \approx 190$ MeV が臨界温度であったが、クォークが軽いのでよ り低温側にシフトすると予想される。しかし、この格子作用の場合の臨界温度はわかっていない。 まだ統計が十分ではないが、エネルギー運動量テンソルの1点関数やカイラル凝集について、クォーク が重い場合とほぼ同様に有意な計算が可能であるという中間結果を得た。ただし、格子化誤差が大きい 傾向があり、高統計と精密な系統誤差評価が必要である。クォーク質量が小さい効果に加え、格子間隔 がやや粗いことが影響しているものと思われる。

状態方程式の中間結果を図 58 に示す。クォークが重い場合の経験から、T > 247 MeV ($N_t \leq 8$) では 格子化誤差が大きいと予想される。クォークが重い場合と違って、同じ配位を用いた通常の方法による 状態方程式の結果は無いが、改良スタガード型クォークを用いた連続極限の結果と比較すると、エント ロピー密度はほぼ同じ値だが、トレース・アノマリは数倍大きくなっている。ただし、我々の結果はま だ連続極限が取られていないので、直接の比較はできない。



図 58 グラジェントフロー法による有限温度 (2+1)-flavor QCD の状態方程式の研究。現実のクォーク質量の結果。 左図:エントロピー密度 $\epsilon + p$ 。右図:トレース・アノマリ $\epsilon - 3p$ 。横軸は温度 T。(論文 2)

カイラル凝集についての中間結果を図 59 に示す。左図は u, d クォークのカイラル凝集、右図は s クォークのカイラル凝集である。図 59 の左図に示したクォークが重い場合には、クォーク質量に対す る依存性は小さかったが、u, d クォークの質量が下がると、軽いクォークのカイラル凝集の温度依存性 が大きく変わることが見られる。s クォークのカイラル凝集から、T ~ 130-150 MeV を臨界温度と考 えると、そこで軽いクォークのカイラル凝集はかなり急激に変化すると思われる。これまでシミュレー ションした範囲では低温側のデータが無いので明確な結論は難しいが、クォークが軽くなればなるほど カイラル相転移が際立つだろうという理論的期待と矛盾しない。また、ここで示唆される低い臨界温度 は、改良スタガード型クォークを用いた連続極限の結果 T ~ 150 MeV とも一致している。(論文 2) 現在、より低い温度を含む配位生成と解析を進めている。

Gradient flow を用いた輸送係数などの研究

グラジエントフローに基づく鈴木らの方法では、エネルギー運動量テンソルそのものを直接評価するこ とができるので、その相関関数から、輸送係数など、状態方程式以外の様々な熱力学量も評価可能にな る。そこで、研究の別の展開方向として、クォークが重い $N_F = 2 + 1$ QCD の場合に、エネルギー運 動量テンソルの2 点関数の計算を開始した。

2 点関数では格子化誤差が1 点関数より大きくなる傾向があり、現在の統計では明確な結論は難しい が、クエンチ近似 QCD の場合に FlowQCD Collaboration が行った先行研究と同様に、有望な結果を いくつか得た (図 60)。現在、統計の改善とともに、解析方法の改良を試みている。(論文 3)



図 59 グラジエントフロー法による有限温度 (2+1)-flavor QCD の状態方程式の研究。現実のクォーク質量の結果。 左図:u,d クォークのカイラル凝集。右図:s クォークのカイラル凝集。横軸は温度 T。(論文 2)



図 60 グラジエントフロー法による有限温度 (2+1)-flavor QCD のエントロピー密度の研究。クォークが重い場合の 結果。黒丸はエネルギー運動量テンソルの一点関数から求めた結果(論文 1)。赤丸と青三角は異なる二点関数から線形 応答関係式を用いて引き出したエントロピー密度。横軸はフロー時間 t。格子間隔依存性が取り除かれるフロー時間の 極限 $t \rightarrow 0$ で、三つの結果が期待どおり一致することが見て取れる。(論文 3)

我々の結果はまだ格子間隔1点で計算されただけであり、今後異なる格子間隔で同様の計算を行い、連 続極限を取る必要がある。物理点での研究と並行して、格子間隔の違う点での研究も推進している。 また、フル QCD の研究と並行して、グラジエントフロー法を用いた SU(3) ゲージ理論の潜熱の研究 も行い、中間結果を国際会議 Lattice 2017 等で報告した。

(21) Gradient flow を用いた Kaon B パラメーターの計算

Kaon Bパラメーター B_K は K 中間子の $K^0 - \bar{K}^0$ 混合に対す QCD の寄与を抽出した量であり、QCD の非摂動論的な効果が主として聞いてくる量であるため格子上の数値計算による測定が必須となる量で ある。この B_K を Wilson fermion を用いて計算しようとすると、カイラル対称性の破れからくる余計 な演算子混合に邪魔されて精度の良い測定が困難となる事情があった。このカイラル対称性の破れから くる余計な演算子混合の問題に対する解決策として、gradient flow を用いる方法が有力視されている。 gradient flow は一種のくりこみ操作であり、あらゆる演算子に対して非常に簡単に実行することがで きる。gradient flow の優れた点として flow を課した演算子には紫外発散が現れないという点が挙げら れる。そのため格子上のいかなる対称性の破れにも悩まされることなく、連続極限を単純な操作として 取ることができるようになるのである。gradient flow を課した演算子は繰り込まれた演算子を含む有 限な量となっているのであるが、鈴木と谷口は研究の第一歩として gradient flow を課した 4 fermi 演 算子から、高エネルギー物理学で一般的に用いられる MS scheme で繰り込まれた演算子を取り出すた めの変換係数の計算を行なった。特に紫外発散が現れないという性質を調査する目的で、グルーオンに 質量を導入した処方を採用し、変換係数の計算を行っている。(国際会議口頭発表 1,2,3) (国内研究会口 頭発表 1,2)

参考文献

- 田中直斗, "Measurements of azimuthal angle dependence of HBT radii with respect to the event plane in √s_{NN} = 2.76 TeV Pb-Pb collisions at LHC-ALICE", 筑波大学大学院数理物質科学研究科博士論文 (2017)
- [2] J. Schukraft, A. Timmins and S. A.Voloshin, Phys. Lett. B 719 (2013) 394-398
- [3] STAR collaboration, Phys. Rev. Lett. 113, 092301(2014)
- [4] T. Nonaka, "First measurement of the sixth order cumulant of net-proton multiplicity distributions in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au+Au collisions at the STAR experiment", Ph.D Thesis at the University (2017)
- [5] NA49 Collaboration, Phys. Rev. C 77 (2008) 024903
- [6] Kathryn Meehan et al. (STAR Collaboration), Nucl. Phys. A 967 (2017) 808-811
- [7] H. Sako, T. Chujo, T. Gunji et al., "Towards the heavy-ion program at J-PARC", Nucl. Phys. A 931 (2014) 11581162

〈論文〉

- 1. Yusuke Taniguch, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, and Naoki Wakabayashi (WHOT-QCD Collaboration), Exploring $N_f = 2 + 1$ QCD thermodynamics from gradient flow, Phys. Rev. D 96, No.1 (2017) ref.014509, pp.1-28, DOI:10.1103/PhysRevD.96.014509
- Kazuyuki Kanaya, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi and Takash Umeda [WHOT-QCD Collaboration], Equation of state in (2 + 1)-flavor QCD at physical point with improved Wilson fermion action using gradient flow, EPJ Web of Conferences 175 (2018) ref.07023, pp.1-8, DOI:10.1051/epjconf/201817507023
- 3. Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, for the WHOT-QCD Collaboration, Energy-momentum tensor correlation function in $N_f = 2 + 1$ full QCD at finite temperature, EPJ Web of Conferences 175 (2018) ref.07013, pp.1-8, DOI:10.1051/epjconf/201817507013
- 4. Transverse spin-dependent azimuthal correlations of charged pion pairs measured in p \uparrow +p collisions at $\sqrt{s} = 500$ GeV, STAR collaboration, Phys. Lett. B 780 (2018) 332
- Beam-Energy Dependence of Directed Flow of Lambda, Anti-Lambda, K plus, K minus, K0 short and phi in Au+Au Collisions, STAR collaboration, Phys. Rev. Lett. 120 (2018) 62301
- 6. Azimuthal transverse single-spin asymmetries of inclusive jets and charged pions within jets from polarized-proton collisions at sqrt(s) = 500 GeV, STAR collaboration, Phys. Rev. D 97 (2018) 32004
- 7. Coherent diffractive photoproduction of ρ 0 mesons on gold nuclei at RHIC, STAR collaboration, Phys. Rev. C 96 (2017) 54904
- 8. Measurements of jet quenching with semi-inclusive hadron+jet distributions in Au+Au collisions at sqrt(sNN) = 200 GeV, STAR collaboration, Phys. Rev. C 96 (2017) 24905
- 9. Bulk Properties of the Medium Produced in Relativistic Heavy-Ion Collisions from the Beam Energy Scan Program, STAR collaboration, Phys. Rev. C 96 (2017) 44904
- Measurement of D0 azimuthal anisotropy at mid-rapidity in Au+Au collisions at sqrt(sNN) = 200 GeV, STAR collaboration, Phys. Rev. Lett. 118 (2017) 212301
- 11. Global Lambda hyperon polarization in nuclear collisions: evidence for the most vortical fluid, STAR collaboration,

Nature 548 (2017) 62

- 12. Measurement of the cross section and longitudinal double-spin asymmetry for di-jet production in polarized pp collisions at sqrt(s) = 200 GeV, STAR collaboration, Phys. Rev. D 95 (2017) 71103
- Di-Jet Imbalance Measurements at sqrt(sNN) = 200 GeV at STAR, STAR collaboration, Phys. Rev. Lett. 119 (2017) 62301
- Charge-dependent directed flow in Cu+Au collisions at sqrt(sNN) = 200 GeV, STAR collaboration, Phys. Rev. Lett. 118 (2017) 12301
- Energy dependence of J/psi production in Au+Au collisions at sqrt(sNN)= 39, 62.4 and 200 GeV, STAR collaboration, Phys. Lett. B 771 (2017) 13
- Direct virtual photon production in Au+Au collisions at sqrt(sNN)=200GeV, STAR collaboration, Phys. Lett. B 770 (2017) 451
- Measurements of two-pion Bose-Einstein correlations and their Levy parameters in 200 GeV Au+Au collisions, PHENIX collaboration, Phys. Rev. C 97 (2018) 064911
- 18. Measurement of identified particle azimuthal anisotropy in p+Au and 3He+Au collisions at $sqrts_{NN} = 200$ GeV, PHENIX collaboration, Phys. Rev. C 97 (2018) 064904
- Measurements of multiparticle correlations in d+Au collisions at 200, 62.4, 39, and 19.6 GeV and implications for collective behavior, PHENIX collaboration, Phys. Rev. Lett. 120 (2018) 062302
- 20. Nuclear dependence of the transverse-single-spin asymmetry for forward neutron production in polarized p+A collisions at $\sqrt{\text{sNN}=200 \text{ GeV}}$, PHENIX collaboration, Phys. Rev. Lett. 120 (2018) 022001
- 21. Measurements of azimuthal anisotropy in d+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200, 62.4, 39$, and 19.6 GeV, PHENIX collaboration, Phys. Rev. C 96 (2017) 064905
- 22. B-meson production at forward and backward rapidity in p+p and Cu+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, PHENIX collaboration, Phys. Rev. C 96 (2017) 064901
- 23. Measurements of e+e- pairs from open heavy flavor in p+p and d+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, PHENIX collaboration, Phys. Rev. C 96 (2017) 024907
- 24. Cross section and transverse single-spin asymmetry of single muons from open heavy flavor decays in polarized p+p collisions at sqrt(s)=200 GeV, PHENIX collaboration, Phys. Rev. D 95 (2017) 112001
- Angular Decay Coefficients of J/psi Mesons at Forward Rapidity from p+p Collisions at sqrt(s)=510GeV, PHENIX collaboration, Phys. Rev. D 95 (2017) 092003
- Measurements of B-meson decayed J/psi at forward rapidity in p+p collisions at sqrt(s)=510 GeV, PHENIX collaboration, Phys. Rev. D 95 (2017) 092002
- Nonperturbative Transverse Momentum Evolution Effects in Dihadron and Direct Photon Hadron Angular Correlations at sqrt(s)=510 GeV, PHENIX collaboration, Phys. Rev. D 95 (2017) 072002
- 28. Λ +c production in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV and in p-Pb collisions at $\sqrt{s}NN=5.02$ TeV, ALICE collaboration, JHEP 04 (2018) 108
- 29. First measurement of Ξ 0c production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV, ALICE collaboration, Phys. Lett. B 781 (2018) 8
- Measurement of Z0-boson production at large rapidities in Pb-Pb collisions at √ sNN=5.02 TeV, ALICE collaboration, Phys. Lett. B 780 (2018) 372
- 31. Longitudinal asymmetry and its effect on pseudorapidity distributions in Pb-Pb collisions at $\sqrt{\text{sNN}} = 2.76$ TeV, ALICE collaboration, Phys. Lett. B 781 (2018) 20
- 32. Production of 4He and 4He-bar in Pb-Pb collisions at $\sqrt{\text{sNN}} = 2.76$ TeV at the LHC, ALICE collaboration, Nucl. Phys. A 971 (2018) 1
- 33. Production of deuterons, tritons, 3He nuclei and their anti-nuclei in pp collisions at $\sqrt{s} = 0.9$, 2.76 and 7 TeV, ALICE collaboration, Phys. Rev. C 97 (2018) 024615
- 34. Search for collectivity with azimuthal J/ ψ -hadron correlations in high multiplicity p-Pb collisions at $\sqrt{\text{sNN}} = 5.02$ and 8.16 TeV, ALICE collaboration, Phys. Lett. B 780 (2018) 7
- 35. J/ ψ elliptic flow in Pb-Pb collisions at $\sqrt{\text{sNN}} = 5.02$ TeV, ALICE collaboration, Phys. Rev. Lett. 119 (2017) 242301
- 36. Constraining the magnitude of the Chiral Magnetic Effect with Event Shape Engineering in Pb-Pb collisions at $\sqrt{}$ sNN = 2.76 TeV, ALICE collaboration, Phys. Lett. B 777 (2018) 151
- The ALICE Transition Radiation Detector: construction, operation, and performance, ALICE collaboration, Nucl. Instr. Meth. A881 (2018) 88
- 38. Kaon femtoscopy in Pb-Pb collisions at $\sqrt{\text{sNN}} = 2.76$ TeV, ALICE collaboration, Phys. Rev. C96 (2017) 064613
- 39. Systematic studies of correlations between different order flow harmonics in Pb-Pb collisions at $\sqrt{\text{sNN}} = 2.76$ TeV, ALICE collaboration, Phys. Rev. C 97 (2018) 024906
- 40. π 0 and η meson production in proton-proton collisions at \sqrt{s} s=8 TeV, ALICE collaboration, Eur. Phys. J. C 78

