

領域略称名：真空と時空  
領域番号：2803

令和3年度科学研究費助成事業  
「新学術領域研究（研究領域提案型）」  
に係る研究成果報告書（研究領域）兼  
事後評価報告書

「ヒッグス粒子発見後の素粒子物理学の新展開  
～LHCによる真空と時空構造の解明～」

領域設定期間

平成28年度～令和2年度

令和3年6月

領域代表者 東京大学・理学系研究科・教授・浅井 祥仁

# 目 次

## **研究組織**

1	総括班・総括班以外の計画研究	2
2	公募研究	3

## **研究領域全体に係る事項**

3	交付決定額	6
4	研究領域の目的及び概要	7
5	審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況	9
6	研究目的の達成度及び主な成果	11
7	研究発表の状況	16
8	研究組織の連携体制	21
9	研究費の使用状況	22
10	当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況	24
11	若手研究者の育成に関する取組実績	25
12	総括班評価者による評価	26

**研究組織** (令和3年3月末現在。ただし完了した研究課題は完了時現在、補助事業廃止の研究課題は廃止時現在。)

**1 総括班・総括班以外の計画研究**

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
X00 総	16H06488 ヒッグス粒子発見後の素粒子物理学の新展開～LHCによる真空と時空構造の解明～	平成28年度～ 令和2年度	浅井祥仁	東京大学 理学系研究科 教授	1
Y00 国	16K21730 ヒッグス粒子発見後の素粒子物理学の新展開～LHCによる真空と時空構造の解明～	平成28年度～ 令和2年度	浅井祥仁	東京大学 理学系研究科 教授	1
A01 計	16H06489 超対称性の発見で構築する新たな時空像	平成28年度～ 令和2年度	陣内修	東京工業大学 理学院 教授	4
A02 計	16H06490 標準模型を超える素粒子模型と新たな時空像	平成28年度～ 令和2年度	山口昌弘	東北大学 理学研究科 教授	3
B01 計	16H06491 ヒッグス粒子で探る真空と世代構造	平成28年度～ 令和2年度	花垣和則	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 教授	3
B02 計	16H06492 電弱対称性の破れと世代構造の統一的真空像	平成28年度～ 令和2年度	久野純治	名古屋大学 素粒子宇宙起源研究所 教授	3
C01 計	16H06493 トップクォークで探る真空と時空	平成28年度～ 令和2年度	戸本誠	名古屋大学 理学研究科 特任教授	2
C02 計	16H06494 LHCでの未知重粒子探索	平成28年度～ 令和2年度	石野雅也	東京大学 素粒子物理国際研究センター 教授	4
<b>総括班・総括班以外の計画研究 計 8 件 (廃止を含む)</b>					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

## 2 公募研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
公	17H05395 超弦理論におけるモジュライの物理について	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	小林 達夫	北海道大学 理学研究院 教授	1
公	17H05396 レプトンセクターにおける LHC 新粒子探索と新しい物理描像	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	横崎 統三	東北大学 理学研究科 助教	1
公	17H05397 時空構造の解明へ向けた量子論の枠組みにおける弱い等価原理の検証	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	神谷 好郎	東京大学 素粒子物理国際研究センター 助教	1
公	17H05398 真空のポンプ・プローブ実験による真空構造の解明	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	難波 俊雄	東京大学 素粒子物理国際研究センター 助教	1
公	17H05399 超対称 ttH プロセスで探る真空像	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	竹内 道久	東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構 特任研究員	1
公	17H05400 加速器実験と宇宙観測に基づく時空の構造の解明	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	柿崎 充	富山大学 大学院理工学研究部 准教授	1
公	17H05402 超対称素粒子模型の真空構造解明とインフレーション宇宙の新展開	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	石渡 弘治	金沢大学 数物科学系 助教	1
公	17H05404 フレーバー物理による暗黒物質と真空構造の解明	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	大村 雄司	名古屋大学 基礎理論研究センター 准教授	1
公	17H05405 精密分光によるヒッグス湯川力の解明に向けた理論研究	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	田中 実	大阪大学 理学研究科 助教	1
公	17H05406 CMB 偏光超精密観測に用いる非駆動型偏光変調器の開発	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	石野 宏和	岡山大学 自然科学研究科 教授	1
公	17H05407 高時間・空間分解能を持つ新型シリコンセンサーの開発	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	末原 大幹	九州大学 理学研究院 助教	1

公	17H05408 フレーバー物理による UV 理論に動機付けされた複合ヒッグス模型の研究	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	進藤 哲央	工学院大学 教育推進機構 教授	1
公	19H04605 湯川結合とコンパクト空間	令和元年度 ～ 令和 2 年度	小林 達也	北海道大学 理学研究院 教授	1
公	19H04606 軽い暗黒物質探索を目指した超伝導検出器の開発	令和元年度 ～ 令和 2 年度	石徹白 晃治	東北大学 ニュートリノ科学研究センター 准教授	1
公	19H04607 (廃止) ヒッグス場有効理論を用いた新物理の探索	採用後辞退	長井 遼	東北大学 理学研究科 学術研究員	0
公	19H04608 超伝導検出器で切り開く Sub-GeV の軽い暗黒物質探索	令和元年度 ～ 令和 2 年度	木内 健司	東京大学 大学院理学系研究科 助教	1
公	19H04609 超対称性暗黒物質の質量の上限についての研究	令和元年度 ～ 令和 2 年度	白井 智	東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構 特任助教	1
公	19H04610 素粒子標準模型で探る初期宇宙	令和元年度 ～ 令和 2 年度	鎌田 耕平	東京大学 大学院理学系研究科 助教	1
公	19H04611 光子・光子コライダーによる真空構造の探索	令和元年度 ～ 令和 2 年度	難波 俊雄	東京大学 素粒子物理国際研究センター 助教	1
公	19H04612 ミューオン異常磁気能率と標準模型を超える物理	令和元年度	濱口 幸一	東京大学 大学院理学系研究科 准教授	1
公	19H04613 トラック情報と深層学習を用いた LHC における暗黒物質探索	令和元年度 ～ 令和 2 年度	竹内 道久	名古屋大学 素粒子宇宙起源研究所 准教授	1
公	19H04614 新物理探索と暗黒物質物理に基づくフレーバー構造の起源の解明	令和元年度 ～ 令和 2 年度	大村 雄司	近畿大学 理工学部 講師	1
公	19H04615 宇宙暗黒物質から探る真空の構造	令和元年度 ～ 令和 2 年度	阿部 智広	名古屋大学 高等研究院 特任助教	1

公	19H04616 量子固体中の分子を標的とした新しい アクション探索手法の原理検証	令和元年度 ～ 令和2年度	宮本 祐樹	岡山大学 異分野基礎科学研究所 研究准教授	1
公	19H04617 宇宙線全電子スペクトルの微細構造に よる暗黒物質の間接探索	令和元年度 ～ 令和2年度	浅岡 陽一	早稲田大学 理工学術院総合研究所 主任研究員	1
公	19H04618 ミューオン原子の分光による新物理探 索	令和元年度 ～ 令和2年度	神田 聡太郎	高エネルギー加速器研究 機構 物質構造科学研究所 助教	1
<b>公募研究 計 26 件 (廃止を含む)</b>					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

## 研究領域全体に係る事項

### 3 交付決定額

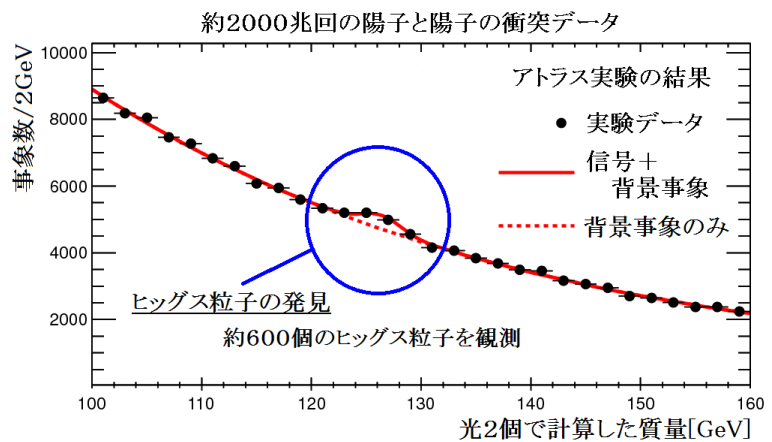
年度	合計	直接経費	間接経費
平成 28 年度	201,500,000 円	155,000,000 円	46,500,000 円
平成 29 年度	281,450,000 円	216,500,000 円	64,950,000 円
平成 30 年度	278,200,000 円	214,000,000 円	64,200,000 円
令和元年度	287,170,000 円	220,900,000 円	66,270,000 円
令和 2 年度	289,120,000 円	222,400,000 円	66,720,000 円
合計	1,337,440,000 円	1,028,800,000 円	308,640,000 円

#### 4 研究領域の目的及び概要

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時の領域計画書を基に、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、どのような点が「革新的・創造的な学術研究の発展が期待される研究領域」であるか、研究の学術的背景や領域設定期間終了後に期待される成果等を明確にすること。

##### 研究の学術的背景

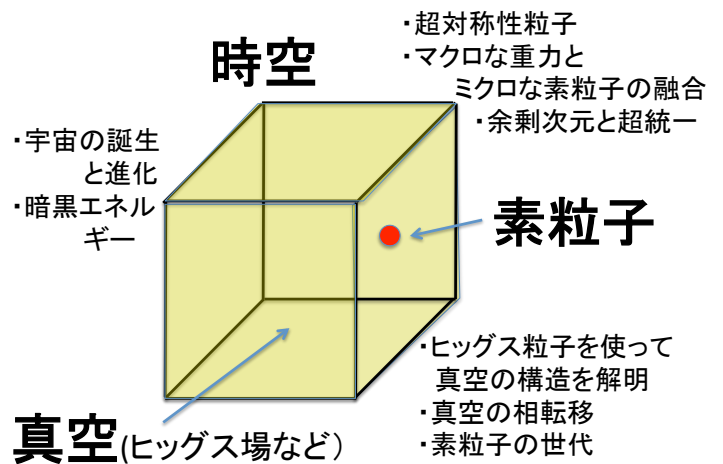
2012年ヒッグス粒子がLHCで発見された。(右図はヒッグス粒子が二つの $\gamma$ 線に崩壊した場合で、二つの $\gamma$ 線の不変質量分布中125GeVの所に、ヒッグス粒子起源のピークが観測されている。)ヒッグス粒子の発見が大事なのではなく、真空中に高いエネルギーを与えるとヒッグス粒子が励起されたことから、真空中に場が潜んでいたことを発見したことが重要である。真空は空っぽなのではなく、



ヒッグス場で満ちており、その変化(相転移)で宇宙が進化してきたことを示す。この真空の研究の重要性は翌2013年ノーベル物理学賞のスピード受賞につながっている。

##### 本研究領域の目的と全体構想

本申請領域の目的は、上で述べた重要性を更に推し進め、従来の素粒子研究から、素粒子をプローブとして、その背景にある「真空」や「時空」の研究へとパラダイムシフトすることである。右図に示したように 従来の素粒子研究を拡張し、時空、真空、素粒子を融合する新しい領域を創成するものである。真空の研究で、真空の構造解明や素粒子の世代を解明し、真空の相転移の研究を宇宙の進化などへと研究を広げる。時空の研究は、超対称性粒子など新しい素粒子現象の発見を核に、素粒子と時空を結びつけ、新しい時空像に迫っていく。最終的に、時空-真空の関係の解明につなげる全体構想である。



