

領域略称名：真空と時空

領域番号：2803

平成30年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る中間評価報告書

「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～平成32年度

平成30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

研究領域全体に係る事項

1. 研究領域の目的及び概要	4
2. 研究の進展状況	6
3. 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	9
4. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	11
5. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	14
6. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	19
7. 若手研究者の育成に関する取組状況	21
8. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	22
9. 総括班評価者による評価	23
10. 今後の研究領域の推進方策	25

研究組織

(総：総括班，支：国際活動支援班，計：総括班及び国際活動支援班以外の計画研究，公：公募研究)

研究項目	課題番号 研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属機関 部局 職	構成員数
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～ 平成 32 年度	浅井祥仁	東京大学 理学系研究科 教授	1
Y00 支	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～ 平成 32 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～ 平成 32 年度	陣内修	東京工業大学 理学院 准教授	3
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～ 平成 32 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～ 平成 32 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～ 平成 32 年度	久野純治	名古屋大学 基礎理論研究センター 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～ 平成 32 年度	戸本誠	名古屋大学 理学研究科 准教授	2
C02 計	16H06494 LHC での未知重粒子探索	平成 28 年度～ 平成 32 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
総括・支援・計画研究 計 8 件					
公募	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
公募	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

公募	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
公募	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
公募	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
公募	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(理学) 助教	1
公募	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
公募	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
公募	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
公募	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
公募	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
公募	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 准教授	1
公募研究 計 12 件					

研究領域全体に係る事項

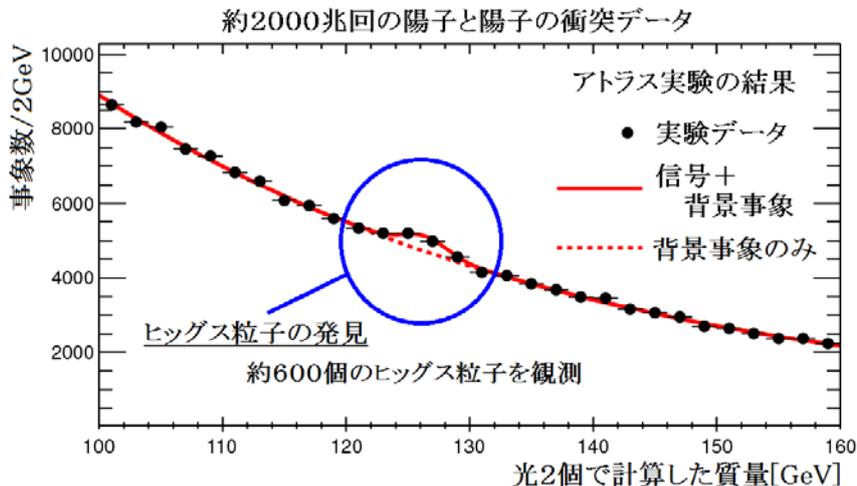
1. 研究領域の目的及び概要（2 ページ以内）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、応募時までの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

研究の学術的背景

2012 年 ヒッグス粒子が LHC で

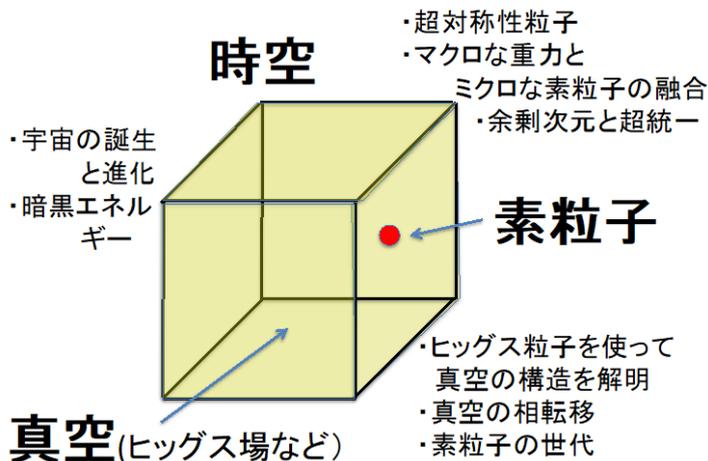
発見された。（右図はヒッグス粒子が二つの γ 線に崩壊した場合を探索したもので、二つの γ 線の不変質量分布 125GeV の所に、ヒッグス粒子起源のピークが観測されている）これは単に新粒子が見つかっただけのものではなく、二つの極めて重要な意味をもち、この重要性をうけて、翌 2013 年ノーベル物理学賞のスピード受賞につながっている。その二つの重要な意義とは、



- 真空は空っぽなのではなく、ヒッグス場で満ちている。真空に場が満ち、その変化（相転移）で宇宙が進化してきたことの実験的な証明であり、**真空の研究の重要性**を示すものである。
- このような軽いヒッグス粒子が存在することは、ヒッグス粒子の質量の近く『**テラスケール**(TeV=10¹²電子ボルトのエネルギースケール)』に、**新しい素粒子現象**があることの間接的な証拠である。

本領域の目的と全体構想

本申請領域の目的は、上で述べた二つの重要な意義を更に推し進め、超対称性粒子などテラスケールでの**新しい素粒子現象の発見を核に、新しいパラダイムを構築**することである。具体的には、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。ヒッグス粒子を通して真空の構造を探り、真空の相転移を解明し、宇宙の進化などへ研究を広げる。超対称性粒子など、素粒子と時空を結びつける新たな原理を発見する。こうして、素粒子-時空、素粒子-真空の解明をすすめる、最終的に、時空-真空の関係につながる全体構想である。