(2018) 263

- 41. Charged-particle multiplicity distributions over a wide pseudorapidity range in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 0.9$, 7 and 8 TeV, ALICE collaboration, Eur. Phys. J. C 77 (2017) 852
- Measurement of deuteron spectra and elliptic flow in Pb-Pb collisions at √ sNN = 2.76 TeV at the LHC, ALICE collaboration, Eur. Phys. J. C 77 (2017) 658
- Searches for transverse momentum dependent flow vector fluctuations in Pb-Pb and p-Pb collisions at the LHC, ALICE collaboration, JHEP 09 (2017) 032
- 44. D-meson azimuthal anisotropy in mid-central Pb-Pb collisions at √ sNN=5.02 TeV, ALICE collaboration, Phys. Rev. Lett. 120 (2018) 102301
- 45. Measuring K0SK \pm interactions using Pb-Pb collisions at $\sqrt{\text{sNN}=2.76}$ TeV, ALICE collaboration, Phys. Lett. B 774 (2017) 64
- Linear and non-linear flow modes in Pb-Pb collisions at √ sNN= 2.76 TeV, ALICE collaboration, Phys. Lett. B773 (2017) 68
- 47. J/ ψ production as a function of charged-particle pseudorapidity density in p-Pb collisions at $\sqrt{\text{sNN}=5.02}$ TeV, ALICE collaboration, Phys. Lett. B 776 (2018) 91
- Flow dominance and factorization of transverse momentum correlations in Pb-Pb collisions at the LHC, ALICE collaboration, Phys. Rev. Lett. 118 (2017) 162302
- Production of muons from heavy-flavour hadron decays in p-Pb collisions at √ sNN=5.02 TeV, ALICE collaboration, Phys. Lett. B 770 (2017) 459
- Azimuthally differential pion femtoscopy in Pb-Pb collisions at √ sNN=2.76 TeV, ALICE collaboration, Phys. Rev. Lett. 118 (2017) 222301
- 51. Production of π 0 and η mesons up to high transverse momentum in pp collisions at 2.76 TeV, ALICE collaboration, Eur. Phys. J. C 77 (2017) 339
- 52. Energy dependence of forward-rapidity J/ψ and ψ (2S) production in pp collisions at the LHC, ALICE collaboration, Eur. Phys. J. C 77 (2017) 392
- 53. Measurement of D-meson production at mid-rapidity in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV, ALICE collaboration, Eur. Phys. J. C 77 (2017) 550
- 54. First measurement of jet mass in Pb-Pb and p-Pb collisions at the LHC, ALICE collaboration, Phys. Lett. B 776 (2018) 249
- 55. K(892)0 and ϕ (1020) meson production at high transverse momentum in pp and Pb-Pb collisions at $\sqrt{\text{sNN}} = 2.76$ TeV, ALICE collaboration, Phys. Rev. C 95 (2017) 064606
- 56. Production of Σ (1385) ± and Ξ (1530)0 in p-Pb collisions at $\sqrt{\text{sNN}=5.02}$ TeV, ALICE collaboration, Eur. Phys. J. C 77 (2017) 389
- 57. Insight into particle production mechanisms via angular correlations of identified particles in pp collisions at s $\sqrt{}$ =7 TeV, ALICE collaboration, Eur. Phys. J. C77 (2017) 569
- 58. Centrality dependence of the pseudorapidity density distribution for charged particles in Pb-Pb collisions at $\sqrt{$ sNN=5.02 TeV, ALICE collaboration, Phys.Lett. B 772 (2017) 567
- 59. W and Z boson production in p-Pb collisions at $\sqrt{\text{sNN}} = 5.02$ TeV, ALICE collaboration, JHEP 02 (2017) 077
- Determination of the event collision time with the ALICE detector at the LHC, ALICE collaboration, Eur. Phys. J. Plus 132 (2017) 99
- 61. Measurement of the production of high-pT electrons from heavy-flavour hadron decays in Pb-Pb collisions at $\sqrt{$ sNN = 2.76 TeV, ALICE collaboration, Phys. Lett. B 771 (2017) 467
- 62. Evolution of the longitudinal and azimuthal structure of the near-side jet peak in Pb-Pb collisions at $\sqrt{\text{sNN}=2.76}$ TeV, ALICE collaboration, Phys. Rev. C 96 (2017) 034904
- 63. Anomalous broadening of the near-side jet peak in Pb-Pb collisions at $\sqrt{\text{sNN}} = 2.76$ TeV, ALICE collaboration, Phys. Rev. Lett. 119 (2017) 102301
- 64. Measurement of electrons from beauty-hadron decays in p-Pb collisions at √ sNN=5.02 TeV and Pb-Pb collisions at √ sNN=2.76 TeV, ALICE collaboration, JHEP 07 (2017) 052
- 65. Recent Flow Results in d+Au Collisions from Beam Energy Scan at RHIC-PHENIX, ShinIchi Esumi for the PHENIX collaboration, PoS CPOD2017 (2018) 018
- 66. Collective flow measurements at RHIC energies, ShinIchi Esumi, EPJ Web Conf. 141 (2017) 05001
- More efficient formulas for efficiency correction of cumulants and effect of using averaged efficiency, T. Nonaka, M. Kitazawa, S. Esumi, Phys. Rev. C95 (2017) 064912
- 68. T. Tanaka, Y. Narikiyo, K. Morita, K. Fujita, D. Kaji, K. Morimoto, S. Yamaki, Y. Wakabayashi, K. Tanaka, M. Takeyama, A. Yoneda, H. Haba, Y. Komori, S. Yanou, B. J.-P. Gall, Z. Asfari, H. Faure, H. Hasebe, M. Huang, J. Kanaya, M. Murakami, A. Yoshida, T. Yamaguchi, F. Tokanai, T. Yoshida, S. Yamamoto, Y. Yamano, K. Watanabe, S. Ishizawa, M. Asai, R. Aono, S. Goto, K. Katori, and K. Hagino, Determination of fusion barrier

distributions from quasielastic scattering cross sections towards superheavy nuclei synthesis, J. Phys. Soc. Jpn. 87, 014201/1-9 (2018).

- 69. Q. Zeng, M. Wang, X. H. Zhou, Y. H. Zhang, X. L. Tu, X. C. Chen, X. Xu, Yu. A. Litvinov, H. S. Xu, K. Blaum, R. J. Chen, C. Y. Fu, Z. Ge, W. J. Huang, H. F. Li, J. H. Liu, B. Mei, P. Shuai, M. Si, B. H. Sun, M. Z. Sun, Q. Wang, G. Q. Xiao, Y. M. Xing, T. Yamaguchi, X. L. Yan, J. C. Yang, Y. J. Yuan, Y. D. Zang, P. Zhang, W. Zhang, and X. Zhou, Half-life measurement of short-lived 94mRu44+ using isochronous mass spectrometry, Physical Review C 96, 031303(R)/1-5 (2017).
- 70. J. C. Zamora, T. Aumann, S. Bagchi, S. Boenig, M. Csatlos, I. Dillmann, C. Dimopoulou, P. Egelhof, V. Eremin, T. Furuno, H. Geissel, R. Gernhaeuser, M. N. Harakeh, A.-L. Hartig, S. Ilieva, N. Kalantar-Nayestanaki, O. Kiselev, H. Kollmus, C. Kozhuharov, A. Krasznahorkay, Th. Kroell, M. Kuilman, S. Litvinov, Yu. A. Litvinov, M. Mahjour-Shafiei, M. Mutterer, D. Nagae, M. A. Najafi, C. Nociforo, F. Nolden, U. Popp, C. Rigollet, S. Roy, C. Scheidenberger, M. von Schmid, M. Steck, B. Streicher, L. Stuhl, M. Thuerauf, T. Uesaka, H. Weick, J. S. Winfield, D. Winters, P. J. Woods, T. Yamaguchi, K. Yue, and J. Zenihiro, Nuclear-matter radius studies from 58Ni (α, α) experiments at the GSI Experimental Storage Ring with the EXL facility, Physical Review C 96, 034617/1-6 (2017).
- 71. E. Miyata, M. Takechi, T. Ohtsubo, M. Fukuda, D. Nishimura, K. Abe, K. Aoki, A. Ikeda, T. Izumikawa, H. Oikawa, K. Ohnishi, S. Ohmika, I. Kato, Y. Kanke, N. Kanda, R. Kanbe, H. Kikuchi, A. Kitagawa, S. Sato, H. Shimamura, J. Shimaya, S. Suzuki, T. Suzuki, R. Takagaki, H. Takahashi, Y. Takei, Y. Takeuchi, T. Takenouchi, N. Tadano, M. Tanaka, Y. Tanaka, K. Chikaato, H. Du, J. Nagumo, K. Nishizuka, T. Nishimura, S. Fukuda, M. Machida, A. Mizukami, M. Mihara, J. Muraoka, S. Yagi, S. Yamaoka, T. Yamaguchi, K. Yokoyama, Development of high resolution TOF detector for RI beams using Cherenkov radiation, Acta Phys. Pol. B 48, 409-412 (2017).
- 72. H. Du, M. Fukuda, D. Nishimura, M. Takechi, T. Suzuki, Y. Tanaka, I. Kato, M. Tanaka, K. Abe, T. Izumikawa, H. Oikawa, T. Ohtsubo, J. Ohno, Y. Kanke, H. Kikuchi, A. Kitagawa, S. Sato, U. Sayama, J. Shimaya, S. Suzuki, Y. Takeuchi, T. Takemoto, N. Tadano, R. Tamura, J. Nagumo, K. Nishizuka, S. Fukuda, K. Hori, S. Matsunaga, A. Mizukami, M. Mihara, E. Miyata, D. Murooka, S. Yamaoka, T. Yamaguchi, Nuclear structure of 15,16C via reaction cross-section measurements, Acta Phys. Pol. B 48, 473-479 (2017).
- 73. M. Tanaka, M. Fukuda, D. Nishimura, M. Takechi, S. Suzuki, H. Du, Y. Tanaka, K. Aoki, S. Fukuda, A. Honma, T. Izumikawa, Y. Kamisho, N. Kanda, I. Kato, Y. Kanke, A. Kitagawa, J. Kohno, M. Machida, K. Matsuta, M. Mihara, E. Miyata, Y. Morita, J. Muraoka, D. Murooka, T. Nagai, M. Nagashima, K. Ohnishi, J. Ohno, T. Ohtsubo, H. Oikawa, S. Sato, H. Shimamura, T. Sugihara, T. Suzuki, N. Tadano, R. Takagaki, Y. Takei, A. Takenouchi, S. Yagi, T. Yamaguchi, S. Yamaki, S. Yamaoka, Reaction cross sections for 13-15B and one-neutron halo in 14B, Acta Phys. Pol. B 48, 461-466 (2017).
- 74. A. Homma, M. Takechi, T. Ohtsubo, D. Nishimura, M. Fukuda, T. Suzuki, T. Yamaguchi, T. Kuboki, A. Ozawa, S. Suzuki, H. Ooishi, T. Moriguchi, T. Sumikawa, H. Geissel, N. Aoi, R.-J. Chen, D.-Q. Fang, N. Fukuda, S. Fukuoka, H. Furuki, N. Inaba, N. Ishibashi, T. Ito, T. Izumikawa, D. Kameda, T. Kubo, M. Lantz, C. S. Lee, Y.-G. Ma, M. Mihara, S. Momota, D. Nagae, R. Nishikiori, T. Niwa, T. Ohnishi, K. Okumura, T. Ogura, M. Nagashima, H. Sakurai, K. Sato, Y. Shimbara, H. Suzuki, H. Takeda, S. Takeuchi, K. Tanaka, H. Uenishi, M. Winkler, Y. Yanagisawa, Measurements of interaction cross sections for 19-27F isotopes, JPS Conf. Proc. 14, 021010/1-3 (2017).
- 75. K. Nishizuka, M. Takechi, T. Ohtsubo, D. Nishimura, M. Fukuda, K. Aoki, K. Abe, A. Ikeda, T. Izumikawa, H. Oikawa, K. Ohnishi, J. Ohno, S. Ohmika, I. Kato, Y. Kanke, S. Kanbe, N. Kanda, H. Kikuchi, A. Kitagawa, S. Sato, U. Sayama, J. Shimaya, T. Sugihara, S. Suzuki, T. Suzuki, H. Takahashi, Y. Taguchi, Y. Takei, Y. Takeuchi, A. Takenouchi, T. Takemoto, N. Tadano, M. Tanaka, Y. Tanaka, K. Chikaato, H. Du, T. Nagai, J. Nagumo, S. Fukuda, K. Hori, A. Honma, M. Machida, S. Matsunaga, A. Mizukami, M. Mihara, E. Miyata, D. Murooka, S. Yagi, S. Yamaoka, T. Yamaguchi, K Yokoyama, Measurements of reaction cross sections for 9-11C, JPS Conf. Proc. 14, 021015/1-3 (2017).
- 76. K. Sawahata, A. Ozawa, Y. Saito, Y. Abe, Y. Ichikawa, N. Inaba, Y. Ishibashi, A. Kitagawa, S. Matsunaga, T. Moriguchi, D. Nagae, S. Okada, S. Sato, S. Suzuki, T. Suzuki, Y. Takeuchi, T. Yamaguchi, J. Zenihiro, Investigations of charge-changing processes for light proton-rich nuclei on carbon and solid-hydrogen targets, Nuclear Physics A 961, 142-153 (2017).
- 77. D. Kaji, K. Morita, K. Morimoto, H. Haba, M. Asai, K. Fujita, Z. Gan, H. Geissel, H. Hasebe, S. Hofmann, M. Huang, Y. Komori, L. Ma, J. Maurer, M. Murakami, M. Takeyama, F. Tokanai, T. Tanaka, Y. Wakabayashi, T. Yamaguchi, S. Yamaki, and A. Yoshida, Study of the Reaction 48Ca + 248Cm → 296Lv* at RIKEN-GARIS, J. Phys. Soc. Jpn 86, 034201/1-7 (2017)
- 78. P. Zhang, X. Xu, P. Shuai, R.J. Chen, X.L. Yan, Y.H. Zhang, M. Wang, Yu.A. Litvinov, K. Blaum, H.S. Xu, T. Bao, X.C. Chen, H. Chen, C.Y. Fu, J.J. He, S. Kubono, Y.H. Lam, D.W. Liu, R.S. Mao, X.W. Ma, M.Z. Sun, X.L. Tu, Y.M. Xing, J.C. Yang, Y.J. Yuan, Q. Zeng, X. Zhou, X.H. Zhou, W.L. Zhan, S. Litvinov, G. Audi, T. Uesaka,

Y. Yamaguchi, T. Yamaguchi, A. Ozawa, B.H. Sun, Y. Sun, F.R. Xu, High-precision QEC values of super allowed $0+ \rightarrow 0+ \beta$ -emitters 46Cr, 50Fe, and 54Ni, Phys. Lett. B 767, 20-24 (2017).