時空・真空・素粒子の研究を深めていく為に、3つの研究項目と6つの計画研究を設置した。

- ① 時空班 超対称性粒子の発見を元に、時空と素粒子を結ぶ新しい原理を追求する。
- ② 真空班 すでに発見されたヒッグス粒子を用いて、真空の構造の解明をすすめる。
- ③ 重粒子班 特に時空や真空と深い繋がりがあるトップクォークとW/Zゲージ粒子を用いて標準理論を超える新しい素粒子現象を直接・間接両面にわたって探索する。

中心的にある実験施設は、世界で唯一、テラスケール (TeV=10<sup>12</sup>電子ボルトのエネルギースケール)の研究が可能である世界最高エネルギー加速器LHC(右図)である。この施設を中心に、素粒子・時空・真空の研究と、これらと宇宙とを結ぶ計画・公募研究を、総括班が結びつけてブレークスルーを目指す。



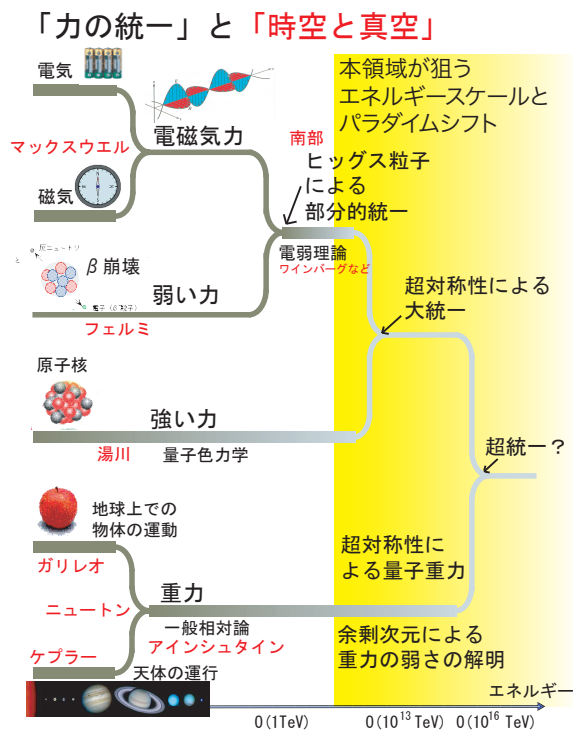
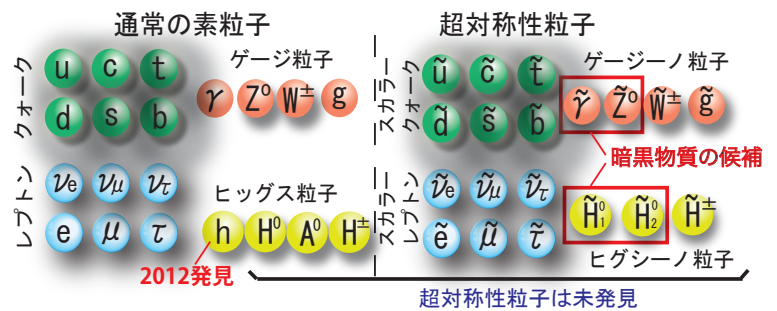


革新的・創造的な学術研究の発展が期待

- ① 湯川、朝永、小柴、南部、小林、益川、梶田、七氏のノーベル物理学賞受賞に示される様に、我が国の素粒子物理学の研究水準は国際的にも極めて高く、これを継承、発展させて行くことは我が国の学術水準の向上・強化に計り知れない大きな効果がある。さらに本研究領域は、素粒子研究を、その背景にある時空や真空の研究にパラダイムシフトさせる革新的な研究である。重力波の発見はマクロな時空像（アインシュタイン方程式で表される）の確立に繋がったが、前ページの図にあるように、素粒子が見るようなミクロな量子的な時空像への展開が 21 世紀に新しい物理学を切り拓くものである。
- ② 世界最高エネルギー加速器 LHC 実験での国際共同研究で、若手の研究者が長期に国際的な研究の場で活躍することができる。このことが、我が国の学術水準の高さを世界に示すばかりでなく、国際共同研究のロールモデルとして重要であり、今後の国際共同研究の推進に資する。国際的共同研究で、日本の研究者が現場でプレゼンスや創造的な成果を出すことで、今後の国際共同研究への太いアクセスが可能になり当該領域の発展につながる。
- ③ 素粒子物理学ばかりでなく宇宙物理学など関連分野の格段の発展・飛躍的な展開につながる。未踏のテラスケール領域での新現象を核に、標準理論を超える新しい素粒子像を創ることは、素粒子研究分野に、計り知れない飛躍的な発展をもたらすものである。真空の構造や暗黒物質、時空の解明を通して、基礎となる自然観の変革をもたらす。

領域設定期間終了後に期待される成果等

- ① LHC 加速器を用いて、125GeV のヒッグス粒子から自然に期待される新しい素粒子現象を発見する。特に 125GeV のヒッグス粒子の存在の自然さから期待される超対称性（右上図）は、4次元の時空を、時空+スピン空間へ拡張する新しい概念であり、ミクロな重力（時空：量子重力）への重要な一歩であると同時に、暗黒物質の解明に繋がる。
- ② 発見したヒッグス粒子を用いて、真空の構造を探る。質量の起源や世代の解明ばかりでなく、相転移のメカニズムを通して、宇宙の進化や将来を探る。
- ③ ①や②の成果を、公募研究、他の領域などと協力して、理論的な理解を深め、素粒子・真空・時空を融合し、新しいパラダイムを構築する。超対称性の発見により大統一、量子重力の解明による超統一（右図）がその例である。
- ④ 更にこのパラダイムを発展させるため次世代の加速器実験の中核となる技術開発を行う。



## 5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

研究領域全体を通じ、審査結果の所見及び中間評価結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該指摘及びその対応状況等について、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

(審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況)

### 留意事項

- 1) 新たな学術領域を創成するという目的を改めて確認し、素粒子物理学に閉じることなく他分野に対する波及効果を強く意識した運営を行うこと。
- 2) 研究項目 A02 及び B02 において、理論的なアプローチを行う計画研究がそれぞれ組織されているが、より効果的に両計画研究は強く連携するとともに、研究費の面からもより効率的な運営に努めること。

### 対応：留意事項（1）について

素粒子物理学を中心に据え、宇宙物理、深層学習、量子コンピュータと3つの方向への波及効果を意識して運営を行った。

- A) 真空や時空の研究は、ミクロの視点としての素粒子研究とマクロな視点としての宇宙研究の両輪で行う必要がある。領域発足当初から、宇宙の誕生と進化の解明への波及効果は強く意識して運営を行ってきた。2回の公募研究で積極的に宇宙物理学・宇宙線物理学のテーマをエンカレッジし、領域の成果として取り込んでいった。15回の国際会議を宇宙物理の視点を取り込んで開催した。暗黒物質について、宇宙線研究所との共催で国際会議を2回開催した。これらの共同研究によって、宇宙関連、宇宙線関係の論文を26通完成し発表した。
- B) 大型素粒子実験のデータは、非常に複雑で多様である一方で、標準理論と言うしっかりした原理に基づいているため、答えが正確にある複雑データの深層学習の研究テーマに適している。この方向の研究をひろげていった。素粒子実験の膨大な実験データを用いて、「AIがエネルギー運動量保存則を発見できるか？」と言うテーマで「科学するAI」の開発を民間企業と行っている。これと並んで、データを扱う従来のAIから、「知識を扱うAI：知識を学ぶAI」への挑戦を筑波大学・天笠教授と開始した。宇宙・天文学・素粒子物理学の論文の帰結を学ばせて、これらを融合した新しい知見を発見できるかを開発するものである。これらの研究は、領域発足の後半より始めたため、まだ十分な成果があがっていないが、学会での国際学会招待講演2回、国内学会基調講演1回、修士・博士論文23本の研究をおこなってきた。これからの広がりや新しい学問領域への成長が期待できる。
- C) 深層学習の最新の成果を取り込んで、素粒子研究の研究感度を向上させてくることも積極的に行った。素粒子研究では、20世紀末から、積極的にニューラルネットワークなどの成果を研究に取り込んできてきたが、最新の深層学習を用いることで、複雑な区別能力（ボトムクォーク起源であるなどの判断）が飛躍的に高度化した。これにより従来は難しいと思われてきたヒッグス粒子がボトムクォーク対に崩壊する現象を発見できた。（P.13 成果参照）
- D) NISQ と呼ばれるノイズのある量子コンピュータ（QC）を、素粒子研究に応用することを、CERN、米国 Fermi 研究所、LBNL 研究所と共同で始めた。複雑な飛跡の再構成（QCの「最適化問題」に対応）や、QCの量子的な表現力を用いてパートンシャワーと呼ばれる非線形な量子効果のシミュレーションに応用するなどの成果（国際学会招待講演5、論文2）があがった。これら量子コンピュータの応用研究が評価されて、領域の担当者が東京大学の「Q-Native 人材育成事業」を担うことになった。

### 対応：留意事項（2）について

- A) 時空の理論研究（A02）と真空の理論研究（B02）とは、総括班主催の「テラスケール研究会」での意見交換ばかりでなく、共同研究を行っている。P.11 成果の真空の準安定性は共同研究の成果である。また、人事交流を2名行うなどの連携もとってきた。

B) 導入するコンピュータの費用の削減を行った。不足分は、古いコンピュータ資源の寿命を超えた運用によるものと、他の計画研究で購入したコンピュータ資源を一時的に借用するなどに対応し、研究を遂行してきた。得られた資金は、若手人材の育成に回し、領域の成長に大きく寄与した。国内旅費の削減（総括班やすべての計画班共通）：打ち合わせなどは、できる限り ZOOM などのビデオ会議などのシステムを用いることで、国内旅費の削減を行った。総括班会議も、研究会の時に往く以外は、ビデオ会議を用いて、移動の時間と経費の節約に努めた。

**（中間評価結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況）**

**所見** 他分野への波及性、研究項目間の連携にも一定の努力は認められるが、研究領域全体としての成果をより明確に発信することが求められる。新学術領域研究によって具体的にどのような研究展開やコミュニティ形成があり、どのように当該研究分野の発展に寄与したかについて、より明確な説明が必要である。

**対応** 他分野へは、これまで以上に大きな波及効果を目指した（前ページを参考）。本領域の成果は「テラスケール研究会」と言う常時100名を超える参加が得られたコミュニティの形成である。アカデミアのみでこれだけの研究者が定常的に参加し議論が行われ、エネルギーフロンティアの素粒子研究者のみならず宇宙物理関係者までもが常時参加するコミュニティへとなっている。ここでは最新のLHCなどの研究やアノマリーの議論がなされ、研究の方向性を決めてきた。本領域はこういった分野を越えた研究者コミュニティを形成し発展させてきた。（P. 21連携体制参照）

深層学習に特化した素粒子の研究会を行い、コミュニティの中に新しい発展を積極的に持ち込み、研究分野の発展に大きく寄与してきている。

---

**留意事項 1** 研究成果や実験結果をより分かりやすく伝えられるような工夫が求められる。

**対応** 専門的になってしまっていたことを反省している。ホームページ（領域のページや関連ページ）の情報を増やすと同時に、真空・ヒッグス場の意味や、超対称性粒子の講義ビデオなどを製作して公開している（代表者のページ）。また、一般講演会やメディアなどへの発信も続けている。非常にエキサイティングな状況であり、今後もアカデミアだけでなく、広く発信をしていく予定である。実験成果については、間接的ながら見つかった新現象を次ページ（P. 11）に分かりやすくまとめた。