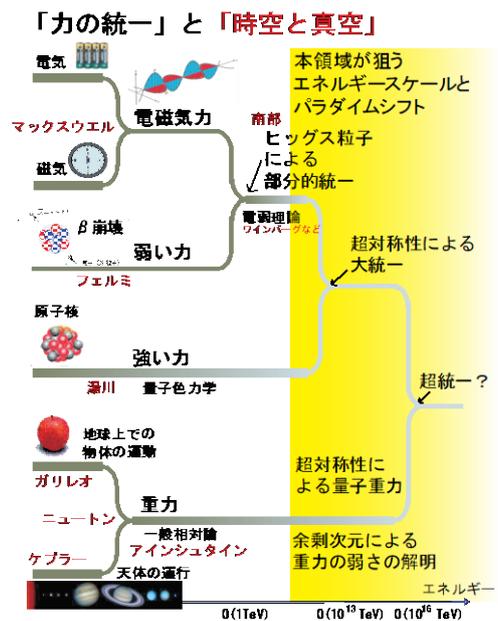
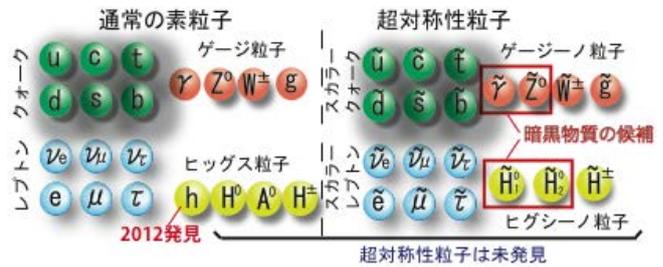


時空・真空・素粒子の研究を深めていく為に、3つの研究項目と6つの計画研究を設置した。

- 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。

多彩な手法で未踏のエネルギー領域であるテラスケール領域での研究を行い、その成果を素粒子研究のみならず、宇宙や真空・時空などに拡張することで領域は構成されている。この最終パラダイムに向け、6つの計画研究を統合して、以下の4つの研究が本領域の目標である。

- 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。



我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域

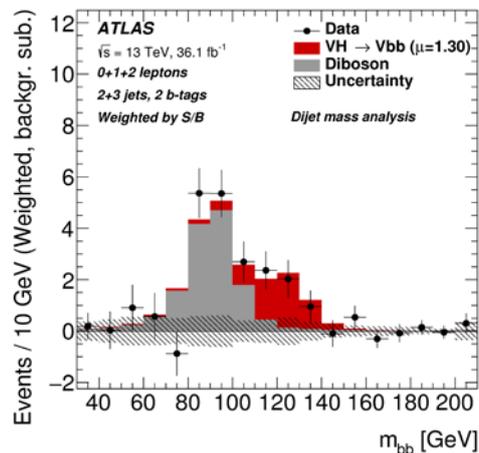
・湯川、朝永、小柴、南部、小林、益川、梶田、七氏のノーベル物理学賞受賞に示される様に、我が国の素粒子物理学の研究水準は国際的にも極めて高く、これを継承、発展させて行くことは我が国の学術水準の向上・強化に計り知れない大きな効果がある。同時に、先端的な国際研究であるために、激しい国際競争が行われている研究領域であり、**不断の集中的な研究を続けていくことが、国際的に高い研究水準を維持する上で不可欠**である。

・本領域での国際共同研究により、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、我が国の学術水準の高さを世界に示すばかりでなく、**今後の国際共同研究の推進に資するものあり**、国際共同研究のロールモデルとして重要である。

・世界最先端・最高エネルギー加速器実験での経験、そこでの経験を基に行った次世代最先端実験に向けての R&D を通して、学術・技術水準の強化に繋がる。

・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。(1) 未踏のテラスケール領域での確実な発見を核に、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。(2) さらにその成果を核に、素粒子・真空・時空を融合する領域の形成を目指す。これは全く新しい研究領域の創成であり、それらの成果から大きな広がりが期待される。**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。

することを直接示した（右図：赤色ヒストグラムがヒッグス粒子からの寄与）。その測定誤差は30%程度とまだ大きいですが、レプトンだけでなくクォークの質量もヒッグス機構が起源となっていることを示唆している。bクォークとの結合だけでなく、tクォークとの結合の兆候も掴んだ。トップクォーク対が生成された事象中に、ヒッグス粒子が潜んでいることがわかった。H→ $\tau\tau$ とH→bbの証拠と合わせると、第3世代粒子の質量の起源がヒッグス機構であると結論づけるに足る測定結果である。フェルミオンの質量起源もヒッグス場であることが分かった。同時に、H→ $\mu\mu$ が標準理論の予言通りまだ観測されておらず、このことは素粒子の世代を作っているのはヒッグス場であることを示す重要な結果である。



④ピクセル検出器開発では、2つ大きな進捗があった。1つは、50 μ m 角のピクセルサイズを持つ試作品センサーを開発したことで、もう一つは、ピクセルセンサーと信号読み出し用 IC、それらを搭載するフレキシブル基板のモジュール化である。フレキシブル基板試作品を開発製造した後、組み立ての為の治具等も開発し、モジュール化全てを本計画班で実施できるようになった。これらの成果は、ATLAS アップグレード用シリコン飛跡検出器の技術仕様書 (ATLAS-TDR-025, ATLAS-TDR-030) に盛り込まれた。なお、完成した仕様書は2018年4月に承認された。