- 79. X. L. Tu, A. Kelic-Heil, Yu. A. Litvinov, Zs. Podolyak, Y. H. Zhang, W. J. Huang, H. S. Xu, K. Blaum, F. Bosch, R. J. Chen, X. C. Chen, C. Y. Fu, B. S. Gao, Z. Ge, Z. G. Hu, D. W. Liu, S. A. Litvinov, X. W. Ma, R. S. Mao, B. Mei, P. Shuai, B. H. Sun, Y. Sun, Z. Y. Sun, P. M. Walker, M. Wang, N. Winckler, J. W. Xia, G. Q. Xiao, Y. M. Xing, X. Xu, T. Yamaguchi, X. L. Yan, J. C. Yang, Y. J. Yuan, Q. Zeng, W. Zhang, H. W. Zhao, T. C. Zhao, and X. H. Zhou, Application of isochronous mass spectrometry for the study of angular momentum population in projectile fragmentation reactions, Physical Review C 95, 014610/1-6 (2017).
- 80. Y. Hirayama, Y.X. Watanabe, M. Mukai, M. Oyaizu, M. Ahmed, H. Ishiyama, S.C. Jeong, Y. Kakiguchi, S. Kimura, J.Y. Moon, J.H. Park, P. Schury, M. Wada, H. Miyatake, Doughnut-shaped gas cell for KEK Isotope Separation System, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 412, 11 (2017).
- 81. Y. Hirayama, M. Mukai, Y. X. Watanabe, M. Ahmed, S. C. Jeong, H. S. Jung, Y. Kakiguchi, S. Kanaya, S. Kimura, J. Y. Moon, T. Nakatsukasa, M. Oyaizu, J. H. Park, P. Schury, A. Taniguchi, M. Wada, K. Washiyama, H. Watanabe, and H. Miyatake, In-gas-cell laser spectroscopy of the magnetic dipole moment of the N 126 isotope 199Pt, Physical Review C 96 (2017) 014307.
- 82. Y. Hirayama, M. Mukai, Y. Watanabe, M. Oyaizu, M. Ahmed, Y. Kakiguchi, S. Kimura, Ionization cross section, pressure shift and isotope shift measurements of osmium H. Miyatake, P. Schury, M. Wada and Sun-Chan Jeong, Ionization cross section, pressure shift and isotope shift measurements of osmium, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 50 (2017) 215203.
- 83. M. Mukai, Y. Hirayama, Y.X. Watanabe, P. Schury, H.S. Jung, M. Ahmed, H. Haba, H. Ishiyama, S.C. Jeong, Y. Kakiguchi, S. Kimura, J.Y. Moon, M. Oyaizu, A. Ozawa, J.H. Park, H. Ueno, M. Wada, and H. Miyatake, High-efficiency and low-background multi-segmented proportional gas counter for β-decay spectroscopy, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 884,1 (2018).
- 84. Yukihiko Satou, Keisuke Sueki, Kimikazu Sasa, Hideki Yoshikawa, Shigeo Nakama, Haruka Minowa, Yoshinari Abe, Izumi Nakai, Takahiro Ono, Kouji Adachi and Yasuhito Igarashi, Analysis of two forms of radioactive particles emitted during the early stages of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station accident, Geochemical Journal, Vol. 52, 137-143, 2018. doi:10.2343/geochemj.2.0514
- 85. Masumi Matsumura, Kimikazu Sasa, Tetsuya Matsunaka, Keisuke Sueki, Tsutomu Takahashi and Hiroyuki Matsuzaki, Temporal variation of iodine-129 in rainwater at Tsukuba before and after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, Geochemical Journal, Vol. 52, 155-162, 2018. doi:10.2343/geochemj.2.0504
- 86. Seiji Hosoya, Kimikazu Sasa, Tetsuya Matsunaka, Tsutomu Takahashi, Masumi Matsumura, Hiroshi Matsumura, Mark Sundquist, Mark Stodola, Keisuke Sueki, Optimization of a Δ E E detector for 41Ca AMS, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 406, 268-271, 2017. DOI: 10.1016/j.nimb.2017.03.161
- 87. A. Yamazaki, K. Sasa, S. Ishii, M. Kurosawa, S. Tomita, Y. Shiina, S. Shiki, G. Fujii, M. Ukibe, M. Ohkubo, A. Uedono, E. Kita, Development of a microbeam PIXE system for additive light elements in structural materials, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 404 92-95 (2017).
- 88. Nami Kuroo, Kazuhito Ohmi, Katsunobu Oide, Demin Zhou, and Frank Zimmermann, Cross-wake force and correlated head-tail instability in beam-beam collisions with a large crossing angle, Phys. Rev. Accel. Beams 21, 031002 Published 15 March 2018.
- K. Ohmi, N. Kuroo, K. Oide, D. Zhou, and F. Zimmermann, Coherent Beam-Beam Instability in Collisions with a Large Crossing Angle, Phys. Rev. Lett. 119, 134801 Published 26 September 2017.

〈研究成果発表〉

[国際会議]

- 1. A. Suzuki, Y. Taniguchi, \lceil Calculation of B_K with Wilson fermion using gradient flow \rfloor , The 35th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2017), (Palacio de Congresos, Granada, Spain, June 18-24, 2017)
- 2. A. Suzuki, Y. Taniguchi, \lceil Calculation of B_K with Wilson fermion using gradient flow \rfloor , The 15th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2017), (University of Pisa, Pisa, Italy, June 26-28, 2017)
- A. Suzuki, Y. Taniguchi, [「]Calculation of decay constant using gradient flow, towards Kaon bag parameter」, QCD Down Under III, (Novotel Cairns Oasis Resort, Queensland, Australia, July 10-14, 2017)
- 4. <u>TANIGUCHI, Yusuke</u>; KITAZAWA, Masakiyo; SUZUKI, Asobu; SUZUKI, Hiroshi; UMEDA, Takashii; EJIRI, <u>Shinji</u>; KANAYA, Kazuyuki 「Energy-momentum tensor correlation function in Nf=2+1 full QCD at finite temperature」,

The XXXV International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2017) (Palacio de Congresos de Granada, Granada, Spain, June 18-24, 2017)

5. EJIRI, Shinji; KANAYA, Kazuyuki; KITAZAWA, Masakiyo; TANIGUCHI, Yusuke; IWAMI, Ryo; SUZUKI, Hi-

roshi; UMEDA, Takashi; SHIROGANE, Mizuki; WAKABAYASHI, Naoki $\$ Thermodynamics near the first order phase transition of SU(3) gauge theory using gradient flow $\$,

The XXXV International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2017) (Palacio de Congresos de Granada, Granada, Spain, June 18-24, 2017)

 KANAYA, Kazuyuki; EJIRI, Shinji; IWAMI, Ryo; KITAZAWA, Masakiyo; SUZUKI, Hiroshi; TANIGUCHI, Yusuke; UMEDA, Takashi [¬]Equation of state in (2+1)-flavor QCD at physical point with improved Wilson fermion action using gradient flow_J,

The XXXV International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2017) (Palacio de Congresos de Granada, Granada, Spain, June 18-24, 2017)

7. <u>KANAYA, Kazuyuki</u>; EJIRI, Shinji; IWAMI, Ryo; KITAZAWA, Masakiyo; SUZUKI, Hiroshi; TANIGUCHI, Yusuke; UMEDA, Takashi [¬]Thermodynamics of QCD at physical point with (2+1)-flavors of improved Wilson quarks using gradient flow_J,

The 15th International workshop on QCD in eXtreme conditions (XQCD 2017) (Univ. Pisa, Pisa, Italy, June 26-28, 2017)

 TANIGUCHI, Yusuke; EJIRI, Shinji; KANAYA, Kazuyuki; KITAZAWA, Masakiyo; SUZUKI, Asobu; SUZUKI, Hiroshi; UMEDA, Takashi 「Energy-momentum tensor correlation function in Nf=2+1 full QCD at finite temperature」,

The 15th International workshop on QCD in eXtreme conditions (XQCD 2017) (Univ. Pisa, Pisa, Italy, June 26-28, 2017)

- 9. <u>TANIGUCHI</u>, Yusuke ^{[Energy-momentum tensor correlation function in Nf=2+1 full QCD at finite temperature], The international workshop "QCD at nonzero baryon density" (The National Research center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia, Oct. 2-4, 2017)}
- 10. <u>TANIGUCHI</u>, Yusuke ^{[Energy-momentum tensor correlation function in Nf=2+1 full QCD at finite temperature], <u>CCS-EPCC Workshop</u> (Center for Computational Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, Japan, Dec. 7-8, 2017)}
- 11. A. Ozawa, "Rare-RI Ring in RIKEN RI Beam Factory" China-Japan collaborationworkshop on "Nuclear mass and life for unravelling mysteries of r-process" 2017, 6/26-28, University of Tsukuba, Tsukuba, Japan
- A. Ozawa, "Past and future of Rare-RI Ring", The 10th International Conference on Nuclear Physics at Storage Rings (STORI' 17), 2017, 11/13-18, Kanazawa theater, Kanazawa, Japan
- T. Yamaguchi, "Storage-ring mass spectrometry of exotic nuclei", International symposium on RI beam physics in the 21st century: 10th anniversary of RIBF, RIKEN, Wako, Japan, 4-5 Dec., 2017.
- T. Yamaguchi, "ILIMA project: isomeric beams, lifetimes and masses at the FAIR storage rings", 10th International Conference on Nuclear Physics at Storage Rings, Kanazawa, Japan, 13-18 Nov., 2017.
- T. Yamaguchi, "ILIMA status report", NUSTAR week 2017, Jozef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia, 25-29 Sep., 2017.
- 16. Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Seiji Hosoya, Kenta Takano, Yuta Ochiai, Maki Honda, Yuki Ohta, Aya Sakaguchi, Tetsuya Matsunaka, Hongtao Shen and Keisuke Sueki, Progress in Multi-nuclide AMS for the 6 MV AMS Systemat the University of Tsukuba, The 7th East Asia Accelerator Mass Spectrometry Symposium (EA-AMS 7), Guangxi Normal University, Guilin, China, November 20th to 25th 2017.
- 17. S. Esumi, "Recent Flow Results in d+Au Collisions from Beam Energy Scan at RHIC-PHENIX", CPOD2017 Critical Point and Onset of Deconfinement, Stony Brook Univ., New York, USA, 7-11/Aug/2017
- S. Esumi, "Unfolding of net-distribution to look for a critical fluctuation", Phases of QCD and Beam Energy Scan Program With Heavy Ion Collisions, Fudan Univ, Shanghai, China, 15-18/Aug/2017
- S. Esumi, "Unfolding the unknown net-distribution with volume fluctuation", EMMI workshop, Wuhan, China, 10-14/Sep/2017
- 20. T. Nonaka, "Correction methods for detector effects on cumulants", EMMI workshop, Wuhan, China, 10-14/Sep/2017
- T. Moriguchi et al., Lamb-shift Polarized Ion Source at UTTAC, The 2017 International Workshop on Polarized Sources, Targets & Polarimetry (PSTP2017), KAIST Munji Campus, Dajeon, Republic of Korea, Oct 16-20, 2017
- 22. S. Suzuki, Performance of time-of-flight detector and demonstration of completely new position detector for mass measurements with the Rare-RI Ring, 10th International Conference on Nuclear Physics at Storage Rings (STORI' 17), Kanazawa, Japan, 13- 18 November 2017.
- 23. M. Mukai, Beta-ray detector in KISS, The inaugural symposium of the Tomonaga Center of the History of the Universe, University of Tsukuba, Mar. 26-27, 2018.
- 24. Kimikazu Sasa, Seiji Hosoya, Tetsuya Matsunaka, Tsutomu Takahashi, Masumi Matsumura, Hangtao Shen, Yasuji Oura, Keisuke Sueki, Isobar separation techniques of 41Ca AMS with the 6 MV tandem accelerator, The Fourteenth International AMS Conference (AMS14), Ottawa (Canada), August 14-18, 2017.
- 25. Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Tetsuya Matsunaka, Seiji Hosoya, Masumi Matsumura, Shen Hangtao, Maki

Honda, Aya Sakaguchi, Keisuke Sueki, Mark Stodola, Mark Sundquist, Performance of the 6 MV multi-nuclide AMS system at the University of Tsukuba, The Fourteenth International AMS Conference (AMS14), Ottawa (Canada), August 14-18, 2017.