**留意事項 2** 巨大な研究プロジェクトが順調に進んでいる中で、新学術領域研究による成果が曖昧であるため、他の大型研究費による成果と分別した説明が必要である。

**対応** いろいろな誤解があるようなので今後も発信していきたいと思う。大型研究費は、大型の機器（検出器）の製作費用のみである。例えば、本領域の中心的な実験装置である LHC 加速器と ATLAS 検出器の製作に大型研究費が出る。しかし、それは機器の製作で終わりである。研究費用は含まれない。実験や解析などの費用は、本領域がカバーしている。これは、スプリング 8 などの設備は理研が作って、そこに科研費でユーザーが実験を行っていることと同じパターンである。1998 年の特定事業科研費が発足して、当時の LEP 実験から今日まで、このパターンが続けられている。

日本の研究者や大学院生が多数、現地 CERN に滞在し、実験データの較正や機器の運用を行い、実験の中心的な役割（実験総責任者は当領域の研究者）を果たし、得られたデータを解析し、その結果を理論の研究者と解釈をしながら学術的な成果を出している。その成果を発展させていく、次世代実験の基幹技術や設計の R&D も本領域の予算で行っている（デザインが決まれば量産は大型研究費の別予算）。繰り返しになるが、大型実験装置製作費だけは別予算で、設計・実験の実施・成果を出すことは本領域の予算である。日本の研究者が主体的に行った成果を、この報告書 P. 11 からの成果や論文にあげてある。国際的に得られた評価が P. 24、若手育成を P. 25 にあげてある。

---

**参考意見** 総括班評価者について、緊密に関連する同じ分野の研究者だけではなく、もう少し範囲を広げた分野の研究者を加えるべきではないかという意見があった。

**対応** 重要な指摘であると考え。今回から、大阪大学 核物理研究センター・中野貴志センター長にも評価者に加わって頂いた。

## 6 研究目的の達成度及び主な成果

(1) 領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、(2) 本研究領域により得られた成果について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。(1)は研究項目ごと、(2)は研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。

(1) 何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか？

主要な研究テーマは、3つの研究項目で共同して進めている。

・本領域の研究主目的は、発見したヒッグス粒子などを用いて、時空・真空を探り、新しい素粒子現象を発見することにある。その成果を、初期宇宙や重力波などへひろげていくことにあり3つの研究項目で共同して進めている。(期待される成果①③に対応)

A) ヒッグス粒子(研究項目B)とトップクォーク(研究項目C)の性質を詳細に調べることで我々の宇宙の「真空」が安定で無く、準安定であることが判明した(右上図)。実験と理論が共同で研究をすすめた成果である。真空を探ることが出来た初めての成果である。

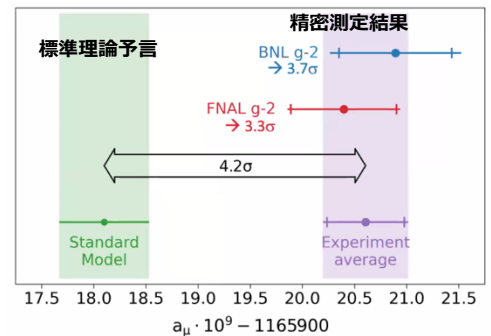
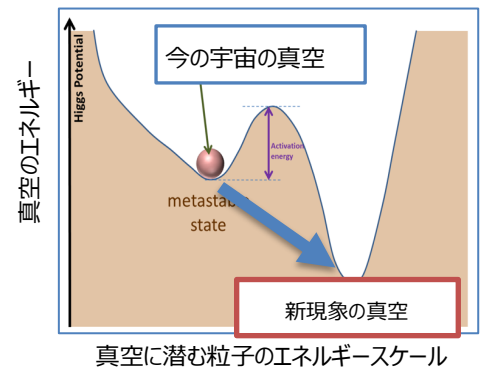
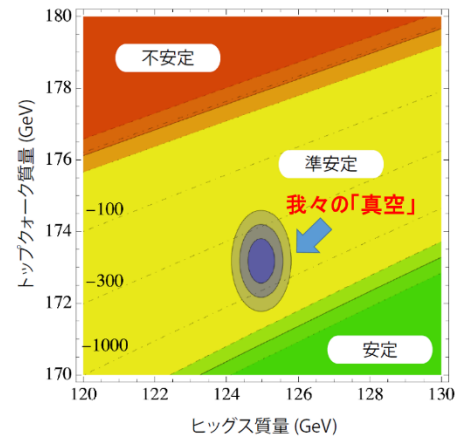
準安定であることの意味は、何か新現象に対応した、より安定状態の存在を意味しており、新しい真空の構造の発見、標準理論を超えた新現象の存在の実験的な証拠である。(右中図)

B) この新現象は、時空と関係した超対称性か、あるいは別の現象かは真空の研究からだけでは不明である。領域全体でLHCでの実験成果を吟味し、更に様々な実験で報告されているアノマリーについての検証を、テラスケール研究会でサブジェクトに分けて行った。米国での実験で報告(2021年4月に別の実験でズレが再確認された。右下図)されているミューオン異常磁気能率(muon g-2)の標準理論からのズレが、この新現象に対応している可能性があり、公募研究と時空(研究項目A)研究で、LHC実験での信号が詳細に研究された。LHC実験でのゲージノ・スカラーレプトンの発見が強く示唆されている。

C) この期待されている新現象は、LHCで発見が可能であり、この新現象を直接発見するために、LHCの第3期実験の準備を領域全体で行った。発見が難しい領域を研究するために、衝突頻度の増強などの実験準備を完了した。また発見能力を著しく高めるため、機械学習を取り入れることなどを行い、素粒子と機械学習の新しい領域を広げることに成功した。(これまで難しいと思われていた研究に機械学習を導入し成功した例は、成果B01を参照)

D) A)B)で述べた新現象を直接発見する為、2020年に第3期実験を行う計画であった。しかし新型コロナウイルス感染症によるパンデミックで、研究者の国際的な往来ができなくなり、LHCがある欧州の研究所も長期にわたり閉鎖され、実験が延期されてしまった。領域全体で国際的な展開を進めている中で、COVID19の影響は甚大であった。国際会議も軒並みキャンセルされ例年50を超える国際会議での講演を行っていたが、これも大きな影響を受けた。

一方COVID19で実験ができない状況下でも、オンラインによる物理解析やテラスケール研究会で研究を進めた。特に理論と公募研究で、この新しい真空や真空場の相転移が与えた影響、インフレーションを担った場合の重力波を用いた検証の可能性、B)で期待されている新現象に関して暗黒物質の新しい可能性を検証した。エネルギーフロンティア素粒子研究から、重力波や宇宙の真空の相転移やインフレーションを探ることが可能になりつつある。暗黒物質と真空の相転移を結びつけたり、真空の構造を弦理論などから、モデルを限定するなどの成果が得られた。領域として、広範な研究を進めたことによる大きな成果である。またwith COVID19時代に対応して、日本から実験



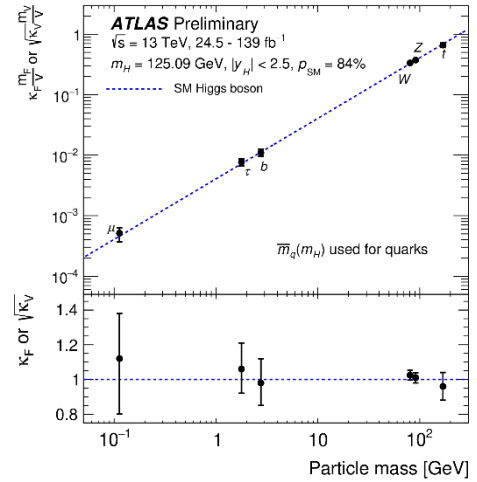
装置を調整、運用する遠隔ラボ（写真右）を立ち上げ、数名の現地滞在の研究者と多数の国内研究者が、共同で実験準備を推進するようにした。



・**ヒッグス粒子を用いて真空の構造を解明**し質量の起源や世代の起源を探る。（期待される成果②に対応）

右図に示す様に、ヒッグス粒子と様々な素粒子の結合の強さを測定することに成功した。

- A) 発見したヒッグス場が、力を伝える素粒子（右図 W, Z）ばかりでなく、ニュートリノ以外の物質を形成する素粒子（実験的に観測されたのは第3世代：右図 t, b,  $\tau$ ）の**質量の起源**でもあったことが分かった。
- B) 第2世代の  $\mu$  粒子（右図  $\mu$ ）の結合強度も観測され、ヒッグス粒子との結合の強さの違いが**素粒子の世代**を作っていることが判明した。領域は計画研究 A02, B02 と公募研究などで、超弦理論のオービフォールド空間のモジュライ対称性などの研究を行い、ヒッグスと世代の理論的な解明を進めている。**弦理論を実験と比較**できるようになったことも領域としての成果である。



（P. 14 成果参照）

・**次世代実験の基幹技術開発**（期待される成果④に対応）

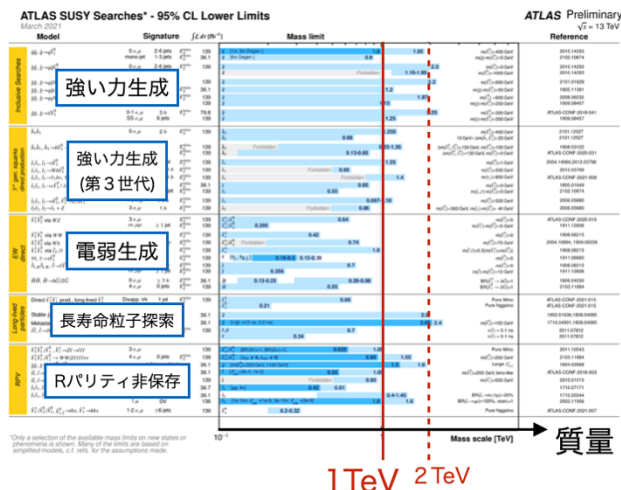
これらの研究開発は計画研究 A01, B01, C01, C02 で共同して行った。現在行われている **LHC ATLAS 実験が行われている現地 CERN に長期滞在し実験を推進した。現場の実験の最高責任者を本領域の研究者が行うなど、日本の大きな貢献**があり、大きなビジビリティを出すことができた。

そこでの経験を基盤に次世代実験の高輝度 LHC に向けて、検出器の基幹技術を開発した。高い放射線耐性を持った半導体検出器、高位置分解能・高エネルギー分解能を持った液体アルゴン電磁カロリメータ、高速エレクトロニクスによるトリガーシステムなど技術開発に成功し、テクニカルデザインレポート4冊（上図）にまとめた。また次世代実験の基幹技術となる超伝導線材及び磁石の開発にも成功した。（写真下）



（2）本領域により得られた成果

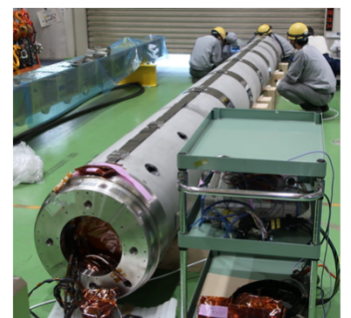
**超対称性粒子質量に課された制限のまとめ**



**研究項目 A：時空班  
計画研究 A01**

- A) ヒッグス粒子の「自然さ」から要求される超対称性粒子の存在を詳しく調べ、種々の超対称性模型が予言する数多くの崩壊モードのデータ解析を組織的に網羅して実施した（右図）。強い相互作用をする超対称性粒子

完成した7mのD1磁石実証機



は、1～2 TeV の制限が得られ、「自然さ」を見直すきっかけとなった。物理学の至る所にあらわれる「自然さ」を基にした議論に影響を与える成果であった。暗黒物質の有力な候補を、長寿命粒子（前ページ下左図）を用いて探索するアイデアは、本領域研究で実験と理論の研究者が共同で考え提案をおこなった。超対称性研究における日本のビジビリティは著しく高く、多くの結果に日本の研究者が中心となって貢献した。