【B02】

②ヒッグス粒子と他の素粒子との相互作用の強度測定は、ヒッグス場の種類などの同定に重要である。標準理論のヒッグス場に加え、新たな1重項や2重項ヒッグス場などを導入した拡張ヒッグスセクターモデルを調べ、現在の観測値との整合性を調べたが、まだ測定精度の範囲内で矛盾しないことがわかった。今後のB01との共同研究で、ヒッグス粒子の結合のズレが観測された時に、宇宙の進化において電弱相転移が一次か二次を判断するのにヒッグス自己相互作用の測定が重要であることを示した。もし電弱相転移が一次であれば、その際に重力波が発生するため、将来の重力波観測でさらにテストすることが可能であることがわかった。

B→D(*) $\tau\nu$ などB中間子の崩壊において標準理論では説明できない事象が複数報告されており、新たなヒッグス粒子やレプトクォークなどのテラスケールの質量を持つ新粒子の提案を行った。一方、LHC実験ではそれら新粒子の兆候をとらえておらず、質量や結合強度に制限を与えており、それらの制限と整合性のあるモデルを提案した。今後スーパーBファクトリー実験とLHC実験での相補的な検証について調べた。

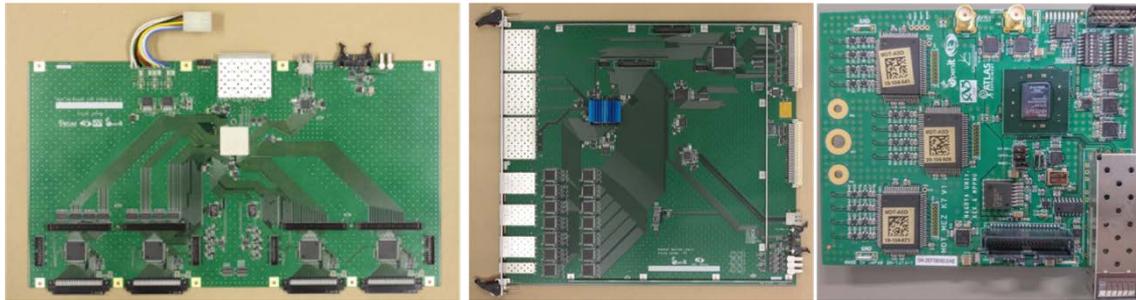
③まだ超対称性の兆候はつかめていないが、【A02】や上に述べたようにヒッグス場の相転移が、宇宙初期にあたえる可能性をしらべ、LHCと独立に検証する方法を考案した。

【C01】

②トップクォーク対生成の微分断面積をより精密に測定するなど、摂動論的QCDでトップクォーク対生成が良く理解されていることを示した。B01班と連携して、pp→ttH過程の生成断面積を4.2 σ （期待値3.8 σ ）の統計的感度で測定し、トップクォークの湯川結合を直接的に測定する貴重な成果が得られた。①A01班と連携して、トップクォークをプローブとした超対称性トップクォークやトップクォーク対共鳴粒子などの新物理探索を行った。厳しい制限が得られ、ヒッグス粒子の質量の安定性の「自然さ」に対する厳しい疑問を投げかけることとなった。

④「統合型 μ 粒子トリガー」に不可欠となる様々なエレクトロニクスを開発した（次のページ写真）。疑

似信号やテストビームを用いた動作検証により、本研究が開発したエレクトロニクスが高輝度 LHC 実験の仕様条件を満たすことを立証し、技術仕様設計書(ATLAS-TDR-026)を完成させることができた。



【C02】

①②重いゲージ粒子の発見は、標準理論の拡張やヒッグス機構の解明に重要な役割を果たす。LHC 加速器の衝突エネルギーを 13TeV にあげた直後の 2 年間のデータ (2015, 2016 年) を使って探索を推進してきた。新粒子がウィークボソン (W/Z) 2 つに崩壊し、それがクォーク対のみに崩壊する終状態・1 本または 2 本のレプトンを含む終状態で組織的な探索を行った。これにより、超重 3 重項粒子 (Heavy Vector Triplet) が 2.8TeV までに存在しないことを明らかにした。

④高輝度 LHC 実験において未知の重粒子探索を成功させるためには、新重粒子が生成された事象を選択的に記録する、現在よりも遥かに高い性能をもったトリガーの開発が必要である。リアルタイムで荷電粒子の軌跡を再構成する、軌跡トリガーのデザインと、そのプロトタイプとなる回路群の試験運用を現在の実験の LHC 実験環境の中で進めてきた。軌跡トリガーのデザインについては、本計画研究班の研究者が 2018 年春に公開した技術仕様設計書 TDR(ATLAS-TDR-029)における最重要事項の 1 つ、Associative メモリーサイズと軌跡発見効率の関係を明らかにする貢献を果たした。