- 26. Seiji HOSOYA, Kimikazu SASA, Tsutomu TAKAHASHI, Tetsuya MATSUNAKA, Masumi MATSUMURA, Hongtao SHEN, Keisuke SUEKI, Isobar suppression for 36Cl-AMS with the 6 MV tandem accelerator, The Fourteenth International AMS Conference (AMS14), Ottawa (Canada), August 14-18, 2017.
- 27. Hongtao SHEN, Kimikazu SASA, Ming HE, Baojian HUANG, Masumi MATSUMURA, Seiji HOSOYA, Tetsuya MASUNAKA, Tsutomu TAKAHASHI, Maki HONDA, Keisuke SUEKI, Qingzhang ZHAO, Qi MENG, Kejun DONG, Xiaoming WANG, Yijun PANG, Xianlin YANG, Xiangdong RUAN, Shan JIANG, Study on Multiple radionuclides for Exposure Age Dating of Chinese Tiankeng, The Fourteenth International AMS Conference (AMS14), Ottawa (Canada), August 14-18, 2017.
- 28. Seiji Hosoya, Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Maki Honda, Yukihiko Satou, Kenta Takano, Yuta Ochiai, Koji Yamaguchi, Keisuke Sueki, Calusium-41 and Strontium-90 measurements with 6MV AMS, The 7th East Asia Accelerator Mass Spectrometry Symposium (EA-AMS 7), Guangxi Normal University, Guilin, China, November 20th to 25th 2017.
- 29. Hongtao Shen, Kimikazu Sasa, Qi Meng, Masumi Matsumura, Tetsuya Masunaka, Tsutomu Takahashi, Seiji Hosoya, Keisuke Sueki, Ming He, Baojian Huang, Qingzhang Zhao, Kejun,Dong, Xiangdong Ruan, Jiang Shan, Study on Cl-36 for Exposure Age Dating of Chinese Tiankeng, The 7th East Asia Accelerator Mass Spectrometry Symposium (EA-AMS 7), Guangxi Normal University, Guilin, China, November 20th to 25th 2017.
- 30. Yuta Ochiai, Kimikazu Sasa, Yuki Tosaki, Tsutomu Takahashi, Masumi Matsumura, Satomi Abe, Seiji Hosoya, Kenta Takano, Yuki Ohta, Keisuke Sueki, Correlation between the 36Cl deposition flux and solar activity, The 7th East Asia Accelerator Mass Spectrometry Symposium (EA-AMS 7), Guangxi Normal University, Guilin, China, November 20th to 25th 2017.
- 31. Kenta Takano, Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Yuki Tosaki, Yuki Ota, Seiji Hosoya, Yuta Ochiai, Keisuke Sueki, Kazuho Horiuchi, 36Cl record in the Antarctic ice core around the cosmic-ray event of 5480 BC and improved 36Cl AMS at the University of Tsukuba, The 7th East Asia Accelerator Mass Spectrometry Symposium (EA-AMS 7), Guangxi Normal University, Guilin, China, November 20th to 25th 2017.
- 32. T. Nonaka, Measurement of the sixth order cumulant of net-proton multiplicity distribution in Au+Au collisions at $\sqrt{\text{sNN}=200\text{GeV}}$ from the STAR experiment, WPCF2017, Nikhef, Amsterdam, Netherlands, 12-16/June/2017
- 33. N. Tanaka, Azimuthally differential pion femtoscopy with respect to second and third order event planes and event shape engineering in Pb-Pb collisions at $\sqrt{\text{ sNN}} = 2.76$ TeV, WPCF2017, Nikhef, Amsterdam, Netherlands, 12-16/June/2017
- Y. Kawamura, A Si-PAD and Tungsten based electromagnetic calorimeter for the forward direct photon measurement at LHC, TIPP2017 International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics 2017, Beijing, China, 21-26/May/2017
- S. Sakai, Measurement of heavy-flavour production, correlations and jets with ALICE, SQM2017 Strangeness in Quark Matter 2017, Utrecht, Netherlands, 10-17/July/2017

[国内学会・研究会]

- 1. 鈴木遊, 谷口裕介「Gradient Flow を用いた相関関数の計算」, 原子核三者若手夏の学校, (国立オリンピック記念青少年総合センター, 東京, 2017 年 8 月 21 日-26 日)
- 鈴木遊,谷口裕介「Gradient Flow を用いた Wilson フェルミオンに対する B_Kの計算」,日本物理学会秋季大会,(宇都宮大学,栃木,2017 年 9 月 12 日-15 日)
- <u>金谷 和至</u>, 江尻 信司, 石見 凉, 北沢 正清, 鈴木 博, 谷口 裕介, 梅田 貴士 「グラジエントフローによる Nf=2+1 QCD の状態 方程式 – 物理点での評価に向けて」,

熱場の量子論とその応用 2017 (TQFT 2017) (基礎物理学研究所, 京都大学, 京都, 8.28-30, 2017)

- 4. <u>白銀 瑞樹</u>, 江尻 信司, 石見 凉, 金谷 和至, 北沢 正清, 谷口 裕介, 鈴木 博, 梅田 貴士, 若林 直輝 「Gradient flow 法でみる SU(3) ゲージ理論における 1 次相転移付近の熱力学量」,
 - 熱場の量子論とその応用 2017 (TQFT 2017) (基礎物理学研究所, 京都大学, 京都, 8.28-30, 2017)
- 5. <u>谷口 裕介</u>, 江尻 信司, 石見 涼, 金谷 和至, 北沢 正清, 鈴木 遊, 鈴木 博, 梅田 貴士, 若林 直輝 「Gradient flow で捉える Nf=2+1 有限温度 QCD のエネルギー運動量テンソル相関関数」,

熱場の量子論とその応用 2017 (TQFT 2017) (基礎物理学研究所, 京都大学, 京都, 8.28-30, 2017)

6. 板垣 翔太, 石見涼, 梅田貴士, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 白銀瑞樹, 谷口裕介 「格子 QCD の重いクォーク領域における臨 界質量の連続極限について」,

熱場の量子論とその応用 2017 (TQFT 2017) (基礎物理学研究所, 京都大学, 京都, 8.28-30, 2017)

7. <u>板垣 翔太</u>, 石見 涼, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 白銀 瑞樹, 谷口 裕介 「QCD の重いクォーク領域における臨 界質量の格子間隔依存性」,

日本物理学会 (宇都宮大学, 宇都宮, 栃木, 9.12-15, 2017)

- 8. <u>白銀 瑞樹</u>, 江尻 信司, 石見 涼, 金谷 和至, 北沢 正清, 鈴木 博, 谷口 祐介, 梅田 貴士, 若林 直輝 「gradient flow 法を用いて見 る一次相転移点近傍の熱力学量の性質」,
 - 日本物理学会 (宇都宮大学, 宇都宮, 栃木, 9.12-15, 2017)
- 9. <u>谷口 裕介</u>, 石見 涼, 梅田 貴土, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 鈴木 博, 若林 直輝 「Gradient flow で捉えるエネルギー運動 量テンソル相関関数」,
 - 日本物理学会 (宇都宮大学, 宇都宮, 栃木, 9.12-15, 2017)
- 10. <u>金谷 和至</u>, 石見 涼, 梅田 土, 江尻 信司, 北沢 正清, 鈴木 博, 谷口 裕介 「Gradient flow による (2+1)-flavor QCD 状態方程 式 - 物理点での試験研究」,
- 日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大, 野田, 千葉, 3.22-25, 2018)
 11. 谷口 裕介, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 下条 昂礼, 鈴木 博, 馬場 惇 「Nf=2+1 QCD における QGP 粘性係数 の計算」,
 - 日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大,野田,千葉, 3.22-25, 2018)
- 12. 馬場 惇, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 下条 昂礼, 鈴木 博, 谷口 裕介 「エネルギー運動量テンソル相関関数を 使った線形応答関係式のテスト」,
 - 日本物理学会第73回年次大会(東京理科大,野田,千葉, 3.22-25, 2018)
- 13. 板垣 翔太, 石見 涼, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 白銀 瑞樹 「再重み付け法を用いた SU(3) ゲージ理論の重い クォーク領域における臨界質量の決定」,
 - 日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大, 野田, 千葉, 3.22-25, 2018)
- 14. <u>白銀 瑞樹</u>, 江尻 信司, 石見 涼, 金谷 和至, 北沢 正清, 鈴木 博, 谷口 裕介, 梅田 貴士, 若林 直輝 「SU(3) 格子ゲージ理論の 1 次 相転移近傍での熱力学量の詳細な解析」,
 - 日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大, 野田, 千葉, 3.22-25, 2018)
- 15. 笹公和、「加速器質量分析法(AMS)による極微量放射性核種の高感度分析手の開発」、京都大学原子炉実験所専門研究会「放射 化分析及び中性子を用いた地球化学的研究 -1-」、京都大学原子炉実験所(大阪府熊取市)、2018 年 1 月 10 日(水)
- 16. 笹公和、「タンデム・静電加速器を用いた先端研究の現状と将来展望 第 30 回「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」を 記念して - 」、第 30 回「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」セラトピア土岐、岐阜県土岐市、日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター、2017 年 7 月 6- 7 日
- 17. 小沢顕、不安定核の質量測定,第61回放射化学討論会 核化学分科会、2017,9/7,筑波大学
- 18. 中込宇宙、フローのまとめ、第 33 回 Heavy Ion Cafe 並びに第 23 回 Heavy Ion Pub 合同研究会, 2 0 1 7 年 4 月 8 日(土), 名古屋大学 ES 総合館 6 階
- 19. 渡辺陽介、重クオークのまとめ、第 33 回 Heavy Ion Cafe 並びに第 23 回 Heavy Ion Pub 合同研究会, 2017年4月8日
 (土),名古屋大学 ES 総合館 6 階
- 20. 坂井真吾、ジェットのまとめ、第 33 回 Heavy Ion Cafe 並びに第 23 回 Heavy Ion Pub 合同研究会, 2017年4月8日 (土),名古屋大学 ES 総合館 6 階
- 21. 渡辺陽介、高エネルギー重イオン衝突実験の現状と展望,シンポジウム「高エネルギー重イオン衝突実験と諸分野の協奏と発展」 日本物理学会第73回年次大会、東京理科大学(野田キャンパス)、2018年3月22日(木)~25日(日)
- 22. 江角晋一、"Status of Beam-Energy-Scan at RHIC", J-PARC Heavy-Ion Physics meeting, 11/Sep/2017, Tokai, Japan
- 23. 笹 公和, 細谷青児, 本多真紀, 高橋 努, 佐藤志彦, 高野健太, 落合悠太, 末木啓介, 加速器質量分析法によるストロンチウム 90 の迅速定量法の開発, 日本原子力学会「2018 年春の年会」, 大阪大学吹田キャンパス(大阪市), 2018 年 3 月 26 日 28 日.
- 24. 森口哲朗、筑波大学タンデム加速器施設 UTTAC の現状 (2016 年度)、第 30 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター (岐阜県)、2017/07/06-07
- 25. 森口哲朗、偏極陽子ビームを用いた陽子吸収反応による不安定核の核偏極、日本物理学会 2017 秋季大会、宇都宮大学峰キャン パス、2017/09/12-15
- 26. 森口哲朗、固体水素標的を用いた不安定核のスキン厚導出手法の開発、H28 年度 HIMAC 共同利用研究成果発表会、ホテルポートプラザ千葉、2017/04/17-18
- 27. 鈴木伸司、RI 質量測定用の薄膜を用いた準非破壊的位置検出器の開発、日本物理学会第 73 回年次大会、東京理科大学野田キャンパス、2018 年 3 月 22-25 日.
- 28. 鈴木伸司, 質量測定用飛行時間検出器の大型実機の開発, 日本物理学会秋季大会、宇都宮大学、2017年9月12-15日.
- 29. 向井もも、KISS II: 196-198Ir のレーザー共鳴イオン化核分光筑波、日本物理学会第 73 回年次大会、宇都宮大学、9 月 12 日 ~15 日、2017 年
- 30. 山口貴之、Storage-ring mass spectrometry at GSI/FAIR、日本物理学会 2017 年秋季大会、宇都宮大学(峰キャンパス) 2017.9.12-15.
- 31. 森口 哲朗、石井 聡、大島 弘行、高橋 努、田島 義一、大和 良広、関場 大一郎、笹 公和、上殿 明良、筑波大学タン デム加速器施設 UTTAC の現状 (2016 年度)、第 30 回「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」、セラトピア土岐、岐阜県 土岐市、日本原子力研究開発機構東濃地科学センター、2017 年 7 月 6-7 日
- 32. 笹 公和、高橋 努、細谷 青児、高野 健太、落合 悠太、松中 哲也、末木 啓介、極微量放射性核種を超高感度で検出可能な 6 MV タンデム加速器質量分析装置の開発、第 14 回日本加速器学会年会、北海道大学、2017 年 8 月 1 日~ 3 日.
- 33. 笹 公和、石井 聰、大島 弘行、高橋 努、田島 義一、大和 良広、森口 哲朗、上殿 明良、筑波大学タンデム加速器施設の現状報

告、第14回日本加速器学会年会、北海道大学、2017年8月1日~3日.