- B) 次世代用加速器開発においては、次世代の高輝度実験で必要となる最終収束部ビーム分離双極磁石の試作機の作成・試験を重ね、機械特性、励磁能力の仕様を満たす超伝導磁石の開発に成功（写真前ページ）した。さらに新しい超伝導線材の開発を進めており、臨界電流密度について従来の性能を大幅に越えることに成功した。

### 計画研究 A02

- A) 成果（1）（P. 11 参照）で述べた「真空の準安定が示す新現象の示唆」について、この宇宙の真空の崩壊率の1ループ補正まで含めた計算に世界で初めて成功した。更に、 $\mu\text{on } g-2$  の標準理論からのズレより期待される新現象の LHC での信号の研究などを公募研究などと共同で行った。
- B) 超弦理論の定常解を考察することでプランクスケールから電弱スケールを導出した。特に、D ブレーン系が回転する定常解を考察し、超対称性が弱く破れ、結果として電弱スケールとプランクスケールの大きな階層性を説明する可能性を考え、D-ブレーンに働くポテンシャルの正確な計算に成功した。真空と時空を結ぶトップダウンのアプローチである。

**公募研究：**A02 班と共同で  $\mu\text{on } g-2$  の理論的な研究を進め、どのような新現象が観測データから示唆されるかの研究を行った。A01 班と協力して、マイクロな時空の解明で重要になる素粒子レベルの等価原理検証や、領域として、新現象を包括的に研究していく目的で、この新しい暗黒物質を探索する新しい方法の開発研究を公募研究で進めた。

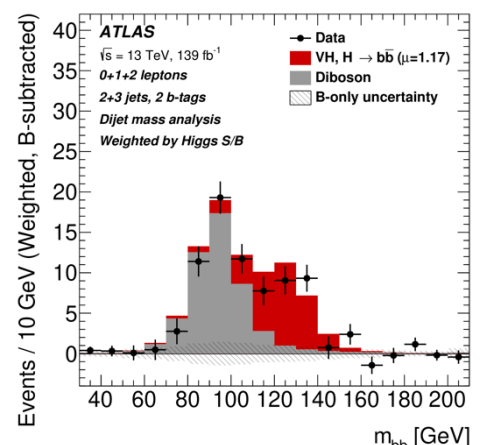
- 公募研究（濱口）： $\mu\text{on } g-2$  の実験値と標準模型予言値とのズレを説明できる超対称標準模型に関して、LHC Run 2 からの最新の結果を取り入れた現象論的研究を行ない、軽いスカラーレプトンの LHC での探索を指摘した。
- 公募研究（小林）：超弦理論のコンパクト化の幾何学を起源として現れるクォーク・レプトンのフレーバー構造の世代の解明に取り組んだ。トーラスやオービフォールド空間がもつモジュラー対称性の解析を行い、ゼロモードの変換性を解析し、その対称性の有限部分群がフレーバー対称性であることを発見した。
- 公募研究（石徹白）：超伝導を用いた新しい暗黒物質探索の最初の試作機を製作し、軽い暗黒物質の探索を行った。この新しい検出装置に必要な低放射能希釈冷凍機の開発と極低エネルギーキャリブレーション装置の開発に成功した。
- 公募研究（神谷）：マイクロな時空を見るとスピンの違いの影響をうけることが期待され、スピンの違いによる等価原理の検証実験を進めている。探索感度向上が期待されるピクセルセンサーを基にした中性子検出器を開発した。
- 公募研究（石野）：宇宙初期の重力波をとらえる CMB 観測の感度を上げる偏光変調器の作製とその評価システムの構築を行った。

## 研究項目 B：真空班

### 計画研究 B01

ヒッグス粒子の精密研究を通して、背後の真空の構造に迫った。

- A) ヒッグス粒子の質量を 0.2% の精度で測定し、真空が準安定であることの発見に大きな役割を果たした。
- B) ヒッグス粒子とボトムクォークが結合することを発見（右図：赤色部分はヒッグス粒子がボトムクォーク対に崩壊した事象をシミュレートしたもの）し、その結合定数を 13% の精度で測定した。ボトムクォークへの崩壊はバックグラウンドが多く、観測が難しいと従来考えられていたが、深層学習



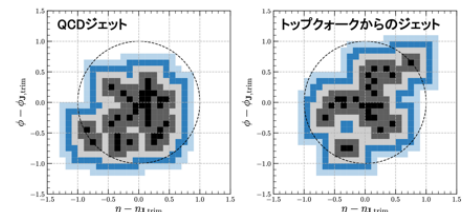
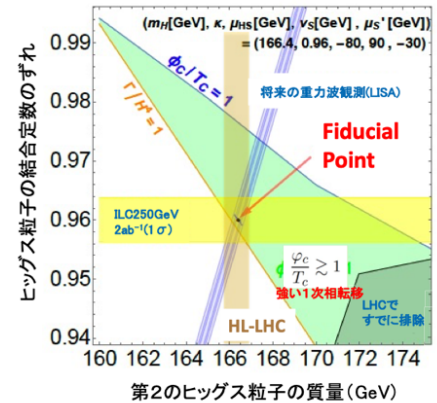
を用いて、バックグラウンドとの分別を行うことに成功した。理論グループとの共同で深層学習を進化させてきた成果である。

- C) トップクォークとヒッグスが同時に生成される現象を発見し、これからトップクォークとヒッグス粒子が結合する強さを9%の精度で決定した。これらの成果により、力を伝える素粒子の質量の起源同様に、物質を形作る素粒子の質量の起源もヒッグス場であることが分かった。(P.12の一番上の図参照)
- D) ヒッグス粒子の第2世代の素粒子であるミュオンへ崩壊の徴候を掴んだ(まだ5 $\sigma$ の発見のレベルには達していない)。ヒッグス粒子との結合の強さの違いが素粒子の世代を作っていることが分かった。
- E) 次世代シリコン飛跡検出器開発;シリコンピクセルモジュールとシリコンストリップセンサーの開発を行った。50ミクロン・ボンディング技術でセンサー開発を行うことに成功した。また、高い放射線耐性(10<sup>16</sup>MeVn.q/cm<sup>2</sup>)が得られた。これらの成果をもとに、ATLASアップグレード用シリコン検出器の技術仕様書を完成させた。(P.12中央参照)

### 計画研究 B02

ヒッグス場の正体とその対称性の破れの起源の解明を行うとともに、世代の解明を行う研究を行ってきた。

- A) ニュートリノ質量や宇宙バリオン数生成などの未解決現象を説明すべくヒッグスセクターを拡張した時、LHCおよび各種の将来実験を組み合わせ検証するための研究を実施した。HL-LHCで第2のヒッグス粒子が発見された時、B01班などからのヒッグス粒子の結合定数のずれ(統計不足でまだ観測されていない)と、将来の重力波観測から、相転移のメカニズムなどが決定できることが分かった(右図)。真空の相転移と宇宙を関係つける成果である。
- B) B中間子崩壊で測定された標準模型の予言とのずれが未知のレプトクォークで説明される場合、LHC探索を含めた将来実験で可能となる検証の方法を公募研究と共同で示した。
- C) A02班と相補的な研究で、暗黒物質が超対称性粒子でなく、真空のヒッグス場や、電弱理論と密接な関係のある場合の研究を行っている。擬スカラー場やスピン1の暗黒物質の場合、どのようにLHCや暗黒物質探索で探ることができるかを示した。
- D) 深層学習で、クォークから生成されたジェット(右図左)や重い粒子から生成されたジェット(右図右)かを区別することができるようになった。これは従来のCNN(Convolutional Neural Network)などでも可能であったが、ソフト粒子の分布をミンコフスキー汎関数で定量化することで1/10の計算コストでの評価が可能になった。



**公募研究:** B02班と共同で、ヒッグス場の相転移の機構を、宇宙観測と結びつける研究を進め、また超対称性以外の新現象の可能性を調べている。また B01班と協力してヒッグス場以外の新しい真空の場を、光子・光子コライダーを用いて作る計画が提案された。光格子時計の高感度化へ向けた研究に成功し、新しい場の効果を、精密な時間観測で行うなど、広い研究が展開された。

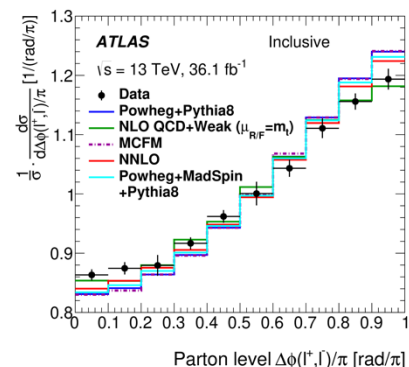
- 公募研究(鎌田): 発見されたヒッグス場と重力との非自明な結合により、インフレーションを起こすことができることを示した。宇宙背景放射の観測からヒッグス場がインフレーションのタネか否かが分かることを明らかにした。
- 公募研究(難波): X線自由電子レーザー施設、SACLAで利用できる硬X線ビームラインであるBL3と軟X線ビームラインであるBL1とを正面から衝突させる光子・光子コライダーを設計し、ビームラインへの提案を行った。
- 公募研究(大村): B中間子崩壊で測定された標準模型の予言とのずれが新物理で説明可能かを明らかにし、LHCやより高統計のB中間子の実験(BeLle2及びLHCb)で検証可能かを明らかにした。

- 公募研究(宮本) : 軽い暗黒物質アクシオン探索に原子分子のコヒーレント遷移を用いる新たな手法を開発した。極低温に冷却したオルトケイ酸イットリウム結晶中のエルビウムイオンからの近赤外超放射観測に成功し、コヒーレント現象を用いた高感度探索が可能になった。
- 公募研究(田中) : 単一イオン光時計の技術を用いて、精密分光により原子内の未知の力を探索する手法を確立した。カルシウムイオン等について、実験からの制限、将来の実験で期待される感度を明確にした。

## 研究項目 C : 重粒子班

### 計画研究 C01 トップクォーク

- A) トップクォークは、その特異な質量から、ヒッグス場と密接な関係がある。その質量の精密測定(精度 0.4GeV)を行い、真空の不安定性の発見に寄与した。また、トップクォークとヒッグス粒子が同時生成される現象を捉え、トップクォークとヒッグス粒子の結合の強さを9%の精度で測定した。これらは、成果(1)(P.11参照)に詳しく述べてある。
- B) トップクォークの生成断面積の精密測定を行い、右図の様なズレが観測された。新現象の可能性も含めて、実験・理論共同でこの原因をさぐり、電弱相互作用の高次補正が必要なことが分かった。理論と共同で高次補正の研究を進めた。実験と理論が共同で研究する領域の重要性を示す。
- C) トップクォークのフレーバーを破る稀崩壊探索をおこなった。現在  $10^{-3}$  から  $10^{-4}$  の分岐比の上限が得られ、B02 とフレーバー構造の研究を行い、モデルの制限が得られた。
- D) 高輝度 LHC 実験の過酷な背景事象環境下で新物理探索を行うために不可欠な  $\mu$  粒子トリガーエレクトロニクスを開発を行い、試作機器を完成させ、2種類の技術仕様設計書(P.12参照)を執筆した。