設定目標①から④に対しての進展状況をまとめると

- ① 超対称性粒子の発見はまだなされていない。すでに 1~2TeV より重いことが分かっており、ヒッグス粒子 125GeV の質量を自然に説明することは難しくなっている。ボトムアップで発展してきた物理学のこれまでの大きな指導原理であった「自然さ」に疑問を投げかけるものであり、今後の素粒子研究に大きな影響を与える成果である。一方、2 から 3 σ 程度の小さな乖離は、いくつかの報告されており、これから増える 3 倍のデータで、新しい素粒子現象の探索を進めて行く。
- ② ヒッグス粒子と第 3 世代のフェルミ粒子 (トップクォーク、ボトムクォーク、タウレプトン) の結合強度が測定され、力を伝えるゲージ粒子 (W/Z ボソン) ばかりでなく、物質を形作るフェルミ粒子の質量の起源も同じヒッグス粒子であることが分かった。同時に第 2 世代のフェルミ粒子との結合は、小さいことが分かり、素粒子の世代を作っているのがヒッグス粒子であることが判明した。湯川結合やその定数 (世代によって 6 桁も違う) を解明していくことが次のステップである。
- ③ 新現象が直接観測されていないので、現在の素粒子の真空・時空像に新しい変革は得られていない。高いエネルギー (超弦理論などの高い対称性をもった理論) から直接標準理論を導き出す試みがなされてる。その時に、宇宙や重力波などにどのような効果があるかについての議論を行っており、加速器実験の結果とあわせてどう検証していくか進めている。
- ④ 次世代実験のうち、2026 年実験開始予定の高輝度 LHC 実験の R&D は無事終わった。成果は、TDR (ATLAS-TDR-025, 026, 029, 030 4 編) にまとめられた。今後も日本が主導してきた役割を果たす上で重要な成果である。これからは得られた成果に新しい基幹技術開発を加えて 2040 年頃に計画されている実験にむけて基礎研究をすすめる。

3. 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（2ページ以内）

審査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、当該コメント及びそれへの対応策等を記述してください。

審査結果の所見と留意点

本研究領域は、前身である新学術領域研究「先端加速器 LHC が切り拓くテラスケールの素粒子物理学～真空と時空への新たな挑戦（平成 23～27 年度）」でヒッグス粒子が発見されたことにより、素粒子物理学の標準理論の枠組みが完成し、自然の最も基礎的な構造の理解が大きく進歩したことを踏まえ、この成果を更に発展させてヒッグス粒子の発見のもたらす効果をさらに深く理解するとともに、フルスケールの LHC 加速器実験による新しい現象および新粒子の発見を目指す、我が国が強みを有する分野の提案である。

各計画研究代表者は素粒子物理学者が主であるが、(1)真空の探求（ヒッグス粒子の詳細な性質の探求）、(2)時空の探求（超対称性粒子の探索）、(3)重粒子の探求（トップ、W/Z による新現象の探索）を主題として掲げた 7 つの計画研究を、総括班を中心に配置し、真空・時空に絡む様々な物理学への貢献を目指すために必要な体制がとられている。学術的な波及効果は、新物理・新粒子の発見の存否に大きく依存するが、いずれの場合でも素粒子論の発展には重要な研究であり、挑戦する意義が高いと判断できる。LHC という国際的な巨大プロジェクトにおいて、日本の研究者グループがその一翼を担い続けるとともに、将来の ATLAS 高精度化実験を目指した基礎研究・開発も視野に入れた計画となっており、本分野の更なる発展への貢献が期待される

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

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り、3回（1回はこの秋に予定）の国際会議を時空、真空の観点から開催した。

A) 国際会議 「Physics in LHC and the Early Universe」 (2017 年 1 月 9-11 日 東大：右写真)

重力波発見や暗黒物質と最新の LHC の成果を結びつける議論をおこなった。参加者 117 名（うち、外国から 17 名）を得て、積極的な議論が行われた。



B) 国際会議 「Workshop on Beyond Standard Model and the Early Universe」 (2017 年 10 月 25-27 日 東北大学)

新学術領域「なぜ宇宙は加速するのか？」との共催で、マクロな銀河のたねとなる揺らぎの起源をミクロな素粒子物理の最新成果から考えるワークショップで、真空場と宇宙を結びつける議論を行った。

C) 国際会議 「Higgs Coupling 2018」 (2018 年 11 月 26-30 日 東京 開催予定)

LHC でのヒッグス粒子の詳細から、真空の構造をさぐり、宇宙のバリオン優位の起源などの解明をすすめる議論を行う予定である。

これらの国際会議の議論をきっかけに、共著論文を作成した。

1. 諸井 (A02 分担) は、新学術領域「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」(代表: 井上邦雄) の計画研究に分担として参加する中山和則とともに、超対称標準模型においてクォーク、レプトンのフレーバー構造を説明するフレーバー対称性を破る場が Peccei-Quinn 機構のアクシオン場である場合に着目、その模型における宇宙の熱史 (インフレーション、バリオン数生成、暗黒物質) について議論を行った。(論文 JHEP 1804 (2018) 094)
2. B02 班で雇用された研究員の桂川太一は、松崎真也とともに、宇宙項問題を説明する修正重力理論に含まれるスカラー場が宇宙暗黒物質になる可能性を明らかにした。(論文 Phys. Rev. D97 (2018) 064037)
3. 最近 EDGES 実験で報告された電波観測における 21cm 線吸収の異常に対して、諸井 (A02 分担) は、新学術領域「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」(代表: 井上邦雄) の計画研究に分担として参加する中山和則とともに、アクシオンの粒子による宇宙背景輻射の加熱の可能性を明らかにした。(論文: arXiv:1804.10378)

対応: 留意事項 (2) について

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」(これまで 5 回開催、6 回目は 7 月末の予定) での意見交換ばかりでなく、研究交流を行っている。