- 34. 笹 公和、高橋 努、細谷 青児、高野 健太、落合 悠太、本多 真紀、太田 祐貴、松尾 一樹、松中 哲也、坂口 綾、末木 啓介、6 MV タンデム加速器質量分析装置を用いた長寿命放射性核種の超高感度検出技術の開発、2017 年日本放射化学会年会・第 61 回 放射化学討論会、筑波大学、2017 年 9 月 6 日~8 日.
- 35. 落合 悠太、笹 公和、高橋 努、戸崎 裕貴、松村 万寿美、安部 聡美、細谷 青児、高野 健太、末木 啓介、福島第一原子力発電所事 故前後における降水中の塩素 36 同位体比変動、2017 年日本放射化学会年会・第 61 回放射化学討論会、筑波大学、2017 年 9 月 6 日~8 日.
- 36. 細谷 青児、笹 公和、高橋 努、本多 真紀、佐藤 志彦、高野 健太、落合 悠太、末木 啓介、加速器質量分析法を用いた 90Sr 測定の試み、2017年日本放射化学会年会・第 61 回放射化学討論会、筑波大学、2017年9月6日~8日.
- 37. 高野 健太、笹 公和、太田 裕貴、高橋 努、細谷 青児、落合 悠太、末木 啓介、6MV タンデム加速器質量分析装置における長寿命 放射性核種 36Cl の検出感度の改善、2017 年日本放射化学会年会・第 61 回放射化学討論会、筑波大学、2017 年 9 月 6 日~8 日.
- 38. 笹 公和、山崎明義、石井 聰、黒澤正紀、冨田成夫、左高正雄、楢本 洋、工藤 博、構造材料計測用マイクロイオンビーム分析装置によるビーム収束試験と材料組成分析、日本原子力学会「2017 年秋の大会」、北海道大学、2017 年 9 月 13 日~15 日.
- 39. 笹 公和、高橋 努、松中 哲也、細谷 青児、太田 祐貴、高野 健太、落合 悠太、本多 真紀、末木 啓介、筑波大学 6 MV タンデ ム加速器質量分析装置による多核種 AMS と応用研究の現状、第 20 回 AMS シンポジウム、セラトピア土岐(岐阜県土岐市)、 2017 年 12 月 14 日~15 日.
- 40. 細谷 青児、笹 公和、高橋 努、本多 真紀、佐藤 志彦、高野 健太、落合 悠太、末木 啓介、6 MV タンデム加速器による 90Sr-AMS, 第 20 回 AMS シンポジウム、セラトピア土岐(岐阜県土岐市)、2017 年 12 月 14 日~15 日.
- 41. 落合悠太, 笹公和, 戸崎裕貴, 高橋努, 松村万寿美, 本多真紀, 細谷青児, 高野健太, 太田祐貴, 末木啓介, つくば市における 福島第一原子力発電所事故前後の 36Cl 降下フラックス変動, 第 20 回 AMS シンポジウム, セラトピア土岐(岐阜県土岐市), 2017 年 12 月 14 日~15 日.
- 42. 落合悠太、笹公和、戸崎裕貴、高橋努、松村万寿美、細谷青児、高野健太、太田祐貴、末木啓介、つくば市における 36Cl 降下フ ラックス変動、第19回「環境放射能」研究会、高エネルギー加速器研究機構、2018年3月13日 - 15日.
- 43. 笹 公和、アイスコア中の宇宙線生成核種 Cl-36 の測定 宇宙線強度変動および環境変動と年代の指標として、研究集会「南極 ドームふじ氷床深層アイスコアの解析による気候・環境変動の研究の新展開」、国立極地研究所3 F 多目的会議室、2018 年 3 月 28 - 29 日.
- 44. 加藤浩樹, 飛行時間測定器 Multi-gap Resistive Plate Chamber; 陽電子ビームを用いた読み出しパッド形状の最適化に向けた 性能評価, 日本物理学会 2017 秋季大会、宇都宮大学峰キャンパス、2017/09/12-15
- 45. 市沢太地, 飛行時間測定器 Multi-gap Resistive Plate Chamber(MRPC)の開発; J-PARC 実験に向けた 30 × 20cm2 大型 試作機の性能評価, 日本物理学会 2017 秋季大会、宇都宮大学峰キャンパス、2017/09/12-15
- 46. 川名大地, ALICE 実験 陽子 鉛衝突における単電子測定法を用いた重クォークの測定, 日本物理学会 2017 秋季大会、宇都宮大 学峰キャンパス、2017/09/12-15
- 47. 青山遼, RHIC-STAR 実験金+金衝突における 2 粒子相関の反応領域の幾何学形状に対する依存性の研究, 日本物理学会 2017 秋季大会、宇都宮大学峰キャンパス、2017/09/12-15
- 48. 杉浦哲郎, RHIC-STAR 実験金+金衝突における粒子種に依存した efficiency 補正を用いた net-charge 揺らぎの解析, 日本物 理学会 2017 秋季大会、宇都宮大学峰キャンパス、2017/09/12-15
- 49. 野中俊宏, 分布再構成法による高次キュムラント解析, 日本物理学会 2017 秋季大会、宇都宮大学峰キャンパス、2017/09/12-15
- 50. 川村陽太, LHC-ALICE 実験超前方光子測定用新型電磁カロリメーター製作に向けた Si PAD の基礎特性評価, 日本物理学会 2017 秋季大会、宇都宮大学峰キャンパス、2017/09/12-15

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

部門長

原 和彦(数理物質系物理学域 准教授):

構成教員

- 江角 晋一(数理物質系物理学域准教授)
- 武内 勇司(数理物質系物理学域准教授):
- 金 信弘(数理物質系物理学域特命教授)

連携教員

- 西堀 英治(数理物質系物理学域教授)
- 冨田 成夫(数理物質系物理工学域 准教授)
- 近藤 剛弘(数理物質系物質工学域准教授)

光量子計測器開発部門は、宇宙史国際研究センターの4名の構成教員とセンター外の3名の連携教員が協力 して、光量子計測器に関するセンター共有の光量子計測器開発基盤を形成し、つくば地区の連携研究 TIA の 筑波大学拠点として活動する(図 61)。TIA では筑波大およびつくば研究機関における理工学分野の密接な連 携により、計測器開発に関する情報共有、計測器開発の融合共同研究、新しい計測器のアイデアの創出、計測 器技術の産業・社会への応用を推進することを主な目的とする。具体的な活動としては、KEK・産総研等の 研究機関と連携して、つくば光・量子計測共通基盤を形成して、先端基礎科学と最新産業応用のための光量子 計測器開発を推進している。



図 61 (左図) 光量子計測器開発部門の概要。(右図) 光量子計測器開発の主なプロジェクト。

光量子計測器開部門は、平成 29 年 10 月 1 日の宇宙史研究センターの発足とともに、前身の数理物質融合 科学センターの光量子開発推進室を改組して活動を開始した。

現在 TIA-ACCELERATE(光量子産業応用イニシアチブ)の光量子センシングスクエア(光量子計測技術 開発)において、つくば連携で超伝導検出器、SOI技術、大型構造イメージングの光量子計測器を開発推進し ている。光量子計測器開発部門は、この開発研究の筑波大学の活動拠点としても機能する。以下、 TIA での 活動を軸に研究成果を報告する。

TIA 5機関による連携プログラム探索推進事業「TIA かけはし」が平成 28 年度から開始され、平成 29 年 度には本部門員が参加する以下の2件が採択された。

テーマ	代表	参加機関
簡単・便利な超伝導計測―100 倍精度の計測を非専門家	田島 治(KEK)	AIST、NIMS、筑波
の手で(H28/29)		大(武内)、東大
3 次元積層半導体量子イメージセンサの調査研究	新井 康夫(KEK)	AIST、 筑波大 (原)、
(H28/29)		東大

表7 TIA かけはし平成 29 年度採択テーマと代表者

平成 30 年 2 月 7 日には、第 3 回 TIA 光・量子計測シンポジウムがつくば市エポカルで開催され、本部門 からは、「4次元飛跡検出器のための内部増幅機能付きシリコン半導体 LGAD の開発研究」、「SOI 技術を用 いた高位置分解能中性子検出器の開発研究」、「宇宙線ミューオンを用いた福島第一原子力発電所 1-3 号炉の核 燃料デブリの観測」の 3 件を発表した。これ以外にも TIA で共同研究を行う多数の研究者から最新の研究成 果が発表された。

平成 29 年 12 月 11 日~15 日には、沖縄科学技術大学で第 11 回広島シンポジウムと SOIPIX の合同国際シ ンポジウムが開催され、世界各国から最前線で検出器開発を行っている 187 名が参加し活発な意見交換がなさ れた。本部門からは原准教授の"Radiation Hardness of SOI Pixel Devices"、和田 (修士 1 年)の"Evaluation of Characteristics of Hamamatsu Low Gain Avalance Detector (LGAD)"の発表が行われた。

各研究部門を横断する共有の開発基盤の形成のために、研究宇宙史研究センター発足記念式典と兼ねた 2018 年 3 月 26-27 日の 宇宙史国際シンポジウムでは、光量子計測器開発部門が主催して以下の 8 件の検出 器開発についての報告・検討会をプレナリーで開催した。素粒子研究部門からは、ATLAS ピクセル検出器、 LGAD、SOI の 3 件の半導体検出器と COBAND 用 STJ 検出器の開発、クォーク・核物質研究部門からは、 ALICE-FOCAL Si/W カロリメータ、J-PARC 実験用 MRPC TOF 検出器、希少 RI リング用の TOF 検出 器の開発、南極天文学研究部門からは MKID 検出器の開発。

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

(1) HL-LHC ATLAS 実験用半導体センサーの開発(原)

LHC 加速器は、継続して最大限の物理成果を生み出すために、2026 年から当初設計値を超え 3000 fb⁻¹ のデータ量をめざす高輝度 LHC (HL-LHC) 加速器に増強される。放射線レベルも現在の検出器設計を 超え、また、粒子数密度も増大する。ATLAS は 2016-17 年に内部飛跡検出器の技術設計書をまとめ、 衝突点に近い内側 5 層には電極サイズが 50 × 50 μ m (または 25 × 100 μ m) のピクセル型、その外側 4 層には 74 μ m × (2.4 または 4.8) cm のストリップ型のシリコン半導体検出器を配置する。 我々は、HL-LHC でも使用可能な高放射線耐性のセンサーとして n 型電板を用いたセンサー

(n⁺-on-p)を提案し、実際に陽子線や中性子を照射し、HL-LHC の高放射線線量でも使用可能な検出 器を設計してきた。p型基板を用いることは高速な電子を収集することで収集電荷量の放射線による 劣化を受けにくく、また、従来から放射線耐性に優れるとされた n⁺-on-n 型設計に比べ、n⁺-on-p の 設計では片面プロセスが可能であるため製造コストが低減でき、より広い領域を半導体検出器で覆う HL-LHC 用には特に有利であることを示してきた。2017 年度は、エンドキャップ部に用いるストリッ プ型センサー設計の最終評価、50 µm ×50 µm サイズのピクセルセンサーとピクセルモジュールを試 作し評価を行った。

HL-LHC 用 ATLAS ストリップ型センサー

2016年に、ストリップ型センサーの実機を評価したところ、一部に暗電流の不安定性があることが確認された。その原因が湿度によるものであることを特定し、2017年度には表面保護膜の生成法に改善を加えることで、図 62(左)に見られるように湿度依存性がないサンプルの製造に成功した。当面は新生成法で試作をすすめ、統計的な評価を進める。

エンドキャップ用の最初の実機(R0)を試作し、東北大学 CYRIC の 70 MeV 陽子ビームを照射し、 放射線損傷後の性能評価を行った。図 62(右)は電荷収集量の放射線による劣化の様子を示す。実際 に用いる AC 結合のサンプルは 500 V のバイアス電圧で未照射からの劣化は 50% に抑えられ、十分に 仕様を満たすことを示した。この結果は国際学会で発表された。同時に DC 結合のサンプルを初めて 評価した。暗電流の増加により読出しアンプの特性が影響を受け、電荷収集量は AC サンプルに比べや や悪い結果となったが、その他の電気的性能は予想通り優れた結果が得られた。暗電流の影響を受けに くいアンプ設計の改善により、今後は、より安価な DC 結合ストリップが大面積シリコンセンサーとし て使用できる可能性を示した。



図 62 (左) 成膜法を改良した実寸センサーサンプルの暗電流を湿度を変えて測定した。湿度依存性がないことを示した。(右) 陽子線照射したサンプルと未照射サンプルの電荷収集量の比較。

HL-LHC 用 ATLAS ピクセル型センサー

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

ピクセル検出器は現行の ATLAS 読み出しチップである FE-I4 の仕様 (ピクセルサイズ 50×250 μ m) のため、2016 年度までは、ピクセルサイズを非対称にして部分的に 50×50 μ m を実現して評価して きた。2017 年度は新しく開発された FE65 読出しチップを用いて 50×50 μ m および 25×100 μ m の センサーを試作しビーム試験評価をした。同時に、ATLAS への実装を念頭に、フレックス基板を用 いたモジュール化 (図 63 左) も進めた。ピクセル設計に関しては、各ピクセルに配線するバイアス抵 抗の経路に依存して検出効率が陽子線照射後に低下することが分かっているが、面積が小さなピクセ ルではその効果が相対的に顕著となる。そこで、劣化が少ないように経路を最適化した。図 63 右は、 25 ×100 μm ピクセル電極内の検出効率を位置依存性として示すもの(陽子線照射後)である。バイア ス構造をもたないものはピクセル間での低下は見られない。バイアス構造のあるものは、劣化があるが バイアス電圧を上げることで劣化は低減できる。これはピクセル境界での電場低下に収集電荷量の劣化 が起因する事を示唆する。

読出し ASIC にバンプボンドをすればセンサーのバイアス構造は不要となるが、プロセスコストの高い バンプボンドの前に不良センサーを判別するための手法としてバイアス構造は有効となる。主導して進 めてきた検出効率低下が小さくバイアス構造を有するピクセルセンサーの提案の意義は高い。ただし、 バイアス抵抗のためにノイズがやや増える傾向にあり、バイアス抵抗値を高くするプロセスの採用、そ もそも ASIC の閾値設定は妥当なのかなどの評価を継続して進めている。



図 63 (左) バレル部への実装を想定した、フレックス基板によるピクセルセンサーモジュール。(右) 3×10^{15} n/cm² を照射した $25 \times 100 \ \mu m$ ピクセルセンサーのピクセル内位置での検出効率の場所依存性。バイアス構造のないものに比較して、2つの逆バイアス電圧設定に対する構造ありの場合の分布。

(2) 高時間分解能 LGAD 半導体センサー(原)



図 64 (左) 赤外レーザーを用いたストリップ型 LGAD の場所によるゲインの変化の測定結果。(右) 2つの LGAD の時間差分布(上に例を示す)から、閾値電圧の関数として達成した時間分解能を示す。

LGAD (low-gain avalanche diode) は、読み出しの n⁺ 電極の直下に高濃度の p⁺ 層を形成すること で、アバランシェ増幅を起こさせる増幅機能を持たせたシリコン検出器である。信号量が増えること に加え増幅率が 10 倍程度の低ゲインでは SN 比も向上する。信号形成が薄い pn 接合部で局所的に起 きるため時間分解能が飛躍的に向上する。従来のシリコン検出器は電荷収集に 10 ns 程度を要するが LGAD では 20~30 ps 程度の時間分解能が可能であると考えている。半導体検出器の優れた位置分解 に加え時間情報を得ることができれば、HL-LHC やさらに高輝度の加速器実験で要請される、膨大な 数の粒子生成の環境下での飛跡再構成に大きな役割を果たすことが期待できる。PET 等の医療機器へ の応用も視野にある。

2016 年度に浜松ホトニクスで試験用 LGAD ピクセルを試作し、ガンマ線、中性子線、陽子線を照射し LGAD の機能がどう保たれるかの評価を行った。2017 年度には、電極を細分化したセンサーについて の応答の一様性をレーザーを用いて評価した (図 64 左)。この研究により不感領域の振舞を定量的に 評価でき、一定のゲインを確保しつつ細分化する設計を探るための最初のデータを得ることができた。 時間分解能に対する評価は FNAL の 120 GeV 陽子ビームを用いて行った。ビームラインには 3 つの LGAD センサーを並べ、信号は DRS4 ASIC による 5 GHz の FADC て読み出した。 3 つのうち任意 の 2 つの時間差の分布から、個別の LGAD の時間分解能を評価した。図 64 右には、一例として 2 つ の LGAD 間の時間差分布を示す。このような分布から評価できる時間分解能を、時間測定をする閾値 電圧と信号ピーク電圧の比 f の関数としてまとめた。室温でも 35 ps、8 °Cでは 30 ps を切る優れた時 間分解能を得た。

(3) SOI を用いたモノリシック型ピクセル検出器の開発(原)