### 計画研究 C02 未知重粒子

- A) 日本が製作したミュオン検出器のオペレーションを行い、高い質のデータをグループ全体に提供した。ATLAS 実験の初段トリガーは、解析対象とすべき事象を毎秒 100,000 イベントずつ選択するが、それらに含まれる 1GeV/c より大きな運動量をもつすべての飛跡をリアルタイムで再構築する「飛跡トリガーシステム」の開発(写真右)と実データを使った試運転に成功した。構築したシステムの詳細と性能を網羅した論文を発表し、2020年3月にアクセプトされた。
- B) この計画研究の一つの目的では、ヒッグス粒子が真空場ではなく何らかの複合粒子である場合や高エネルギーでヒッグス場が強い結合を持つなどの特異ケースを想定している。この場合ゲージボソンの散乱 WW が重要なシグナルとなる。高エネルギー領域での WW 散乱の観測に成功し、未知の粒子が WW に崩壊する制限 5TeV が得られた。
- C) 新しいゲージボソン  $Z'$  がレプトン対に崩壊する場合の  $Z'$  の質量を最大 5TeV まで制限した。



**公募研究:** 従来の暗黒物質探索と異なる手法で超対称性以外の暗黒物質を探る新しい方法の R&D を進めた。

- 公募研究(浅岡) : 国際宇宙ステーション搭載 CALET の全電子スペクトルの微細構造に着目して、暗黒物質探索に新たな光を当てた。全電子スペクトルの微細構造を暗黒物質起源として説明することができるモデルを構築し Physical Review D にて出版した。
- 公募研究(神田) : 未知のゲージボソン  $Z'$  が引き起こすミュオン原子におけるパリティ非保存効果の観測を目指して装置開発と原理実証に取り組んだ。LYSO 無機シンチレータと SiPM を組み合わせたカロリメータを開発し、英国 RAL におけるビーム試験でグラフィット標的からのミュオン X 線を背景事象の電子と分離して測定することに成功した。



## 7 研究発表の状況

研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況（主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、ホームページ、主催シンポジウム、一般向けアウトリーチ活動等の状況。令和3年6月末までに掲載等が確定しているものに限る。）について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。なお、雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究代表者（発表当時、以下同様。）には二重下線、研究分担者には一重下線、corresponding author には左に\*印を付すこと。

下記の論文のうち著者が ATLAS Collaboration は研究代表者と研究分担者のみここに列挙する。

ATLAS Collaboration: S. Asai, K. Hanagaki, M. Hirose, M. Ishino, O. Jinnouchi, T. Sumida, J. Tanaka, J. Tojo, M. Tomoto, F. Ukegawa, Y. Yamazaki, K. Yorita et al.

### 【計画研究 A01】

1. ATLAS Collaboration, “Search for chargino-neutralino production with mass splittings near the electroweak scale in three-lepton final states in  $\sqrt{s} = 13$  TeV pp collisions with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D 101, 072001 (2020)
2. ATLAS Collaboration, “Search for squarks and gluinos in final states with same-sign leptons and jets using  $139 \text{ fb}^{-1}$  of data collected with the ATLAS detector,” JHEP 06 (2020) 046
3. \*M. Sugano, T. Nakamoto, et al., “Improvement in Training Performance by Enhancing Coil Mechanical Support in the Beam Separation Dipole Model Magnet for the HL-LHC Upgrade,” IEEE Transactions on Applied Superconductivity Vol. 30, No. 4 2020 4001806
4. S. Asai, \*S. Chigusa, T. Kaji, T. Moroi, M. Saito, R. Sawada, J. Tanaka, K. Terashi, K. Uno, “Studying gaugino masses in supersymmetric model at future 100 TeV pp collider,” JHEP 05 (2019) 179
5. ATLAS Collaboration, “Search for chargino and neutralino production in final states with a Higgs boson and missing transverse momentum at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D 100, 012006 (2019)
6. ATLAS Collaboration, “Search for long-lived, massive particles in events with displaced vertices and missing transverse momentum in  $\sqrt{s} = 13$  TeV pp collisions with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D 97, 052012 (2018)
7. 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 12 (2017) 085
8. 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)
9. \*A. Idesaki, T. Nakamoto, M. Yoshida, A. Shimada, M. Iio, K. Sasaki, M. Sugano, Y. Makida, T. Ogitsu, “Development of high radiation-resistant glass fiber reinforced plastics with cyanate-based resin for superconducting magnet systems,” Fusion Engineering and Design, Vol. 112, 2016, 418-424

### 【計画研究 A02】

1. S. Iso, N. Kitazawa, \*H. Ohta and T. Suyama, “More on Effective Potentials for Revolving D-Branes,” JHEP 08 (2020) 137
2. M. Kawasaki, K. Kohri, T. Moroi, K. Murai and H. Murayama, “Big-bang nucleosynthesis with sub-GeV massive decaying particles,” JCAP 12 (2020) 048
3. S. Chigusa, T. Moroi and K. Nakayama, “Detecting light boson dark matter through conversion into a magnon,” Phys. Rev. D 101, 096013 (2020)
4. S. Iso, H. Ohta and \*T. Suyama, “Effective Potential for Revolving D-branes,” JHEP 04 (2019), 151
5. T. Abe, S. Chigusa, Y. Ema and T. Moroi, “Indirect studies of electroweakly interacting particles at 100 TeV hadron colliders,” Phys. Rev. D 100, 055018 (2019)
6. S. Iso and \*K. Kawana, “RG-improvement of the effective action with multiple mass scales,” JHEP 03 (2018) 165
7. K. Hamaguchi, \*M. Ibe and T. Moroi, “The swampland conjecture and the Higgs expectation value,” JHEP 12 (2018)

8. M. Yamaguchi and W. Yin, “A novel approach to finely tuned supersymmetric standard models: The case of the non-universal Higgs mass model,” PTEP (2018) 023B06
9. S. Chigusa, T. Moroi and Y. Shoji, “State-of-the-Art Calculation of the Decay Rate of Electroweak Vacuum in the Standard Model,” Phys. Rev. Lett. 119, 211801 (2017)
10. S. Iso, P.D. Serpico and K. Shimada, “QCD-Electroweak First-Order Phase Transition in a Supercooled Universe,” Phys. Rev. Lett. 119, 141301 (2017)
11. M. Endo, \*T. Moroi, M. M. Nojiri and Y. Shoji, “False Vacuum Decay in Gauge Theory,” JHEP 11 (2017) 074
12. \*Y. Ema, K. Hamaguchi, T. Moroi and K. Nakayama, “Flaxion: a minimal extension to solve puzzles in the standard model,” JHEP 01 (2017) 096
13. \*Y. Ema and T. Moroi, “Early decay of Peccei-Quinn fermion and the IceCube neutrino events,” Phys. Lett. B 762, 353 (2016)

### 【計画研究 B01】

1. ATLAS Collaboration, “Combined measurements of Higgs boson production and decay using up to 80 fb<sup>-1</sup> of proton-proton collision data at  $\sqrt{s} = 13$  TeV collected with the ATLAS experiment,” Phys. Rev. D 101, 012002 (2020)
2. ATLAS Collaboration, “ATLAS b-jet identification performance and efficiency measurement with tt events in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV,” Eur. Phys. J. C 79, 836 (2019)
3. ATLAS Collaboration, “Observation of H $\rightarrow$ bb decays and VH production with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B 786, 59 (2018) (内容についてはプレスリリース(KEK, 東京大学)された.)
4. ATLAS Collaboration, “Measurement of the Higgs boson mass in the H $\rightarrow$ ZZ\* $\rightarrow$ 4l and H $\rightarrow$  $\gamma\gamma$  channels with  $\sqrt{s} = 13$  TeV pp collisions using the ATLAS detector,” Phys. Lett. B 784, 345 (2018) (ヒッグス粒子の質量測定)
5. ATLAS Collaboration, “Observation of Higgs boson production in association with a top quark pair at the LHC with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B 784, 173 (2018) (内容についてはプレスリリース(KEK, 東京大学)された.)
6. ATLAS Collaboration, “Search for dark matter in association with a Higgs boson decaying to bb-quarks in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B 765, 11 (2017)
7. ATLAS Collaboration, “Search for new resonances decaying into a W or Z boson and a Higgs boson in the llbb, lvbb, and vbb channels with pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B 765, 32 (2017)
8. ATLAS Collaboration, “Measurements of the Higgs boson production and decay rates and constraints on its couplings from a combined ATLAS and CMS analysis of the LHC pp collision data at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV,” JHEP 08 (2016) 045
9. \*Y. Unno, K. Hanagaki, K. Hara, Y. Ikegami, K. Nakamura, J. Tojo, et al., “Development of n<sup>+</sup>-in-p planar pixel sensors for extremely high radiation environments, designed to retain high efficiency after irradiation,” Nucl. Instrum. Meth. A, 831, 122-132, 2016

### 【計画研究 B02】

1. M. Aiko, S. Kanemura, M. Kikuchi, K. Mawatari, K. Sakurai and K. Yagyu, “Probing extended Higgs sectors by the synergy between direct searches at LHC and precision tests at future lepton colliders,” Nucl. Phys. B 966, 115375 (2021)
2. T. Abe, M. Fujiwara, J. Hisano and \*K. Matsushita, “A model of electroweakly interacting non-abelian vector dark matter,” JHEP 07 (2020) 136
3. A. Chakraborty, \*S. H. Lim, M. M. Nojiri and M. Takeuchi, “Neural Network-based Top Tagger with Two-Point Energy Correlations and Geometry of Soft Emissions,” JHEP 07 (2020) 111
4. K. Hashino, R. Jinno, M. Kakizaki, S. Kanemura and T. Takahashi, “Selecting models of first order phase transitions using the synergy between collider and gravitational wave experiments,” Phys. Rev. D 99, 075011 (2019)

5. A. Chakraborty, \*S. H. Lim and M. M. Nojiri, “Interpretable deep learning for two-prong jet classification with jet spectra,” JHEP 07 (2019) 135
6. T. Abe, \*M. Fujiwara and J. Hisano, “Loop corrections to dark matter direct detection in a pseudoscalar mediator dark matter model,” JHEP 02 (2019) 028
7. \*S.H.Lim and M.M.Nojiri, “Spectral Analysis of Jet Substructure with Neural Networks: Boosted Higgs Case,” JHEP 10 (2018) 181
8. \*T. Abe, J. Hisano and R. Nagai, “Model independent evaluation of the Wilson coefficient of the Weinberg operator in QCD”, JHEP 03 (2018) 175
9. B. Bhattacharjee, \*S. Mukhopadhyay, M. M. Nojiri, Y. Sakaki and B. R. Webber, “Quark-gluon discrimination in the search for gluino pair production at the LHC,” JHEP 01 (2017) 044
10. K. Hashino, M. Kakizaki, S. Kanemura, P. Ko and T. Matsui, “Gravitational waves and Higgs boson couplings for exploring first order phase transition in the model with a singlet scalar field,” Phys. Lett. B 766, 49 (2017)
11. S. Kanemura, M. Kikuchi and K. Yagyu, “One-loop corrections to the Higgs self-couplings in the singlet extension,” Nucl. Phys. B 917, 154 (2017)
12. M. Aoki, S. Kanemura, K. Sakurai and H. Sugiyama, “Testing neutrino mass generation mechanisms from the lepton flavor violating decay of the Higgs boson,” Phys. Lett. B 763, 352 (2016)
13. J. Hisano, Y. Muramatsu, Y. Omura and \*Y. Shigekami, “Flavor physics induced by light Z’ from SO(10) GUT,” JHEP 11 (2016) 018