- 1) 野尻 (B02 分担)、諸井 (A02 分担) が共同研究を行い、準安定真空の崩壊率に対する補正の評価を確立させ、そのことで電弱真空の安定性の議論がより精密になった。(論文 Phys. Lett. B771 (2017) 281-287, JHEP 1711 (2017) 074)
- 2) 久野 (B02 代表) は、A02 班雇用の研究員、長井と、フレーバー物理などで用いられている有効理論の方法を用いて暗黒物質直接探索の予言の評価、特にディラックフェルミオンが暗黒物質である場合の評価を行っている。(論文: まもなく publish 予定)

A02, B02 班の費用のさらなる効率化を目指して

- ・導入するコンピュータの費用の削減を行った。これにより必要な資源量は満たされなかったが、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、運営費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、研究を遂行している。
- ・研究員の雇用経費も削減し、雇用条件が悪化したため、一部の公募で適当な人材がすぐに見つからない事態が発生した。予算を繰越し、研究員雇用 (2017 年度より採用) を行って計画を進めた。計画の遅延を防ぐために短期の研究支援者の雇用や既存の研究員を活用したため、大きな支障なく研究を推進することができた。
- ・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、video 会議などのシステムなどをもちいることで、国内旅費の削減を行った。総括班会議も、研究会の時に行う以外は、skype や video 会議を用いて、移動の時間と経費の節約に努めた。

4. 主な研究成果（発明及び特許を含む）[研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理する]

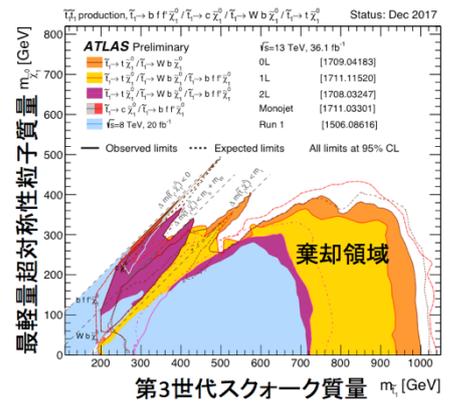
（3 ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果（発明及び特許を含む）について、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

研究項目 A(時空)

【研究計画 A01:超対称性の発見で構築する新たな時空像】

- カラーをもつ超対称性粒子(グルイーノ, スクォーク)の対生成事象に対する探索を重点的に行った。また、電弱ゲージ粒子や、質量が縮退した場合、長寿命粒子などの超対称性粒子探索も幅広く推進した。
- 超対称性粒子や新現象はまだ発見されていない。各探索チャンネルにおいて、超対称性粒子の質量に対し厳しい制限を得た。代表的には、グルイーノ質量に対して約 2.0 TeV、第 3 世代スクォークに対して約 1.0 TeV の質量下限値を得た。(右図)。一方、 $2\sim 3\sigma$ の超過事象が確認されているチャンネルもあり、H29 年以降のデータを用いた確認を目下進めている。
- LHC 加速器の高輝度化に向け、最終収束部ビーム分離用の大口径双極超伝導磁石 2m 長モデルの試作と性能評価試験を行った。冷却励磁試験にて機械特性、目標定格磁場を達成した。
- LHC 加速器の高エネルギー化に向けた最先端 Nb₃Sn 超伝導線材を CERN 及び国内線材メーカーと協力開発した。従来の臨界電流密度性能を大きく超える線材の開発に成功した。



【研究計画 A02:標準模型を超える素粒子模型と新たな時空像】

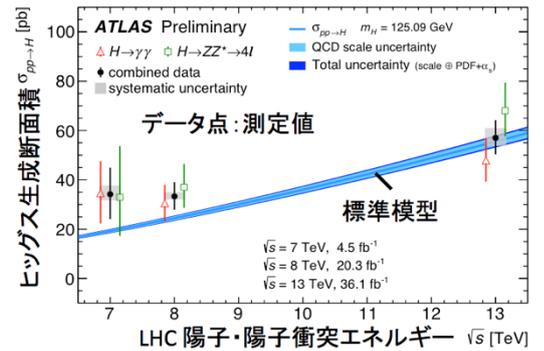
- 観測されたヒッグス粒子の質量値は、スクォーク質量が非常に重くなることを示唆する。大統一スケールで同一の質量をもつ場合でも、繰り込み群の効果により、トップパートナーの質量よりも他のスクォークの質量が格段に小さくなる、超対称粒子の質量パラメータ領域があることが分かった。この場合の超対称対の質量パターンの特徴及び LHC 実験での信号についての模型を新たに構築した。
- グルイーノが長寿命となる可能性がある。A01 と共同でトラック情報を用いたグルイーノの崩壊点再構成が標準模型からの背景イベント棄却に役立つことが分かった。この結果を用いると、崩壊点再構成を行わないグルイーノ探索と比べ、グルイーノ発見可能な質量領域が数 100 GeV 拡がること分かった。さらに、崩壊点再構成からグルイーノの寿命の測定が可能であることが分かった。将来の高輝度 LHC 実験に対して重要な示唆が得られた。
- 電弱真空の安定性はヒッグス粒子の質量に極めて敏感であることは以前から知られていたが、電弱真空の崩壊率の信頼度が高い計算はこれまでなされていなかった。B02 班とともに、不安定な真空の崩壊率を計算する新たな手法を開発し、特にこれまでなされていなかったゲージ不変な崩壊率の計算を行った。更にその結果を電弱真空の崩壊率の計算に応用し、標準模型における電弱真空の崩壊率を高い信頼度で計算することに成功した。