Silicon-On-Insulator (SOI) は、埋め込み酸化膜 (BOX) 層をシリコン基板中に形成し、表層の薄いシ リコン層に電子回路を作製した素子である。BOX 層下のシリコン基板を高抵抗の粒子検出部とした読 み出し回路一体型ピクセルセンサーを実現する全く新しいタイプの検出器である。我々は Lapis セミコ ンダクター社の 0.20 µm SOI プロセスを用いて KEK の先端検出器開発室と共同で、将来の加速器実 験に用いることのできるピクセル検出器の開発研究を行っている。

筑波大学グループは開発当初より放射線損傷の研究を主導して進め、昨年度までに、最低1 MGy ま での放射線耐性があることを示すことに成功した。SOI 素子は当初は数 kGy で全く使い物にならなく なったが、この研究により TID に対して通常の CMOS 素子と同等の放射線耐性がある素子が作製でき る事を示し、さらに優れた SEE 耐性を考慮すると、SOI は素粒子実験に極めて適した素子であるとい える。10 年におよぶ開発の経緯をまとめ国際学会で発表した。また、ピクセルサイズ 8 μ m の FPIX2 で昨年度に達成した、世界で初めて半導体検出器で 1 μ m 切る位置分解能の成果は、解析方法を改良 し、最終的に 0.65 μ m を得た。VERTEX 国際学会で発表し、大きな反響を受けた。

2017 年度は FPIX の有感面積を4倍に広げ、並列読出し経路数を2倍の16ラインに改良した FPIX4 と読み出し用のサブボードを設計・製作した。これらと並行して、FPIX3を用いた高位置分解能中性 子検出のための基礎評価、ILC用 SOFIST の FNAL でのテストビーム評価を実施した。

高位置精度中性子検出のための基礎研究

中性子の位置を精度よく求めることは中性子を用いた重力の検証実験やウラン濃縮度の検定などの実用 面でも重要であり、従来は特殊なプラスチックにつく傷をエッチングで広げることで 1μm 程度の精度 を実現している。FPIX の裏面に B 成膜をして、中性子との反応で発生するα粒子を検出することで時 間情報をもった高精度位置測定がオンタイムでできる可能性がある。FPIX3 センサーを 75μm 厚に薄 化し、裏面から²⁴¹Am 線源からのα線を入射した。センサー直前にはシリコンの破断面をエッジとし たα線の遮へい材を設置し、測定するエッジ位置の広がりから位置分解能を評価した。図 65 左に示す 様に、エッジの広がりから位置分解能は 3.9±0.2μm と評価できた。この値にはα線が角度を持って入 射する効果、エッジ部での散乱、シリコン遮へい材が一直線でない効果も含まれるので、こうした影響 を排除した評価が今後必要となる。

ILC 用 SOFIST のビーム試験

優れた時間分解能と位置分解能を同時に達成できるピクセル検出器を、国際リニア衝突器実験 ILC への応用を目指して開発している。位置情報は従来の電荷積分型増幅器で取得すると同時に、電圧を一定割合でランプし、ビーム通過時のランプ電圧を測定することで時間情報を得ることを目指している。 2016 年度は FPIX とともに位置測定評価のための SOFISTv1 を試験し、2017 年度は時間分解能を SOFISTv2 (センサー厚 70 µm)を用いて評価した。FNAL でのビーム試験では SOFISTv2 を 3 台、 飛跡再構成用に大面積の INTPIX4 を 4 台配置し、120 GeV 陽子を通過させた。図 65 右は、2 つの SOFIST 間の時間測定の相関を示す。ビームに同期して 500 µs のゲートを開き、その間の信号の通過 時間を測定しているので、複数粒子の通過では y=x の相関以外の組合せが発生するが、データに示す 様に明らかな相関が得られた。この相関の時間差分布から暫定的に 4.5 µs の時間分解能を得た。個別 のピクセルの時間応答校正を施すことでさらに改善が期待できる。ILC では 0.55 µs のバンチで衝突が 起きるため、最終目標はバンチを区別できる分解能であるが、1 ms のトレイン間に起きる衝突事象に 時間情報を加えられる技術の可能性を示すことができた意義は高い。



図 65 (左) FPIX による中性子位置測定精度の評価のためにα線源の遮へい効果を測定した。α線測定数の位置依 存性。電荷重心法で求める位置は収集電荷量がピクセル内で不均一であることから周期的な影響を受ける。この効果を 評価することで位置分解能はさらに向上する。(右) FANL テストビームによる2つの SOFIST で測定された時間相関 分布

(4) 福島第一原発燃料デブリの宇宙線ミューオンによる観測(原・金)

ミュー粒子が建物などを透過しやすい性質を利用し、宇宙線ミュー粒子の飛来数分布を大規模構造物の 背後で測定することで、構造物内部の様子を透視することが可能である(ミューオンラジオグラフィー 法)。福島第一原子炉事故で溶け落ちた燃料デブリの位置を測定することを最終目標にして、2011 年夏 から KEK のグループと共同で検出器の技術設計を開始した。設計には、SSC 実験用に開発した波長 変換ファイバーによるプラスチックシンチレータバーの読み出し、ILC 実験用に開発中の MPPC 光検 出器、SOI で培った FPGA ベースの読み出しシステム等の技術を活用した。試作機での評価を経て、 2015 年には国際廃炉機構(IRID)の支援を受けて福島第一原発1号機、2016-17 年度は東京電力の事 業委託を受けた KEK に協力する体制で 2-3 号機の観測をした。

1 号機の観測からは燃料デブリは燃料装荷位置にはほとんどないことが分かったが、測定装置を建屋か らやや離れた位置に設置する必要があったため、圧力容器の下部は視野に入らず、デブリの存在に対す る情報は得られなかった。

1 号機での経験から測定器を小型化し、2 号機の観測では建屋に接するように設置し、3 号機では隣接 するタービン建屋内に設置し、ともに圧力容器全体の様子を観測することを可能とした。観測結果か ら、2、3 号機ともに燃料装荷位置にはほとんど燃料デブリはないことが判明した。2 号機では圧力容 器の底部に過剰な吸収があり、背景となる原子炉の構造体を定量的に評価した結果、底部に残る燃料デ ブリ量は溶け落ちる前の燃料集合体とほぼ等しいと推定した。また、3 号機では、圧力容器の底部にも 強い吸収はなく、燃料デブリは格納容器へと解け落ちたと推定できる。

これらの観測により当初から予定していた3基の原子炉における評価を完遂した。最近ではカメラによ る撮影が可能となっているが、圧力容器内の燃料デブリを定量的に評価できる唯一の手法としてミュー オンラジオグラフィーは重要な役割を果たした。筑波大チームは検出器の設計と建設を行い、データ 解析でも主要な貢献を果たした。観測データの解析を進めると、水平方向のミュー粒子の運動量分布 の不定性が大きな系統誤差をあたえることが分かってきた。そこで、実際に、最大9.5 m長の鉄を検 出器層の間に挟み、レンジを測定する装置を KEK に整備し、1 年間にわたる観測を経て、水平宇宙線 ミュー粒子の運動量分布を学術論文として発表した。図66 には測定のセットアップと宇宙線ミューオ ンフラックスの主な測定結果を示す。



図 66 (左)水平方向宇宙線ミュー粒子の運動量測定をするためのセットアップ。5 層の位置検出器の間に鉄ブロック をはさみ、レンジ法により運動量を求めた。(右)宇宙線ミュー粒子のフラックス。天頂角 75°の領域では文献データと と矛盾ない結果を得、水平方向のデータを新たに加えた。

(5) 超伝導体を用いた COBAND 実験のための遠赤外域一光子分光検出器の開発(金・武内)

COBAND 実験では、宇宙背景ニュートリノの崩壊の際に発生する約 25 meV (波長約 50 μ m)の光 子をエネルギー分解能 2% の精度で一光子ずつ測定可能な検出器として、超伝導トンネル接合素子 (Superconducting tunnel junction、STJ) による光検出器を開発している。STJの候補としては、観 測ロケット実験での使用予定であるニオブ (超伝導ギャップエネルギー $\Delta = 1.55$ meV、 $T_c = 9.23$ K) と準粒子トラップ層としてアルミニウム ($\Delta = 0.172$ meV、 $T_c = 1.20$ K)を用いた Nb/Al-STJ およ び、更に衛星実験での使用を念頭に置いた Δ の小さいハフニウム ($\Delta = 0.020 \text{ meV}$ 、 $T_c = 0.165 \text{ K}$) を超伝導体として用いた Hf-STJ があり、二本柱で開発を進めている。



a) B=0 T~120mK Hf-STJ 200µm>200µm 2010年 I: 20µA/DIV ↓ V: 20↓ 20µV

図 67 STJ 信号増幅のために開発したテレスコピックカスコード差動 増幅回路をもつ低入力インピーダンス電荷積分型 SOI 極低温アンプ試作 回路(左)。3 ケルビンの極低温下におけるパルス電荷入力(約 100fC) に対して時定数 10 μs 程度、波高 23.3 mV の出力を得た(右)。

図 68 ハフニウム (Hf) を用いた超伝導ト ンネル接合素子の I-V カーブ。左は、2010 年に初めて Hf-HfOx-Hf の構造をもつ素子に よって、ジョセフソン電流を観測した。右は、 2017 年に作製された素子。Hf 成膜条件およ び酸化膜作製条件の最適化により、リーク電 流の改善が見れらる。

Nb/Al-STJ 単体では、25 meV の光子に対して必要なエネルギー分解能は期待できないが一光子検出 が実現できれば、格子状に並べた Nb/Al-STJ ピクセルと回折格子の組み合わせによって分解能 2% 以下の一光子分光が可能となる。我々のグループでは産総研との共同研究による漏れ電流の少ない Nb/Al-STJ の開発、並びに STJ 信号極低雑音読み出し系として KEK、JAXA、静岡大等との共同 研究による FD-SOI (Fully Depleted Silicon On Insulator) プロセスによる steam 極低温増幅器の開 発を行っている。産総研の超伝導デバイス作製施設である CRAVITY で作製された Nb/Al-STJ 素 子は、低漏れ電流性能をほぼ達成している。極低温増幅器の開発については、FD-SOI プロセスによ る MOSFET を用いた増幅器の試作および測定を行い、300~400 mK の極低温での動作を確認、並び に極低温で動作させた STJ のパルス光応答信号の極低温ステージ上での増幅に成功した。昨年度は、 STJ のパルス光応答速度および STJ 測定系の静電容量を考慮したより実際的な低入力インピーダンス 増幅回路の試作および評価を行った。テレスコピックカスコード差動増幅に容量および抵抗の負帰還回 路をつけることにより低入力インピーダンス電荷積分型 SOI 極低温増幅器 (図 67 左) を試作し、冷凍 機内の 3 ケルビンの極低温下におけるパルス電荷入力 (約 100fC) に対して時定数 10 µs 程度、波高 23.3 mV の出力を得た (図 67 右)。

Nb/Al-STJ の開発と並行して、KEK、理研との共同研究によって Hf-STJ の開発を進めてきた。これ まで、Hf 成膜、Hf 膜のパターン加工方法を確立し、2010 年度には、Hf-HfOx-Hf による SIS 構造の作 製に成功してジョセフソン電流を確認した (図 68 左)。また、2012 年度には Hf-STJ 試作サンプルでの 可視域連続光入射に対する応答(トンネル電流増加)を確認した。2017 年度の成果としては、Hf 成膜 の際、応力が最小になる条件ではなく表面粗さが小さくなる成膜条件 (表面粗さ RMS=2.5 nm)を使用 して Hf-STJ を作製し漏れ電流密度を従来の値から大幅な改善に成功し、温度 T=140 mK、200 μ m 角の Hf-STJ において漏れ電流 6 μ A@V_{bias} = 40 μ V を達成した。今後、より接合面積の小さい素子 の作製、漏れ電流の要因となり得る地磁気等の影響の排除、およびより低温での漏れ電流の測定による 正確な漏れ電流の測定により、漏れ電流改善に繋げることが、可視~遠赤外一光子射に対する応答測定 への重要なステップとなる。

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

SPring-8 の 2 軸回折計に全自動の粉末回折測定システムを導入した。システムは 6 つの 1 次元ピクセ ル検出器 DECTRIS 社製 MYTHEN によって構成される。既設のガス吹き付け装置と連携することで 90K から 1173K における温度変化回折データ自動連続測定システムを実現した。加えて、オートサン プルチェンジャーなどの機器と組み合わせることで、無人での全自動測定を可能とした (図 69)。高速 な試料状態の変化を追跡するために、2 種類のモードでの測定を可能にした。1 種類は、検出器を動か すことで回折角度の広い範囲を隙間なく測定するモードで一般的な測定に用いられる。この測定では、 同じ状態の試料で 2 回の X 線露光が必要となる。もう一種類は、検出器を回折角度のプラス側とマイ ナス側に交互に配置することで全回折角範囲を一度に測定する。この場合には 1 回の X 線露光で全体 の測定が可能になる。この成果を Rev. Sci. Inst. 誌に報告した。



図 69 SPring-8 に構築した全自動粉末回析測定システム

(7) 新しいヘテロダイン走査トンネル分光の開発(近藤)

近年ダブル光コム (dual comb) と呼ばれる特異な光を用いた精密分光の発展が著しい。dual comb と は、2つの光 comb を組み合わせた光であり、それぞれの光 comb は周波数軸上で櫛のように多数の成 分を飛び飛びに保持するという特徴を持っている。dual comb は MHz THz 域に自在に形成すること ができ、サイドバンドは広帯域な広がりを持つためテラヘルツ (THz) 精密分光においてプローブとし て期待されている光である。最大の特徴は dual comb を構成する 2 つの光コムのそれぞれの周波数成 分列の間の差周波数 Δ F を利用してヘテロダイン混合を行うことにより、瞬時に dual comb のみで測 定対称試料の振動状態や回転状態やスピンの状態などに関する様々な分光を精密に行える点である。す なわち、dual comb はスペクトルが密集した構造を持った THz 域の精密分光を実現する光源としての 資質を備えた光といえ、高速光短パルスが生起する二つの dual comb をヘテロダイン・ミキシングす ることで、増幅と検出が容易な新たなマイクロ波~THz 域のコム列の光を生起させて簡便な分光を実 現する可能性を持った光といえる。具体的には、波長、スペクトル線密度、帯域、線幅のそれぞれを任 意に高精度で変換し、PeV の分解能を持つマイクロ波分光法を THz 域に発展し適用することが可能に なると考えられる。このような中、我々はこの dual comb を走査トンネル顕微鏡 (STM) に導入し、 これまでにない、原子分解能を有する新しい dual comb ヘテロダイン・走査トンネル分光法を構築する ことを目的としている。