#### 【計画研究 C01】

1. ATLAS Collaboration, “A search for the dimuon decay of the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B 812, 135980 (2021) (内容についてはプレスリリース(名古屋大学)された.)
2. ATLAS Collaboration, “Evidence for tttt production in the multilepton final state in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C 80, 1085 (2020)
3. ATLAS Collaboration, “Measurement of top-quark pair spin correlations in the  $e\mu$  channel at  $\sqrt{s} = 13$  TeV using pp collisions in the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C 80, 754 (2020)
4. ATLAS Collaboration, “Measurement of the top-quark mass in  $tt \rightarrow \text{lepton} + \text{jets}$  channel from  $\sqrt{s} = 8$  TeV ATLAS data and combination with previous results,” Eur. Phys. J. C 79, 290 (2019) (トップクォークの質量測定、P.11の結果は ATLAS-CONF-2019-046の結果と統合)
5. ATLAS Collaboration, “Measurement of  $t\bar{t}$  differential cross section of highly boosted top quarks decaying to all-hadronic final states in pp collision at  $\sqrt{s} = 13$  TeV using ATLAS detector,” Phys. Rev. D 98, 012003 (2018)
6. 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)
7. Y. Sano, \*Y.Horii, M. Ikeno, O. Sasaki, M. Tomoto, T. Uchida, “Subnanosecond time-to-digital converter implemented in a Kintex-7 FPGA,” Nucl. Instrum. Meth. A, 874, 50-56, 2017
8. ATLAS Collaboration, “Measurement of top quark pair differential cross sections in the dilepton channel in pp collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV with ATLAS,” Phys. Rev. D 94, 092003 (2016)
9. ATLAS Collaboration, “Measurements of the charge asymmetry in top-quark pair production in the dilepton final state at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D 94, 032006 (2016)

#### 【計画研究 C02】

1. ATLAS Collaboration, “The ATLAS Fast Tracker system,” Journal of Instrumentation accepted March 10, 2021

2. ATLAS Collaboration, “Search for diboson resonances in hadronic final states in 139 fb<sup>-1</sup> of pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP 06 (2020) 042
3. ATLAS Collaboration, “Search for heavy diboson resonances in semileptonic final states in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C 80, 1165 (2020)
4. ATLAS Collaboration, “Search for heavy particles decaying into a top-quark pair in the fully hadronic final state in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D 99, 092004 (2019)
5. ATLAS Collaboration, “Search for high-mass dilepton resonances using 139 fb<sup>-1</sup> of pp collision data collected at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B 796, 88 (2019)
6. ATLAS Collaboration, “Combination of searches for heavy resonances decaying into bosonic and leptonic final states using 36 fb<sup>-1</sup> of proton-proton collision data at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D 98, 052008 (2018)
7. ATLAS Collaboration, “Search for new high-mass phenomena in the dilepton final state using 36 fb<sup>-1</sup> of proton-proton collision data at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP 10 (2017) 182
8. ATLAS Collaboration, “Performance of the ATLAS trigger system in 2015,” Eur. Phys. J. C 77, 1 (2016)
9. ATLAS Collaboration, “Search for high-mass new phenomena in the dilepton final state using proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B 761, 372 (2016)

#### 【公募研究】

1. T. Kobayashi, and H. Otsuka, “Challenge for spontaneous CP violation in Type IIB orientifolds with fluxes”, Phys. Rev. D 102, 026004 (2020)
2. \*S. Iguro, Y. Omura and M. Takeuchi, ”Probing mu tau flavor-violating solutions for the muon g-2 anomaly at Belle II”, JHEP 09 (2020) 144
3. H. Motz, H. Okada, Y. Asaoka, K. Kohri, “Cosmic-ray signatures of dark matter from a flavor dependent gauge symmetry model with neutrino mass mechanism”, Phys. Rev. D 102, 083019 (2020)
4. \*H. Fukuda, F. Luo and S. Shirai, “How Heavy can Neutralino Dark Matter be?” JHEP 04 (2019) 107
5. R. Daido, F. Takahashi and N. Yokozaki, “Enhanced axionphoton coupling in GUT with hidden photon”, Phys. Lett. B 780, 538 (2018)
6. D. Goncalves, K. Kong, K. Sakurai, M. Takeuchi, “Monotop signature from a fermionic top partner”, Phys. Rev D 97, 015002 (2018)
7. T. Suehara, I. Sekiya, S. Callier, V. Balagura, V. Boudry, J-C. Brient, C. de la Taille, K. Kawagoe, A. Irlles, F. Magniette, J. Nanni, R. Poeschl, T. Yoshioka [ILD SiW-ECAL group], “Performance study of SKIROC2/A ASIC for ILD Si-W ECAL”, JINST, 13, C03015, 2018
8. \*X. Fan, S. Kamioka, T. Inada, T. Yamazaki, T. Namba, S. Asai, J. Omachi, K. Yoshioka, M. Kuwata-Gonokami, A. Matsuo, K. Kawaguchi, K. Kindo and H. Nojiri, “The OVAL experiment: a new experiment to measure vacuum magnetic birefringence using high repetition pulsed magnets”, EPJD, 71, 308, 2017
9. K. Ishiwata and Y. Yonekura, “Longitudinal W boson scattering in a light scalar top scenario”, Phys. Rev. D 96, 015009 (2017)
10. K. Mikami, M. Tanaka, \*Y. Yamamoto, “Probing new intra-atomic force with isotope shifts”, Eur. Phys. J. C 77, 896 (2017)

#### 書籍

1. グリフィス 素粒子物理学, 花垣和則 波場 直之, 丸善出版, 2019年, ISBN-978-4-621-30392-4
2. LHCの物理 -ヒッグス粒子発見とその後の展開-, 浅井祥仁, 共立出版, 2016年, ISBN-978-320-03527-0

## ホームページ

1. 本新学術領域研究「真空と時空」ホームページ: <http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/vacuum-space-time/>

## 主催シンポジウム

### 【国際シンポジウム】

1. Higgs as a Probe of New Physics 2021/2019/2017, 2021年3月25-27日 ONLINE, 2019年2月18-22日 大阪大学, 2017年3月1-5日 富山大学
2. Kashiwa Dark matter Symposium 2020年11月16-19日 ONLINE, Dark Matter searches in the 2020s, 2019年11月11-13日 東京大学
3. DIS2018 26th International Workshop on Deep Inelastic Scattering and Related Subjects, 2018年4月16-20日 神戸大学先端融合研究環統合研究拠点コンベンションホール および 神戸国際会議場
4. Higgs Couplings 2018, 2018年11月26-30日, 東京両国 KFC ホール
5. Workshop on Beyond Standard Model and the Early Universe, 2017年10月25-27日 東北大学
6. Physics in LHC and the Early Universe, 2017年1月9-11日 東京大学

### 【国内研究集会】

1. 本新学術領域研究「真空と時空」キックオフ研究会, 2016年8月30-31日, 東京大学
2. テラスケール研究会, 2021年5月22日 2020年8月11-12日 ONLINE, 2019年6月8日 東京大学, 2018年7月27日 名古屋大学, 2017年12月25日 2017年4月7日 東京大学

## アウトリーチ活動

1. プラネタリウム映画を用いた講演会「Phantom of the Universe」 花垣和則, 戸本誠, 山崎裕司, 江成祐二, 南條創 多摩六都科学館 2021年3月6日 2019年10月19日, 名古屋市科学館 2020年2月18日, 大阪市立科学館 2019年11月24日, つくばエキスポセンター 2018年11月24日
2. NHK文化センター横浜ランドマーク教室オンライン講座「素粒子の世界 -宇宙の成り立ちとヒッグス粒子-」 兼村晋哉 2021年2月6日
3. 第4回サイエンスコミュニケーション「宇宙暗黒物質は未知の素粒子か?」 久野純治 半田高等学校 2020年12月18日
4. ひらめき☆ときめきサイエンス (高校生対象ワークショップ) 「君も新粒子を発見!?!小型素粒子実験にチャレンジ」 陣内修 東京工業大学 2019年8月2,3日, 2018年8月2,3日
5. 高校生対象の講演会「素粒子物理学と国際共同研究」 寄田浩平 筑波大学附属高校 2018年2月24日
6. テレビ放送 NHK-BSプレミアム「コズミック フロントネクスト 宇宙が真空崩壊!?! 宇宙の未来をパパに習ってみた」 寺師弘二 2017年10月5日
7. 一般公開講演会 東京大学特別講座「宇宙誕生の非常識—ヒッグス粒子を通して宇宙誕生に迫る—」 浅井祥仁 取手ウェルネスプラザ 2017年8月27日
8. 一般公開講演会 名古屋大学・憲章記念日講演会「”物理学とは何だろうか” 朝永、南部からこれからの若い世代へ向けて」 磯暁 名古屋大学 2017年6月13日
9. 一般公開講演会 東京大学オープンキャンパス「最高エネルギー加速器で解き明かす素粒子、宇宙の謎 ~パワーアップしたLHCが始動!~」 石野雅也 東京大学 2016年8月3-4日
10. 一般公開講演会 Science Conference in Hyogo 2016 - Learning Science through English 「Higgs and mass」 山崎祐司 ポートアイランドコンベンショナルホール(神戸大学) 2016年7月16日

## 8 研究組織の連携体制

研究領域全体を通じ、本研究領域内の研究項目間、計画研究及び公募研究間の連携体制について、図表などを用いて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

「素粒子・真空・時空」を統合した新しい領域の創造で、中心となるのは4つの実験的研究である。ヒッグス粒子を調べ、超対称性粒子を直接探索し、それらに、ヒッグス粒子や超対称性と関係が深い重粒子班を加え、**想定される全ての新物理事象を網羅**している。

公募研究は、本領域の成果を LHC のエネルギーフロンティアの素粒子研究から、宇宙や機械学習などの研究領域に広げる為に、**以下の7つの領域内の役割を担って、研究項目 A-C と共同で研究を進めている。**

- 1) 低エネルギー (Axion のような) 領域での真空中に潜む新粒子探索や、量子時空などの従来の素粒子実験とは異なる新しい実験の試み
- 2) 素粒子の研究を宇宙時空へと拡張する研究：時空や真空の相転移など従来の素粒子研究を超えた研究
- 3) 新しい暗黒物質探索の実験方法の開発
- 4) ボトムアップ型ではなく、トップダウン型に電弱スケールを解明する試み
- 5) 次世代の加速器実験の R&D
- 6) 実験とより密接な現象論的研究で確実な発見のアプローチを補完する研究
- 7) 巨大加速器実験の複雑なデータを用いた深層学習を進める研究

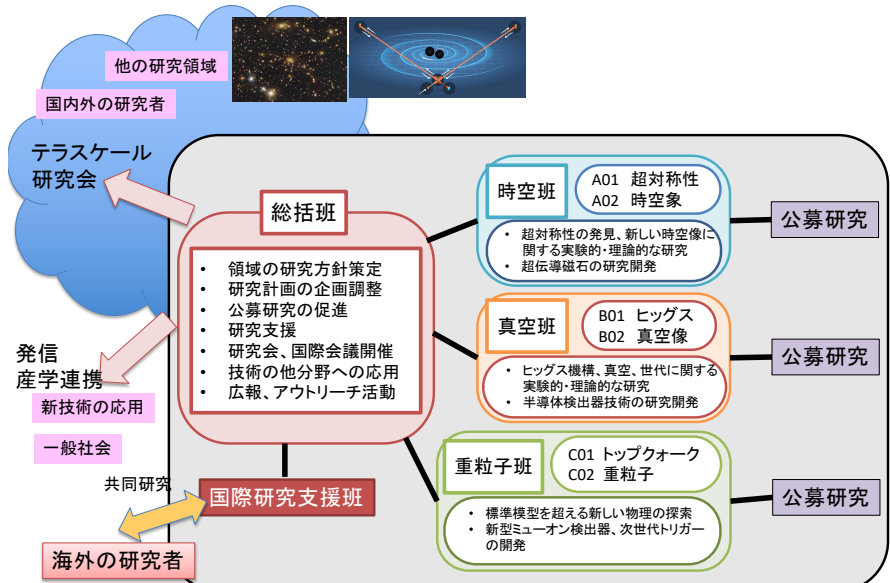
### 各研究項目の連携状況

4つの計画研究 A01, B01, C01, C02 の連携は、互いに相補的であると同時に、解析手法、背景事象の評価方法など研究成果を共有している。特に B01, C01 で得られた結果は A01 や C02 の背景事象のより深い理解へと反映させることができる。これらの連携は、実験が行われている現地 CERN で密接に情報を共有する目的で会合を定期的に行っている。ヒッグス粒子や重粒子現象は真空に関係している。その実験的な成果から真空との関係を探り、真空の構造や相転移、素粒子の世代の解明につなげるのが B02 である。