【公募研究 AK1-3】時空構造の解明に関係する、等価原理の検証実験 (AK1), 偏光変調器の開発 (AK2), 素粒子研究を宇宙・時空に拡張する研究 (AK3) を行った。AK1 では等価原理の破れの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。AK2 では偏光変調器の作製とその評価システムの構築を行った。AK3 では暗黒物質候補粒子をもつ模型の解析を進め、相転移由来の重力波を将来の干渉計で検出することが困難であることを明確にした。

研究項目 B(真空)

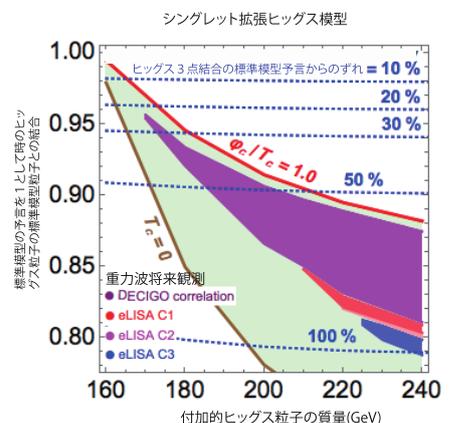
【研究計画 B01: ヒッグス粒子で探る真空と世代構造】

- ヒッグス粒子がボトムクォーク対に崩壊する事象を発見した。また、トップクォーク対が生成された事象中にヒッグス粒子が存在する兆候をつかんだ。これらにより、クォークの質量もゲージボソンと同じく、ヒッグス場の相転移により生成されていることが分かった。これまでに発見されていた $H \rightarrow \tau\tau$ 崩壊の証拠と合わせて、第3世代粒子の質量が真空の性質の動的な変化によるものであると実証した。
- 重心系エネルギー13 TeV でヒッグス粒子生成断面積を測定した。7 TeV および 8 TeV での測定結果も含めて、生成断面積が標準模型の予言と一致していることを突き止めた(右上図)。
- ピクセルサイズ $50 \mu m$ 角のシリコンセンサー試作品を完成させた。また、ピクセルセンサーと信号読み出し用 IC, それらを搭載するフレキシブル基板の一体化(モジュール化)に成功した。これらの成果により、ATLAS アップグレード用シリコン飛跡検出器の技術仕様書が完成した。



【研究計画 B02: 電弱対称性の破れと世代構造の統一的真空像】

- 拡張ヒッグス模型における電弱バリオン数生成のシナリオを研究し、ヒッグスの自己結合、他の素粒子との結合の大きなズレを評価、また1次的な電弱相転移の重力波スペクトルを導いた(右下図)。様々な拡張ヒッグス模型における量子補正の研究を評価し、ヒッグス結合定数を高精度予言する為の数値計算プログラム群 HCOUP を公開した。最小複合ヒッグス模型におけるヒッグス粒子単生成、複生成過程の標準理論予言からのずれを計算し求めた。
- 750GeV に共鳴がある2光子事象など LHC 実験で注目された新物理の兆候について現象論模型を構築した。また、クォークやグルーオンからくるジェットの内部構造の違いとその分布についての理論的な検討し、実験データによる具体的な検証結果から現象を記述する模型を構築した。将来計画である高輝度 LHC, 最近検討が始まった高エネルギー LHC での物理予言を行った。
- CP 対称性を破る湯川相互作用をもつ新カラー粒子から導かれる中性子の電気双極子能率を計算した。大統一模型の現象論研究を行い、X ボソンによる陽子崩壊の事象比が、GUT スケールに質量をもつ場による量子補正の模型にどう依存するかを明らかにした。また、SO(10) 超対称模型はフレーバー転換を起こす Z' ボソンを予言し、予定されている様々な低エネルギー実験において観測可能であることが分かった。観測されたヒッグス質量を説明する超対称標準模型の提案を行った。B 中間子崩壊の異常事象について拡張ヒッグス模型、レプトクォーク模型で説明できることが分かった。



【公募研究 BK1-7】宇宙の真空構造に関する、実験(BK1, 2), 理論(BK3-7)を進めた。

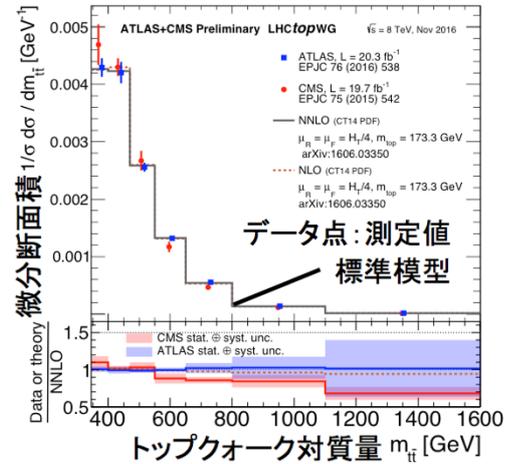
BK1 では強磁場下での高精度レーザーの偏光計測により、世界最高感度レベルの真空構造探索を達成した。また、光源の安定化により更なる感度向上への道筋を示した。BK2 では、長時間・空間分解能を有するシリコンセンサーを開発した。パラメータを変え試作・比較検討を行った。BK3 では、ヒッグスポテンシャルの構造を縦波 W ボソンから検証する方法を提案、超対称性模型と標準模型との差異を W ボソン散乱測定により定量的に検証する方法を確立した。BK4 では、弱い相互作用をする暗黒物質模型を構築し、直接観測で検証可能であることが分かった。BK5 では、単一イオン光時計の技術を用いて、精密分光により原子内の未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。BK6 では, 超対称性粒子からの量子補正によるポテンシャルにおいてモジュライの値が決定され, ダークセクターの性質などが決定されること等, 超弦理論と低エネルギー素粒子論との関係性が分かった。BK7 では, 複合ヒッグスセクターを含む有効理論を導く UV 理論のベンチマークモデルを検証し, LHC 実験における現象論モデルを構築した。