本研究で開発する dual comb HSTS 法では、スピンなどの微細構造の微小信号を精密に原子分解能で 計測することが可能となる。これは、comb がセンター周波数付近のスペクトル線の信号強度とバック ラウンドノイズの比 (C/N 比) が良いことが知られているためであり、精密分光の感度とダイナミッ クレンジを定める comb センター周波数付近に、より多くの comb スペクトルを密集させ、試料の吸収 線幅に一致した comb を任意作成し、目的のエネルギー領域に移動することにより実現可能となる。具 体的には、comb スペクトルの線幅と線密度が微細分裂に一致したスペクトル構造 comb を STM シス テムに導入することで、探針直下の測定対称試料のスピン励起が可能となり、同時に高精度な分光を実 現できることになる。これは、従来の ESR 共鳴周波数の RF の掃引による観測と比べて、より高分解 能と高感度分光となり、また測定はフーリエ変換を利用することで高速に実現される (分裂幅が数 MHz であれば原理的にはワンショットの速度(1秒程度)で実現可能)。また、周波数成分の変化を解析す ることでスピンの緩和など時間領域の解析も可能となる。

本研究によって開発する新しい分光技術は物理や工学への応用の他、生命科学、化学および医学など広い領域において活用される素質を生まれ持つものである。物質の原子レベルでのエネルギーレベルの微 細構造解析、励起線による試料の特異モードの励起とその吸収構造の解明など、大きく期待される次世 代の科学を牽引する可能性をもつ極限計測となる可能性がある。

研究は以下の2項目を並行させながら行うことで進めてきた。

【精密な dual comb の生成条件の確立】 これまでの研究により、すでに狭帯域光 comb による dual comb は作成方の考案はできていた。この dual comb は comb センター周波数を可変可能であり、その可変幅は MHz~THz 域におよんでいる。本研究では、comb スペクトルの線密度、帯域、線幅は任意に高精度に制御することが可能であるため、これを実現させてその生成条件を確立させた。

具体的な方法を記載する。dual comb は二つのパルスから作成する。広帯域の dual comb はフェムト 秒レーザのような極めて高速なパルスにより生起する。狭帯域 dual comb では、マイクロ波バースト・ パルスによって生起する。マイクロ波の搬送周波数が comb のセンター周波数となり、バーストパルス の周期と速度、パルス幅の制御から comb の線幅と線密度を制御する。狭帯域の場合は、このようなマ イクロ波パルスを 2 台同期運転することでマイクロ波 dual comb を生起することになる。同期運転し ているそれぞれの comb を構成する周波数成分列の間の差周波はマイクロ波信号源の周波数の制御によ り実現可能であり、それぞれのマイクロ波信号源はルビジウムによる参照信号により極めて高い安定度 を所持させるため、発生する差周波も同じ安定度を保持することとなる。

【STM への dual comb の導入と信号検出】 STM へ dual comb を導入し、トンネル電流の周波数成 分を解析することにより dual comb のヘテロダイン信号を検出した。この際、検出信号が試料バイア ス条件などでどのように変化するかを精密に計測し、トンネル接合でヘテロダインして生起した dual comb 信号であることを確実に抑えてきた。今後、原子分解能を有する dual comb を用いた世界最高感 度を有する分光装置が原理的に構成されることとなる予定である。

97



図 70 新しいヘテロダイン走査トンネル分光の開発

〈論文〉

- M. Yamada, K. Hara *et al.*, "Development of monolithic pixel detector with SOI technology for the ILC vertex detector", JINST 13 (2018) no.1 C01037.
- T. Miyoshi, K. Hara *et al.*, "Front-end electronics of double SOI X-ray imaging sensors", JINST 12 (2017) no.2 C02004.
- Y. Unno, Y. Ikegami, K. Hara *et al.*, "Development of n⁺-in-p planar pixel quadsensor flip-chipped with FE-I4 readout ASICs", JINST 12 (2017) no.1 C01084.
- 4. H. Fujii, K. Hara, S. H. Kim *et al.*, "Detection of on-surface objects with an undergroung radiography system using cosmic-ray", PTEP 2017, 053C01.
- 5. H. Fujii, K. Hara, S. H. Kim *et al.*, "Integrated cosmic muon flux in the zenith angle range $0 < \cos \theta < 0.37$ for momentum threshold up to 11.6 GeV/c ", PTEP 2017, 123C01.
- 6. 武政健一,金信弘,武内勇司,飯田崇史,浅野千紗,若狭玲那,笠島誠嘉,菅野洋信,COBAND 実験メンバー, "COBAND 実験 メンバー, "COBAND 実験 以 に 用いる Hf-STJ の 開発研究,"電子情報通信学会技術研究報告 117(223), 1-4 (2017).
- 7. 若狭玲那,金信弘,武内勇司,飯田崇史,武政健一,永田和樹,浅野千紗,笠島誠嘉,菅野洋信,COBAND 実験メンバー, "COBAND 実験に向けた極低温増幅器の研究開発,"電子情報通信学会技術研究報告 117(223), 5-8 (2017).
- S. Kawaguchi, M. Takemoto, K. Osaka, E. Nishibori, C. Moriyoshi, Y. Kubota, Y. Kuroiwa, and K. Sugimoto., High-throughput powder diffraction measurement system consisting of multiple MYTHEN detectors at beamline BL02B2 of SPring-8. Rev. Sci. Inst. 88, 085111, 2017.

〈研究成果発表〉

[国際会議]

- <u>K. Hara</u>, "Fine Pixel Detector FPIX Developed Based on SOI Technology", Technology and Instrumentation in Particle Physics 2017 (TIPP 2017), May 21-26, 2017, Beijing, China. (一般講演)
- S. H. Kim, "Development of Superconducting Tunnel Junction Photon Detectors with Cryogenic Preamplifier for COBAND experiment", Technology and Instrumentation in Particle Physics 2017 (TIPP 2017), May 21-26, 2017, Beijing, China. (一般講演)
- 3. K. Takemasa *et al.*, "Development of Superconducting Tunnel Junction Detector using Hafnium for COBAND experiment", Technology and Instrumentation in Particle Physics 2017 (TIPP 2017), May 22 26, 2017, Beijing, China. (ポスター)

E. Matsuyama, H. Oigawa, J. Nakamura, T. Kondo

- 4. <u>K. Hara</u>, "Recent Development of Silicon-on-Insulator Pixel Devices", VERTEX2017 (Les Caldas, Spain 2017年9月10-15日). (招待講演)
- <u>Y. Takeuchi</u>, "Development of STJ with FD-SOI cryogenic amplifier as a far-infrared single photon detector for COBAND experiment", 17th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD-17), July 17-21, 2017, Kurume, Fukuoka, Japan.
- <u>K. Takemasa</u>, "Status of Photo-Detector Developments Based on STJs for COBAND Project", Tsukuba Global Science Week 2017 (TGSW2017), Sep. 25 – 27, 2017, EPOCHAL Tsukuba, Tsukuba-shi, Japan. (招待講演)
- 7. C. Asano et al., "STJ detector developments for the Cosmic Background Neutrino Decay experiment", TGSW-IWP2017, Interdisciplinary Workshop on Science and Patents, September 25 27, 2017, EPOCHAL Tsukuba, Tsukuba-shi, Japan. (ポスター)
- 8. R. Wakasa *et al.*, "R&D of cryogenic SOI amplifier for COBAND experiment", Unification and Development of the Neutrino Science Frontier, March 5 6, 2018, Kyoto University, Kyoto, Japan. (ポスター)
- 9. <u>K. Takemasa</u>, "R&D status of Hf-STJ", Seminar at KAIST, March 16, 2018, KAIST, Taejong, Korea. (セミナー)
- 10. <u>K. Hara</u>, "Division for Development of Photon and Particle Detectors", Inaugural Symp. of the Tomonaga Center of the History of the Universe (Tsukuba, 2018 年 3 月 26-27 日). (招待講演)
- 11. <u>K. Hara</u>, "Development of Silicon-on-Insulator Pixel Devices", Inaugural Symp. of the Tomonaga Center of the History of the Universe (Tsukuba, 2018 年 3 月 26-27 日). (一般講演)
- J. Suzuki, "Development of ATLAS Pixel Detectors for the HL-LHC", Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26 – 27, 2018, Tsukuba, Japan.
- <u>R. Wakasa</u>, "R&D of quantum photo-sensor based on superconductor with cryo-SOI readout", Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26 – 27, 2018, Tsukuba, Japan.
- <u>S. Wada</u>, "Low-Gain Avalanche Detector (LGAD) for 4D Tracking", Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26 – 27, 2018, Tsukuba, Japan.
- Y. Ikegami, "Status of the ATLAS inner tracker for the Phase II upgrade", Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26 – 27, 2018, Tsukuba, Japan.
- 16. <u>A. Kasajima</u>, "Measurements of SOI FETs at Cryogenic Temperature",
- Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26 27, 2018, Tsukuba, Japan. 17. <u>C. Asano</u>, "R&D Status of Nb/Al-STJ with Cryogenic SOI amplifier for COBAND",
- Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26 27, 2018, Tsukuba, Japan. 18. <u>K. Takemasa</u>, "R&D Status of Hf-STJ for COBAND",
- Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26 27, 2018, Tsukuba, Japan. 19. <u>T. Yoshida</u>, "R&D Status of FIR source for STJ calibration for COBAND",
- Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26 27, 2018, Tsukuba, Japan.
- [国内学会]
 - 1. 浅野千紗:ニュートリノ崩壊光探索実験における STJ 検出器較正用光源の開発,
 - 第 7 回高エネルギー春の学校(2017 年 5 月 18–20 日),滋賀県大津市北小松,湖邸滋びわこクラブ.
 - 原和彦: FNAL, Test Beam の結果 FPIX, 第8回新学術領域研究会「3次元半導体検出器で切り拓く新たな量子イメージングの展開」(2017 年 6 月 29 30 日), 宮崎大学. (招待講演)
 - 3. 遠藤駿高エネルギービーム試験による SOI ピクセル検出 器 FPIX2 の評価,第8回新学術領域研究会「3次元半導体検出器で 切り拓く新たな量子イメージングの展開」(2017年6月29-30日),宮崎大学. (ポスター)
 - 4. 山内大輝:電荷積分型 SOI ピクセル検出器 FPIX2 のクロストー ク評価,第8回新学術領域研究会「3次元半導体検出器で切り拓く新たな量子イメージングの展開」(2017 年6月 29 30日),宮崎大学. (ポスター)
 - 5. 鈴木淳貴: HL-LHC 実験 ATLAS 検出器のアップグレードに向けたプラナー型微細ピクセル検出器の性能評価 1, 日本物理学会 2017 年秋季大会(2017 年 9 月 12–15 日), 宇都宮大学。
 - 6. 和田冴: ATLAS エンドキャップ用 R0 シリコンストリップセンサーの基礎特性評価,
 - 日本物理学会 2017 年秋季大会(2017 年 9 月 12-15 日), 宇都宮大学.
 - 7. 浅野千紗:COBAND 実験のための SOI-STJ の研究開発 III,
 - 日本物理学会 2017 年秋季大会(2017 年 9 月 12–15 日),宇都宮大学. 8. 若狭玲那: COBAND 実験のための SOI-STJ の研究開発 IV,
 - 日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017 年 9 月 12-15 日), 宇都宮大学.
 - 9. 武政健一:COBAND 実験のための Hf-STJ の研究開発 II,
 - 日本物理学会 2017 年秋季大会(2017 年 9 月 12-15 日),宇都宮大学.
- 10. 武政健一: COBAND 実験に用いる Hf-STJ の開発研究,
- 超伝導エレクトロニクス研究会 (SCE) (2017 年 10 月 4–5 日), 東北大学片平キャンパス. 11. 若狭玲那: COBAND 実験に向けた極低温増幅器の研究開発,
- 超伝導エレクトロニクス研究会 (SCE)(2017 年 10 月 4–5 日),東北大学片平キャンパス.
- 12. 金信弘:Introduction to Development of Superconducting Infrared Photon Detector for Cosmic Background Neutrino

Decay Search,

新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2017 (2017 年 12 月 11–13 日), 滋賀県大津市琵琶湖グランドホテル. 13. 武内勇司: Development of Far-infrared Spectrophotometers based on Superconducting Tunnel Junction (STJ) for COBAND Experiment.

新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2017 (2017 年 12 月 11-13 日), 滋賀県大津市琵琶湖グランドホテル.