超対称性はスピンという時空の性質と素粒子の性質を結ぶ新しい対称性であり時空と深く関係している。また時空が余剰次元などの構造を持つ場合、トップクォークや W/Z 粒子と強く結合する新粒子が期待される。それらから時空 (宇宙) の誕生、暗黒物質、力の大統一へ展開するのが A02 である。宇宙物理への応用や素粒子研究へ還元を行っている。計画研究間や公募研究の有機的連携を図るために、テラスケール研究会を年に数

回開催し、最新の研究成果の共有を行い、新しい研究の方針を議論している。理論実験の共同研究の論文や、理論の共同研究を推進している。

総括班会議は、毎月 ZOOM により開催し、研究の進行状況の確認や、新現象の可能性のある実験データの有無など報告を行い、テラスケール研究会のテーマに反映させてきた。



## 9 研究費の使用状況

研究領域全体を通じ、研究費の使用状況や効果的使用の工夫、設備等（本研究領域内で共用する設備・装置の購入・開発・運用、実験資料・資材の提供など）の活用状況について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。また、領域設定期間最終年度の繰越しが承認された計画研究（総括班・国際活動支援班を含む。）がある場合は、その内容を記述すること。

### ● 研究費の使用状況や効果的使用の工夫、設備等の活用状況について

本研究領域では、LHC アトラス実験の運転のために研究者が、実験が遂行されている CERN に長期間滞在し、検出器の運転や物理データ解析の作業に従事した。一方で、現行のアトラス実験の性能向上に向けた新しい検出器要素の開発や、次世代の加速器開発、アトラス実験の高度化に向けた開発などを国内の各機関で推進した。これらの開発研究において必要となる設備・装置を購入し整備した。

#### 【研究計画 A01】次世代加速器開発

●（超伝導線材一式、超高電圧耐圧試験器、材料剛性試験装置一式、精密鉄ヨーク一式、等）  
高輝度化用最終収束部ビーム分離双極磁石の試作のための耐放射線材料、構造部品、及び、励磁試験等仕様確認のための試験装置（電源、計測器）を調達・整備した。これにより試作機、実証機製作を成功させることができた。また高エネルギー化に向けた先端超伝導線材の開発研究を実施できた。

#### 【研究計画 A02】時空像についての理論的研究

● 毎年のべ3名の研究員を雇用し東北大学、東京大学、KEK で研究を行った。

#### 【研究計画 B01】新型ピクセル検出器開発

●（シリコン検出器試験用マザーボード、ピクセル検出器組み立て用装置および治具、等）  
ピクセル検出器組み立ておよび試験のための装置を調達したことで、試作品を製造試験することができ、高放射線耐性を持つ検出器開発が格段に加速した。  
● A01 および C01 班と共同で ATLAS 実験の検出器運用を行うことで、CERN 長期出張の旅費を節約した。

#### 【研究計画 B02】統一的真空像の理論研究

● 2016, 17 年度に数値計算用のワークステーションを購入した（年約 100 万円）。  
● 毎年のべ3名の研究員を雇用し名古屋大学、大阪大学、KEK で研究を行った。

#### 【研究計画 C01】 $\mu$ 粒子トリガー回路開発

● 主に高輝度 LHC 実験に向けた  $\mu$  粒子トリガー回路の開発のための装置を購入した。C01 班と C02 班との間で組織だって研究を進め、エレクトロニクスの動作検証を主導する名古屋大学を物品の設置先を選び、その他の大学は最小限の設備に留める努力を行った結果、開発したエレクトロニクスの動作検証を効率的に完了し、予定通りに2種類の技術仕様設計書を完成させた。  
● 領域内、国内外の共同研究者との効率的な会合のため、神戸大学にビデオ会議システムを導入した。

#### 【研究計画 C02】飛跡トリガー開発

● 高輝度 LHC 実験に向けた飛跡トリガー回路を製作し、動作試験を行うための設備を構築した。  
● 回路開発拠点の早稲田大学に集中して機器を設置して複数の大学で共同利用することにより効率化を図った。

### 研究費の使用状況：計画研究において購入した主要な物品明細

年度	品名	仕様・性能等	数量	単価（円）	金額（円）	設置研究機関
2016	S ガラスクロス機材 BT2160/2170 外	S-WP 成形起用含む	4	712,800	2,851,200	高エネルギー加速器研究機構
	超伝導コイル用対地絶縁	ユービレックス 125RN, 20000mm×150mm	1	825,120	825,120	高エネルギー加速器研究機構
	UltraScale+FPGA	VCU118 評価キット	1	937,235	937,235	名古屋大学
	ロジックアナライザ	16861A	1	2,102,868	2,102,868	名古屋大学
	VME64x バックプレーン 付クレート		1	772,200	772,200	神戸大学
	ALIBAVA マザーボード	Alibava System Classic	1	842,400	842,400	筑波大学
2017	メカニカルショートモデル向け精密鉄ヨーク一式	Fixing ヨーク Spacer ヨーク	1	1,447,200	1,447,200	高エネルギー加速器研究機構

	S ガラスクロス BT プリ ブレグパイプ	外径 182mm, 内径 150mm, 長さ 900mm	4	712, 800	2, 851, 200	高エネルギー加速器研究機構
	ボンドヘッド調整カメラ	岩谷産業(株) E-Box	1	1, 480, 637	1, 480, 637	高エネルギー加速器研究機構
	ユニバーサルワークホル ダー	岩谷産業(株) 押さえ爪ホルダ ー 8 式, クランプ爪 10 個	1	702, 000	702, 000	高エネルギー加速器研究機構
2018	超高電圧耐圧試験器	DC12kV, 10mA, GPIB	1	788, 400	788, 400	高エネルギー加速器研究機構
	巻線治具用精密バー	7m コイル巻線機用連結部品	1	2, 419, 200	2, 419, 200	高エネルギー加速器研究機構
	ATCA クレート		1	1, 245, 240	1, 245, 240	名古屋大学
	ビデオ会議システム	Poly Group310 他		1, 632, 960	1, 632, 960	神戸大学
2019	超伝導線材一式	高温超伝導線材 FESC- SCH04(40)	1	1, 014, 255	1, 024, 255	高エネルギー加速器研究機構
	センターポスト加工用刃 物・治具一式	7m コイル巻線治具加工	1	825, 000	825, 000	高エネルギー加速器研究機構
	吸着治具	FlexBase ver4 type2	1	772, 740	772, 740	九州大学
2020	センターポスト加工用刃 物・治具一式	7m コイル巻線治具加工	1	825, 000	825, 000	高エネルギー加速器研究機構
	機械特有用サンプル加工 及び伝送特有用基板	シーマ電子(株) 製	1	810, 000	810, 000	高エネルギー加速器研究機構

● 領域設定期間最終年度の繰越しが承認された計画研究に関して

【計画研究 A01】

令和 2 年 10 月までに、超対称性粒子探索のための実験データ解析を行い、令和 2 年 11 月から令和 3 年 3 月までに研究成果をとりまとめる予定であった。COVID19 の影響により CERN が長期間閉鎖され、特に較正データなど実験に近いデータが不可欠であり、系統誤差などの解析を完成させることが遅れた。令和 3 年度に全成果をまとめた出版を行う。

【計画研究 B01】

HL-LHC に向けたシリコン検出器開発は、ATLAS グループとの共同研究であり、(1) 実機製造までに複数回承認を得なければならないレビューは、グループ全体で実施する。(2) 本計画研究班が実施する開発では、ATLAS グループからの供給品を使う。しかし、COVID19 の感染拡大防止のために欧米の研究機関が長期ロックダウンとなったため、ATLAS グループのレビューは進まず、また、本研究グループに供給される予定だった ATLAS グループからの支給品も計画通りには支給されなかった。この結果、ピクセルモジュールの効率的かつ高精度の組み立て工程の研究において、組み立てるべきピクセルモジュールの仕様が定まらずに、レビュー待ちの状態となり予定が 1 年遅れた。

【計画研究 B02】

令和 2 年 8 月までに LHC による新物理探索の理論的研究を行い、さらに令和 3 年 3 月までに特任助教採用、新素粒子模型の理論的研究、研究成果の発表、研究成果の取りまとめを行う予定であった。新型 COVID19 の影響により特任助教採用及びそれに伴う研究と成果の発表ができなくなった。

【計画研究 C01】

令和 2 年 12 月までに、事前準備、トップクォーク解析とトリガー開発を行い、令和 3 年 3 月までに研究成果の取りまとめを行う予定であったが、COVID19 で CERN が封鎖されるなど共同研究に遅延が生じた。令和 3 年度中に全データの研究成果を発表する。

【計画研究 C02】

令和 2 年 11 月までに飛跡トリガー回路の統合試験を CERN 研究所の設備を使って行い、令和 3 年 3 月までに性能評価の結果をまとめる予定であったが、COVID19 で研究所が封鎖されたため、予定していた統合試験を令和 3 年度に行うことになった。



## 10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の成果が当該学問分野や関連学問分野に与えたインパクトや波及効果などについて、「革新的・創造的な学術研究の発展」の観点から、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、応募時に「①既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」、「②当該領域の各分野発展・飛躍的な展開を目指すもの」のどちらを選択したか、また、どの程度達成できたかを明確にすること。

### 「②当該領域の格段の発展・飛躍的な展開を目指す」を選択

- 1) 未踏のテラスケール領域での発見を核に、標準理論を超える新しい素粒子像を創ることが本申請領域の第一ステップであり、それは素粒子研究分野に計り知れない飛躍的な発展をもたらす。成果 (P. 11) で示したように、①新しい真空の構造を発見、②本領域で研究を行い①の対応する新現象と muon g-2 実験のアノマリーの考察から、超対称粒子の示唆が得られた。③COVID-19により準備していた実験が実施できなかつたため、確定には至っていないが格段の進展が得られた。ミクロな重力（量子的な重力像）が切り拓かれつつある。
  - 2) 真空・時空を研究する領域の形成を目指す。発見したヒッグス粒子を用いて真空の構造を探り、新しい真空の構造を発見した。宇宙誕生・進化の解明に繋げる確実な研究が可能である。さらに、素粒子の世代構造をつくっているのがヒッグス場であることもわかり、弦理論をもちいて、真空の構造の解明や、なぜヒッグス場が存在できるのか等の解明を進めてきた。このように、弦理論などのトップダウン的な研究は、これまで数学的な厳密さだけが指針であったが、実験と結びつくことで、新しい指針が得られ、格段の進歩が得られた。
  - 3) 「テラスケール研究会」を通じたエネルギーフロンティア素粒子研究と宇宙・宇宙線のコミュニティを形成し、最先端のLHC成果と、宇宙観測や他の実験のアノマリーなど最新の成果を取り込んで研究の方向性を決めてきた。常時100名を超える参加が得られ、多数の学術論文を生み出すアイデア、原動力となっている。
- 
- 4) 1) で示唆された新現象を詳細に調べる次期の大型国際共同研究（高輝度LHC計画）は、この領域の進歩になるばかりでなく、当該領域の格段の発展・飛躍的な展開になる。次世代実験を行うための、R&Dが完成した。これにより、日本が今後もエネルギーフロンティアに参加し続けることが可能になり、日本がこの領域で重要な成果をあげることが可能になった。
  - 5) 更に重要なのは、本領域により総勢70人の研究者が、国際共同研究の場で成果をあげビジビリティを出してきた点である。P. 10の所見への対応で述べた様に、大型研究費は実験機器の整備だけが対象で、その設計段階のR&D、実験の実施、研究成果をあげることは、本領域科研費によってなされ、国際的な共同研究を推進できた。この成果は、論文や学術成果として既に述べられただけでなく、国際的な評価や信用として見ることができる。以下の本領域研究者が、LHC大型実験で評価され、重要な役職に就いて実験を遂行したことを示す表を添付する。（左下表）また、現地に滞在し、大きな成果を上げたATLAS Outstanding Achievement Awardも多数本領域研究者が受賞している。領域期間中の抜粋を右下にまとめる（<https://atlas.cern/discover/collaboration/awards>）。