研究項目 C(素粒子)

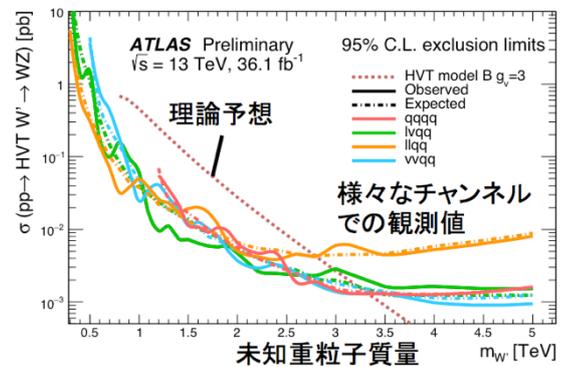
【研究計画 C01: トップクォークで探る真空と時空】

- トップクォークの放出方向, 運動量, トップクォーク対の不変質量や運動量などの関数でトップクォーク対生成微分断面積を測定し, 摂動論的 QCD が良い有効理論であることを明確にした。(右図)
- トップクォーク対とゲージボソンが随伴生成する ttW , ttZ 過程の生成断面積をそれぞれ 1.50 ± 0.8 pb, 0.9 ± 0.3 pb (重心系エネルギー 13 TeV の陽子陽子衝突において)と測定するなど, B01 班が主に進めるトップクォークの湯川結合測定に不可欠な ttH 過程の観測に向けた準備測定を行なった。 ttH 過程の生成断面積測定は, 790^{+230}_{-210} fb であり, 4.2σ (期待値 3.8σ) の統計的有意度を達成した。
- $t \rightarrow Hq$, $t \rightarrow \gamma q$, $t \rightarrow gq$, $t \rightarrow Zq$ ($q=c$ または u クォーク) などの FCNC 過程の探索を用いた新物理の間接的測定を行い, それらの崩壊分岐の上限値を 10^{-3} から 10^{-4} のレベルに下げることが成功した。
- トップクォークをプローブとして, 余剰次元や超対称性などの新粒子探索を A01 班と連携し, 例えば, ニュートラリーノ質量がない場合, 質量 1TeV 以下の超対称性トップクォークの存在を棄却した。
- 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 μ 粒子トリガーエレクトロニクスを開発を行った。疑似信号やテストビームを用いた動作検証により, 本研究が開発したエレクトロニクスが高輝度 LHC 実験の仕様条件を満たすことを立証し, 技術仕様設計書を完成させた。本領域の研究者が技術仕様設計書の執筆を主導した。



【研究計画 C02: LHC での未知重粒子探索】

- 未知の重粒子が 2 つのウィークボソンに崩壊する過程に着目して新粒子探索を行った。新粒子が超重 3 重項粒子であると仮定した場合は 2.8TeV, Spin-2 のグラビトンであると仮定した場合は 1.75TeV の質量下限値を得た (右図)。
- 重粒子探索の解析で重要となるジェットのエネルギー較正に関して 2 体の物理データを使った手法を開発した。20 GeV のジェットに対して 4.5%, 200 GeV に対して 1%, 2 TeV に対して 2%と, 広いエネルギー領域のジェットに対する高精度のエネルギー測定を確立した。
- 高輝度 LHC における重粒子探索のため, リアルタイムに荷電粒子の軌跡を再構築する新しいハードウェアトリガーを導入する。予め準備した検出器のヒットパターンと照合し, 電荷・運動量・射出位置と方向を同定する。軌跡パターンを蓄積するメモリー仕様の決定が鍵となる。約 50 万パターンの軌跡を蓄積可能なチップが目的性能を満たすことを明確にした。専用集積回路の設計が技術的に可能であることも明らかにして, 技術設計仕様書にまとめ・公表した。



【公募研究 CK1-2】 LHC や g-2 実験で検証が可能な現象論研究を行った。CK1 では, 単トップクォーク信号の精密測定により, 宇宙の真空の安定性を定量的に検証する方法を確立した。CK2 では, 拡張したゲージメディエーションモデルにより g-2 実験のアノマリーを自然に説明する現象論を確立した。

5. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5 ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果の公表の状況（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

- 論文の場合、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に*印を付してください。
- 別添の「(2) 発表論文」の融合研究論文として整理した論文については、冒頭に◎を付してください。
- 補助条件に定められたとおり、本研究課題に係り交付を受けて行った研究の成果であることを表示したもの（論文等の場合は謝辞に課題番号を含め記載したもの）について記載したもののについては、冒頭に▲を付してください（前項と重複する場合は、「◎▲・・・」と記載してください）。
- 一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

主な論文（すべて査読あり）

下記の論文のうち著者が ATLAS Collaboration となっているものは共著者に次を含む。

ATLAS Collaboration: S. Asai, K. Hanagaki, K. Hara, Y. Horii, Y. Ikegami, M. Ishino, O. Jinnouchi, J. Maeda, K. Nagano, K. Nakamura, H. Nanjo, S. Oda, O. Sasaki, S. Shimizu, T. Sumida, J. Tanaka, K. Terashi, J. Tojo, M. Tomoto, F. Ukegawa, T. Yamanaka, Y. Yamazaki, K. Yorita et al.