- 14. 武内勇司: Feasibility of sub-GeV mass dark matter search using STJ detector for COBAND experiment, 新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2017 (2017 年 12 月 11–13 日), 滋賀県大津市琵琶湖グランドホテル. (ポスター発表)
- 武政健一: R&D status of Hf-STJ,
 新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2017 (2017 年 12 月 11–13 日), 滋賀県大津市琵琶湖グランドホテル.
- 若狭玲那: Development of cryogenic SOI amplifier for COBAND experiment, 新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2017 (2017 年 12 月 11–13 日), 滋賀県大津市琵琶湖グランドホテル.
- 17. 浅野千紗: Single Photon Detection by Nb/Al-STJ with Cryogenic SOI Amplifier for COBAND experiment, 新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2017 (2017 年 12 月 11–13 日), 滋賀県大津市琵琶湖グランドホテル. (ポスター発表)
- 原和彦: ITK Strip Detector, ATLAS 日本シリコンワークショップ(2017 年 12 月 20 - 21 日),大阪大学.
- 19. 和田冴: R0 センサー, ATLAS 日本シリコンワークショップ(2017 年 12 月 20 - 21 日),大阪大学.
 20. 鈴木淳貴:センサー特性の湿度依存性,
- ATLAS 日本シリコンワークショップ (2017 年 12 月 20 21 日),大阪大学. 21. 和田冴: Flex モジュール製造および検査,
- ATLAS 日本シリコンワークショップ (2017 年 12 月 20 21 日),大阪大学. 22. 内山和貴:55Fe による閾値実測,
- ATLAS 日本シリコンワークショップ (2017 年 12 月 20 21 日),大阪大学.
- 23. 原和彦,他:宇宙線ミュー粒子を用いた福島第一原子力発電所1-3号炉の核燃料デブリの観測, TIA 光量子シンポジウム (2018 年 2 月 7 日),つくば国際会議場. (ポスター発表)
- 24. 和田冴, 原和彦, 他: 4 次元飛跡検出器のための内部増幅機能付きシリコン LGAD の開発研究, TIA 光量子シンポジウム (2018 年 2 月 7 日),つくば国際会議場. (ポスター発表)
- 25. 岩波四季恵, 原和彦, 他:SOI 技術を用いた高位置分解能中性子検出器の開発研究, TIA 光量子シンポジウム(2018 年 2 月 7 日), つくば国際会議場. (ポスター発表)
- 26. 鈴木淳貴: HL-LHC ATLAS 検出器アップグレードに向けたストリップセンサーにおける IV 長期安定性と湿度依存性, 日本物理学会第 73 回年次大会(2018 年 3 月 22–25 日),東京理科大学野田キャンパス.
- 27. 内山和貴:ATLAS 検出器アップグレードに向けたピクセル検出器の性能評価,
- 日本物理学会第 73 回年次大会(2018 年 3 月 22–25 日),東京理科大学野田キャンパス.
- 28. 大鳴匡至:内部増幅機能つき半導体検出器 (LGAD) の中性子照射損傷の評価, 日本物理学会第 73 回年次大会(2018 年 3 月 22-25 日),東京理科大学野田キャンパス.
- 29. 和田冴:内部増幅機能付き検出器 (LGAD) の基礎特性評価, 日本物理学会第 73 回年次大会(2018 年 3 月 22-25 日),東京理科大学野田キャンパス.
- 30. 若狭玲那: COBAND 実験のための SOI-STJ の研究開発 VI, 日本物理学会第 73 回年次大会(2018 年 3 月 22-25 日),東京理科大学野田キャンパス.
- 31. 笠島誠嘉: COBAND 実験極低温増幅器開発に向けた FD-SOI FET 極低温特性の測定, 日本物理学会第 73 回年次大会(2018 年 3 月 22-25 日),東京理科大学野田キャンパス.
- 32. 武政健一: COBAND 実験のための Hf-STJ の研究開発 III, 日本物理学会第 73 回年次大会(2018 年 3 月 22-25 日),東京理科大学野田キャンパス.

^{第Ⅲ部} 資料
14 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57条の4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57条の5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。

15 ロゴ

宇宙史研究センター(朝永センター)のロゴを図 71 に示す。宇宙を内包した勾玉の首飾りをイメージしている(金谷和至 2017/10)。



図 71 宇宙史研究センター (朝永センター) のロゴとロゴタイプ

16 競争的資金獲得状況

職名	構成員名	研究代表者名	区分	種目	研究題目・寄附の目的等	金額(分担金)
教授	中井直正		科研費補助金・ 学術研究助成金	基盤研究A	大規模電波カメラによる「あかり」北極域の掃天 観測	¥900,000
助教	渡邉祥正		科研費補助金・ 学術研究助成金	若手研究B	巨大分子雲形成と星形成史を繋ぐ化学診断法の 開拓	¥1,300,000
教授	中井直正		その他	研究成果の社会還元・普及 事業	ひらめき・ときめきサイエンス	¥329,000
教授	久野成夫		受託研究	自然科学研究機構国立天 文台	大学間連携VLBI観測事業に係る研究—高精度 VLBI観測による銀河系の構造及び進化の解明	¥5,482,000
助教	新田冬夢		共同研究	自然科学研究機構国立天 文台	野辺山 45m 望遠鏡用 90-110GHz 帯レンズ結合 型 MKID カメラの開発	¥2,400,000
教授	金信弘		科研費補助金 · 学術研究助成金	新学術領域 計画研究	宇宙背景ニュートリノの崩壊探索に用いる超伝導 赤外線検出器の開発	¥12,900,000
准教授	武内 勇司		科研費補助金 • 学術研究助成金	挑戦的萌芽研究	半導体SOI回路と超伝導検出器STJの融合によ る革新的高感度検出器の開発	¥1,300,000
准教授	武内 勇司	金信弘	科研費補助金 · 学術研究助成金	新学術領域 計画研究	宇宙背景ニュートリノの崩壊探索に用いる超伝導 赤外線検出器の開発	¥600,000
教授	吉田 拓生	金信弘	科研費補助金• 学術研究助成金	新学術領域 計画研究	宇宙背景ニュートリノの崩壊探索に用いる超伝導 赤外線検出器の開発	¥600,000
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 計画研究	ヒッグス粒子で探る真空と世代構造	¥10,530,000
助教	佐藤 勇二		科研費補助金 学術研究助成金	基盤研究(C)	ゲージ理論-重力理論双対性と可積分性を用い た強結合ゲージ理論の研究	¥900,000
教授	石橋 延幸		科研費補助金• 学術研究助成金	基盤研究(C)	弦の場の理論を用いた超弦理論・D-ブレーンの 研究	¥1,040,000
助教	伊敷 吾郎		科研費補助金• 学術研究助成金	若手研究(B)	超弦理論の非摂動的定式化についての研究	¥7,800,000
准教授	原 和彦	坪山 透	科研費補助金• 学術研究助成金	新学術領域 計画研究	高輝度加速器実験のための素粒子イメージング	¥1,560,000
准教授	原 和彦	代表	その他	日仏素粒子物理学研究所 (FJPPL-TYL)	HL-LHC用p型プラナーセンサーの開発	¥450,000
准教授	原 和彦	新井康夫	その他	かけはし	3次元積層半導体量子イメージセンサの調査研 究	¥100,000
准教授	武内 勇司	田島 治	その他	かけはし	簡単・便利な超伝導計測 - 100倍精度の計測を 非専門家の手で	¥100,000
准教授	武内 勇司		その他	日米科学技術協力事業(高 エネルギー物理分野)	特別枠(日米事業将来計画に関する協力)	¥918,000
助教	飯田 崇史		科研費補助金 学術研究助成金	若手研究(B)	高発光量ヨウ化物シンチレータによる宇宙暗黒物 質探索のための基礎研究	¥2,340,000
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「ニュートリノフロ ンティアの融合と進化」公募研究	セルフトリガー可能な24Na線源の開発とCaF2検 出器の低バックグラウンド化	¥2,990,000
助教	飯田 崇史		その他	東北大学金属材料研究所共 同利用研究•若手萌芽研究	ヨウ化カルシウム(Cal2)シンチレータ結晶の開発 と基礎物理への応用	¥230,000
教授	三明康郎		科研費補助金· 学術研究助成金	基盤研究(B)	Di-Jet 識別装置を用いたグルオン衝撃波の探索	¥4,160,000
准教授	江角晋一		科研費補助金· 学術研究助成金	日米科学技術協力事業	相対論的重イオン加速器を用いたクォーク・グ ルーオン・プラズマと QCD 相図の研究	¥5,200,000
准教授	江角晋一		科研費補助金· 学術研究助成金	伊藤科学振興会研究助成	原子核衝突ビームエネルキー走査による高密度 クォーク核物質の研究	¥1,000,000
講師	中條達也		科研賀補助金 学術研究助成金	基盤研究(A)	ALICE 実験ジェットと前方光子で探る高温クオーク物質生成の起源	¥9,490,000
講師	中條達也		科研費補助金 · 学術研究助成金	挑戦的萌芽研究	高エネルキー実験のための10ビコ杉飛行時間測 定器の開発	¥438,000
講師	中條達也		科研費補助金• 学術研究助成金	日仏素粒子物理学研究	weasurements of Jets and Photons in Heavy Ion Collisions at the Highest Beam Energy during the LHC-Run 2 by ALICE	¥500,000

17 共同研究・受託研究

職名	構成員名	相手先機関	金額	期間	内容
教授	久野成夫	自然科学研究機構国立天文台	¥5.482.000	2017年4月1日- 2018年3月31日	大学間連携VLBI観測事業に係る研究―高精度 VLBI観測による銀河系の構造及び進化の解明
助教	新田冬夢	自然科学研究機構国立天文台	¥2,400,000	2017年4月1日- 2018年3月31日	野辺山 45m 望遠鏡用 90-110GHz 帯レンズ結 合型 MKID カメラの開発
教授	三明康郎	CERN研究所(スイス・フランス)		2007~	LHC-ALICE実験 国際共同研究
准教授	江角晋一	BNL研究所(アメリカ)		2000~	RHIC-PHENIX実験 国際共同研究
准教授	江角晋一	BNL研究所(アメリカ)		2017~	RHIC-STAR実験 国際共同研究

18 各種受賞等

職名	構成員名	共同受賞者名	賞名	受賞課題•受賞論文名	受賞年・月・日	団体名
助教	伊敷吾郎	浅野侑磨、 岡田崇、 島崎信二	第12回(2017年度) 素粒子メダル奨励賞	Emergent bubbling geometries in the plane wave matrix model	2017.9.14	素粒子論 グループ
				For their outstanding contributions to		Joint Institute
		WANG Yifang		the study of the neutrino oscillation		for Nuclear
		(IHEP北京)		phenomenon and to the measurement of		Research
		西川公一郎	2016年度 Bruno	the Theta_13 mixing angle in the Daya		(JINR), Dubna,
教授	Kim Soo-Bong	(KEK)	Pontecorvo 賞	Bay, RENO and T2K experiments	2017.9.19	Russia

19 新聞等報道・特記事項

職名	構	成員名	共同発表者名	新聞 雑誌名	報道内容	年·月·日
教授	久	野成夫	国立天文台、名 古屋大、上越教 育大、鹿児島大	信濃毎日新聞	筑波大学が国立天文台、名古屋大などと推進している天の川の 広域分子輝線観測に関して、"天の川詳細な「電波地図」"と報道	2018.1.26
教授	原金	和彦 信弘	高崎史彦(KEK)	產経新聞	筑波大がKEK.首都大学、IRIDと推進しているミューオンラジオグ ラフィーの研究について「宇宙線使い溶融燃料調査、3号機で来 月着手 1、2号機では実施済み」と報道	2017.4.30
教授	原 金	和彦 信弘	高崎史彦(KEK)	東京新聞	筑波大がKEK,首都大学、IRIDと推進しているミューオンラジオグ ラフィーの研究について「ミュー粒子で3号炉内調査」と報道	2017.5.10
准教授	原	和彦	坪山透(KEK)	筑波大学プレ スリリース	SOI技術を用いた素粒子実験用センサーについて「世界最高精 度の放射線測定センサーを開発」をKEKと筑波大で共同発表	2017.6.23
教授	原金	和彦 信弘	高崎史彦(KEK)	毎日新聞	筑波大がKEK.首都大学、IRIDと推進しているミューオンラジオグ ラフィーの研究について「3号機原子炉『溶け落ち核燃料残って おらず』」と報道	2017.7.27

20 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	中井直正	欧文研究報告編集顧問	日本天文学会	~2019年5月
	1716-			2010年7月~
教授	由井直正	VI BI小秊昌슺秊昌	国立天文台	2018年6月
7712	小川直正			2010 <u>年</u> 0月 2017年1日~
<u></u> 歩	由共直正	SPR Steering Committee	The SCAR AAA	2017年17日
3 712	千斤直正			2010年12月
*++==	中共市工	<u> </u>	国立扬地研究部	2008年3月19
<u> </u>	中井直正	谷貝狄技	国立極地研究所	2019年3月
*1-177	ᄼᄧᅷᆠ	プロジ 실 패クチョ 스チョ	同去工去人	2014年4月~
<u> </u>	久野成大	ノロシェクト評価安良会安員	国业大义合	2018年6月
		<u>此上现式和生活优美日</u>		2009年4月~
教授	<u> </u>	欧又研究報告編集委員	日本大文字会	2018年6月
				2008年7月~
教授	久野成夫	ALMA小委員会委員	国立天文台	2017年7月
				2016年7月~
教授	久野成夫	電波専門委員会委員	国立天文台	2018年6月
				2017年6月~
教授	久野成夫	研究奨励賞選考委員会委員	国立天文台	2019年5月
		特別研究員等審査会専門委員 / 国際事		2016.8 -
助教	佐藤 勇二	業委員会書面審杳員·書面評価員	日本学術振興会	2017.7
			素粒子論グループ・素粒子論サブグ	2017.4 -
助教	伊敷 吾郎	素粒子論委員 会計	ループ	2019.3
211X				2010.0
<u></u> 数	石楂 矿幸	DTFD编集委员	日本物理学会,理論物理学刊行会	20144 -
3 712	山间 建千		日本物理于去	2014.4
*	丁扬 双去	艾壬禎兄弟,始本 书日	口士物理学会	00174 (0左)
<u> </u>	口筒 延辛	石于突励良选考安良	口平彻理子云	2017.4 - (2 年)
*1-177	T+F 7T +	光へ計司信告チョト	口士作用举入	
教技	石橋 延辛	字会誌副編集安貝長	日本物理学会	2017.4 - (2年)
		井ᆊᄔᇑᄴᇑᆃᅎ <u>ᇦᄴᅝᄥᇫᆂᇦ</u>		
教授	石橋 延幸	基礎物理字研究所運宮協議会委員	京都大字	2017.4 - (2年)
教授	石橋 延幸	木村利栄理論物理学賞選考委員長	湯川記念財団	
				2017.4 -
教授	石橋 延幸	客員教授	東京大学大学院総合文化研究科	2018.3
		日本学術振興会学術科学研究費委員会		
准教授	原 和彦	委員	日本学術振興会	2年
			Exploring the Dark Side of the	
准教授	原 和彦	組織委員会委員	Universe, International Symposium	2年
		日本学術振興全特別研究昌宗本会审問		
		「ロ本子前派兵去付加切九員街直去守」」		2016.9
また あんしょう あんしょう あんしょう あんしょう あんしょう あんしょう あんしょう あんしょう あんしょう しょう しょう しょう しょう しょう しょう しょう しょう しょう	全公 和五	女良びい当际中未女員云音回留宜員" まあずに各	口木学術店画合	2010.0 -
我按	亚谷 仙主	百四計 貝	山平于刚派宍云	2017.1
¥6+∞	办 公 和万	口士协理学会化学员	口卡梅理觉会	2017.4 -
<u> </u>	並合 和主		口平彻理子云	2019.3
+/_ 1	A (1	加述奋共通基盤研究施設建呂会議/委		2015/6 -
教授	金谷 和全	貝,人爭妥貝会/委員	高エネルキー加速器研究機構	2019/3
14.1-				2015/8 -
教授	金谷 和至	人材育成マネジメントグループ/委員	つくばイノベーションアリーナ	2019/3