	実験組織運営	物理解析グループ リーダー	検出器運転 コーディネータ
H28年度	4人	5人	13人
H29年度	4人	4人	14人
H30年度	4人	3人	14人
R1年度	4人	1人	19人
R2年度	8人	2人	22人

2020 Susumu Oda(九州)  
Toshi Sumida(京都)  
Tomomi Kawaguchi(名古屋)  
Junpei Maeda(神戸)  
2018 Takuto Kunigo(京都)  
Tomoyuki Saito(東大)  
Shota Suzuki(KEK)  
2016 Yosuke Takubo(KEK)  
Hideyuki Oide(ジェノバ→東工大)

## 11 若手研究者の育成に関する取組実績

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（令和3年3月末現在で39歳以下。研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組の実績について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

### 国際的に活躍する若手研究者の育成

若手研究者を最先端で競争の厳しい素粒子研究に従事させることで育成を行っている。実験が行われているCERNには、世界中から優秀な研究者が集まっている。この国際的な最先端の研究所であるCERNに若手研究者を長期間滞在させることで、諸外国の第一線の研究者と議論を重ね切磋琢磨し、国際的に活躍する優秀な研究者に成長する機会を創出してきた。最先端の素粒子研究に従事する経験を通じて、研究を直に学び、将来のキャリアを考えるきっかけを与えてきた。修士号を取得した学生は102名で42名が博士課程に進学、博士号を取得した学生は58名でそのうち36名はアカデミックの分野で活躍している。高い博士進学率と研究者の育成を行なっている。さらに民間企業においても20名以上は研究所やIT・量子コンピュータ関連企業へ就職している。

### 実験・理論の融合を通じた若手研究者の育成

本領域が展開する学術研究は、最先端の素粒子・宇宙研究であると同時に、領域を形成して実験・理論を融合する研究を推進してきた。テラスケール研究会、共同研究会、国際会議を開催する(合計43回)して実験と理論の両方の視点から研究を進めるなど、他では得がたい研究環境を若手研究者に対して提供してきた。その成果のひとつとして、2016-2020の5年間で本領域から7名が日本物理学会若手奨励賞を受賞した。当該期間中の受賞者総数が15名であるため、全受賞者の半数に相当する。

### 博士研究員の雇用と育成

本領域では博士研究員を25名と、多数採用した。LHC・アトラス実験の第2期実験で取得した大量のデータを使って、新しい成果を出し続けたことにより、取り組む価値が高く新規性のある研究テーマが次々と生まれている。このような研究環境は、若手研究者にとって単純に魅力的なものであると同時に、若手研究者が優秀な研究者へと成長するために必須の環境でもある。実際に、本領域には若手研究者(39歳以下)が毎年度130名程度、参加しており、そのうちの多くは、本領域での研究を経てアカデミックな分野で活躍している。

最後に本領域における若手研究者の育成に関する情報をまとめる。

	2016	2017	2018	2019	2020
若手研究者数(39歳以下) (研究者、博士、修士)	134 (45, 51, 38)	145 (50, 52, 43)	130 (51, 35, 44)	123 (51, 36, 46)	139 (49, 38, 52)
修士号 / 博士号取得者	20 / 7	21 / 21	20 / 6	22 / 14	19 / 10
博士進学 / アカデミックポストに着任	9 / 5	8 / 12	7 / 5	9 / 9	9 / 5
雇用した博士研究員数 (年度ごとに集計)	5	12	10	9	11

## 12 総括班評価者による評価

研究領域全体を通じ、総括班評価者による評価体制（総括班評価者の氏名や所属等）や本研究領域に対する評価コメントについて、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

本領域は以下の4名の評価者を置き、各計画研究及び領域全体の評価を行った。評価者にはできる限り、テラスケール研究会にも参加してもらい、日頃から領域の活動を見て頂いている。

中野 貴志（大阪大学・核物理研究センター・センター長）

飯嶋 徹（名古屋大学・素粒子宇宙起源研究所・教授）

森 俊則（東京大学・素粒子物理国際研究センター・教授）

日笠 健一（東北大学・理学研究科・教授）

### 中野評価委員のコメント

本領域は、真空の構造解明を中心テーマとして、縦糸となる学術面では新しい時空像の創造を目指し、横糸となる技術面では深層学習（AI）の応用に留まらず AI の新たな可能性の探究を目指す挑戦性の高い課題である。まず学術面では真空構造を司る Higgs 粒子の精密測定を通して、真空が準安定であることを明らかにした。本領域は素粒子から宇宙に至る広い分野で道標となることが期待されていたが、本成果によりテラスケールで新現象・新粒子の発見が大いに期待されることとなった。この新たな潮流は本領域研究がきっかけで発足したテラスケール研究会に引き継がれている。その他にも本領域の発足により、研究に専念できる環境を得た若手研究者により多くの成果が創出されており、フォロンティア事業による物の貢献とは相補的な知の貢献により、日本の Visibility の向上と国際共同研究で中心となって活躍する PI 人材の育成に貢献した。技術面では AI を駆使したデータ解析を研究現場に実装することにより、大学院生や若手研究者がトランスファブルスキルを短期間に習得できる環境を整えたことが高く評価できる。加速器実験のビックデータを用いて AI に自律的に法則を見つけさせる試みも今後の発展が期待される。一方、国際共同研究を中心とする本領域では COVID-19 の影響は甚大で、国際学会における招待講演数の減少や実験の遅延をもたらしたことは残念である。

### 飯嶋評価委員のコメント

先鋭的な高エネルギー加速器 LHC を用いた ATLAS 実験で、宇宙を支配する究極の物理世界を切り開こうとするのが本領域の真髄である。特に、ヒッグス粒子とトップクォークの測定は、LHC 加速器でしかできない純学問的に重要な研究である。研究期間中に、ヒッグス粒子とトップクォークの質量を精密に測定し、この結果から、ヒッグスポテンシャルの形状を探り、我々の宇宙の「真空」が準安定であること、従って新物理に伴うより安定な真空の存在を示唆することに成功した。さらに、ヒッグス場が、力を伝える素粒子（W/Z ボゾン）だけでなく、第三世代の物質構成粒子（t, b,  $\tau$ ）の質量起源となっていることも示した。ごく最近には、第二世代の  $\mu$  粒子との結合測定も進み、世代の起源解明の端緒となる成果も得られている。こうした学術的に極めて価値の高い成果を得ることを高く評価したい。この研究をさらに深化させるべく、将来の LHC 加速器の高輝度化に向け、半導体検出器や液体アルゴン電磁カロリメータ、トリガーシステムなど基幹技術の開発にも成功している。

以上の研究を進めるうえで、本科研費によって、若手が CERN 等に長期間滞在して海外研究者と積極的に協力・競争し、大規模な国際共同研究において高いビジリティと主導性を発揮することができたものとする。COVID-19 の影響はあるものの、オンラインによる物理解析や理論共同研究、テラスケール研究会等による研究を進めた。

最近の幾つかの素粒子実験で報告されている標準理論からのズレが、今後の ATLAS 実験で検証される可能性や、統合解析による新物理のモデル検証の可能性が検討されている。また、本研究の研究対象であ

る初期宇宙の真空場の相転移が原始重力波などの宇宙観測で検証できる可能性なども検討されている。公募研究や領域主催の研究会は、こうした融合研究を進める有益な場となっている。

素粒子実験の膨大なデータ解析に機械学習を積極的に導入し、さらには量子コンピューティングの応用研究にも着手している。これらは他分野に対する波及効果の高い研究であり、今後の発展に大いに期待したい。

### 森評価委員のコメント

1. 国際委員会や研究会などに参加しても、ATLAS 実験(物理解析や検出器の運用と R&D)や加速器開発において日本グループの大きな貢献の話をししばしば聞く。本領域の研究者が活躍している証しであり、評価に値する。物理解析や検出器の様々な R & D を行って国際的に評価されるためには、本領域の予算が必要不可欠であり、本領域はその予算を最大限活用していると判断できる。
2. 実験でヒッグス粒子との結合の強さの違いが素粒子の世代を作っていることを示唆したことは当り前の様だが真空の構造を解明するための重要な成果である。一方、時空の解明で期待された超対称性粒子を発見できなかったことは残念であるが、その存在の糸口として期待できる真空の準安定性を精度よく実験的に示したことは重要な成果である。さらに暗黒物質やミュオン  $g-2$  の標準理論からのズレ等の結果と合わせて、今後 ATLAS 実験で検証すべき領域を定め、それに向けた R&D を進めていることも評価する。今後も新発見を狙って研究を進展させて頂きたい。
3. COVID19 の影響で実験が遅れたことはやむを得ないことであったが、その中で遠隔ラボを構築するなどして、CERN の現場に滞在する必要最小限の研究者とともに R&D を推進できる環境を構築したことは、COVID19 の今後の影響が不明瞭な状況を考えると将来に向けて非常に意味がある。遅れを最小限にできることを期待する。
4. ATLAS 実験の持つビッグデータというユニークな点を活かし、人工知能や量子コンピュータという情報科学の分野へ学術の領域を拡げる研究を開始している。従来の素粒子実験の枠に留まらない領域に研究を拡げることで、学術的にも社会的にも思いもよらない大きな成果が生まれる期待が高まっている。

### 日笠評価委員のコメント

1. ヒッグス粒子の物質との相互作用はヒッグス粒子発見後の素粒子物理学の主要テーマの一つであるが、今回第3世代に加え第2世代の物質場の質量もヒッグスの湯川結合に起因することを示した。これは標準模型の検証を一步進めるものであり重要な成果である。一方、標準模型においては高エネルギー領域で宇宙が準安定状態にあることが、従来よりも正確に結論づけられた。これはこの領域が理論・実験を跨いで構成されていることを生かしたものである。標準模型を超える超対称模型では、超対称粒子が未発見であることが「自然さ」の考え方に一石を投じており、ミュオン  $g-2$  の測定結果を説明できるカラーを持たない軽い超対称粒子の探索が今後の重要な方向である。本領域の研究者は素粒子物理学の進むべき方向を示す船頭として、今後もその役割を果たすことが期待される。
2. 領域全体で頻繁に開催されたテラスケール研究会および理論班で行われた研究会は、LHC 実験・関連研究の最新成果の発表の場であるとともに、暗黒物質や宇宙の相転移など宇宙物理など周辺分野のトピックや素粒子物理における喫緊の問題の議論の場を提供するものでもあり、若手を含む多くの研究者の参加を得て有効に機能していた。COVID-19 拡大後もオンラインで継続して実施し、分野を支えている。理論・実験さらに素粒子・宇宙を横断する仕組みを是非今後とも継続して頂きたい。
3. 若手研究者が多数参加しておりそのキャリアパスは極めて重要である。これまで多くの若手研究者が成果を出し、アカデミックポストに就職してきたことは評価できる。宇宙物理、機械学習や量子計算機など領域の拡大を進めているが、それをさらに押し進め若手研究者のさらなる活躍を促すことが求められる。