【計画研究 A01】

1. 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
2. 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
3. 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
4. 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
5. 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
6. ▲*M. Sugano, T. Nakamoto, K. Sasaki, et al., “Training Performance with Increased Coil Pre-stress of the 2-m Model Magnet of Beam Separation Dipole for the HL-LHC Upgrade”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 28-3, 4000805, 2018
7. ◎*A. Nishimura, H. Miyata, M. Yoshida, M. Iio, K. Suzuki, T. Nakamoto, M. Yamazaki, T. Toyama, “A high field and cryogenic test facility for neutron irradiated superconducting wire”, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 279, 012029, 2017
8. ◎*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. ▲M. Yamaguchi and W. Yin, “A novel approach to finely tuned supersymmetric standard models: The case of the non-universal Higgs mass model”, PTEP, 023B06, 2018

2. ▲ S.Iso and K. Kawana, “RG-improvement of the effective action with multiple mass scales”, JHEP 1803, 165, 2018
3. ▲ H. Hajime, S. Iso, D.S. Lee, Y. Sekino and C.P. Yeh, “Vacuum fluctuations in an ancestor vacuum: A possible dark energy candidate”, Phys. Rev. D, 97, 043517, 2018
4. ▲ M. Kawasaki, K. Kohri, T. Moroi and Y. Takaesu, “Revisiting Big-Bang Nucleosynthesis Constraints on Long-Lived Decaying Particles”, Phys. Rev. D, 97, 023502, 2018
5. ▲ 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
6. ▲ S. Iso, P.D. Serpico and K. Shimada, “QCD-Electroweak First-Order Phase Transition in a Supercooled Universe”, Phys. Rev. Lett., 119, 141301, 2017
7. ▲ M. Endo, T. Moroi, M. M. Nojiri and Y. Shoji, “False Vacuum Decay in Gauge Theory”, JHEP 1711, 074, 2017
8. ▲ Y. Ema, K. Hamaguchi, T. Moroi and K. Nakayama, “Flaxion: a minimal extension to solve puzzles in the standard model”, JHEP, 1701, 096, 2017
9. ▲ H. Ito, O. Jinnouchi, T. Moroi, N. Nagata and H. Otono, “Extending the LHC Reach for New Physics with Sub-Millimeter Displaced Vertices”, Phys. Lett. B, 771, 568, 2017
10. ▲ S. Chigusa and T. Moroi, “Bottom-Tau Unification in Supersymmetric SU(5) Models with Extra Matters”, PTEP, 063B05, 2017

【計画研究 B01】

1. ATLAS Collaboration, “Search for the standard model Higgs boson produced in association with top quarks and decaying into a bb pair in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, Phys. Rev. D, 97, 72016, 2018
2. ATLAS Collaboration, “Evidence for the associated production of the Higgs boson and a top quark pair with the ATLAS detector”, Phys. Rev. D, 97, 72003, 2018
3. ATLAS Collaboration, “Search for an invisibly decaying Higgs boson or dark matter candidates produced in association with a Z boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, Phys. Lett. B, 776, 318, 2018
4. ATLAS Collaboration, “Evidence for the $H \rightarrow bb$ decay with the ATLAS detector”, JHEP, 1712, 024, 2017
5. 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, 11-31, 2017
6. ATLAS Collaboration, “Search for new resonances decaying into a W or Z boson and a Higgs boson in the llbb, lvbb, and vvvb channels with pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, Phys. Lett. B, 765, 32-52, 2017
7. 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, 1608, 045, 2016
8. *Y. Unno, K. Hanagaki, K. Hara, Y. Ikegami, K. Nakamura, J. Tojo, et al., “Development of n^+ -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. ▲T. Abe, J. Hisano, R. Nagai, “Model independent evaluation of the Wilson coefficient of the Weinberg operator in QCD”, JHEP, 1803, 175, 2018
2. ▲J. Hisano, W. Kuramoto, T. Kuwahara, “Light Stops, Heavy Higgs, and Heavy Gluinos in Supersymmetric Standard Models with Extra Matters”, PTEP, 033B10, 2017
3. ▲B. Bhattacharjee, S. Mukhopadhyay, M. M. Nojiri, Y. Sakaki, B. R. Webber, “Quark-gluon discrimination in the search for gluino pair production at the LHC”, JHEP 1701, 044, 2017
4. ▲K. Hashino, M. Kakizaki, S. Kanemura, P. Ko, 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, 49-54, 2017
5. ▲S. Kanemura, M. Kikuchi, K. Yagyu, “One-loop corrections to the Higgs self-couplings in the singlet extension”, Nucl. Phys. B, 917, 154-177, 2017
6. ▲J. Hisano, T. Kuwahara, Y. Omura, T. Sato, “Two-loop Anomalous Dimensions for Four-Fermi Operators in Supersymmetric Theories”, Nucl. Phys. B, 922, 77-93, 2017
7. ▲C. Han, M. M. Nojiri, M. Takeuchi, T. T. Yanagida, “Surviving scenario of stop decays for ATLAS l +jets+ E_{miss}^T search”, Phys. Lett. B, 767, 37-41, 2017
8. ▲S. Kanemura, M. Kikuchi, K. Sakurai, K. Yagyu, “Gauge invariant one-loop corrections to Higgs boson couplings in non-minimal Higgs models”, Phys. Rev. D, 96, 035014, 2017
9. ▲M. Aoki, S. Kanemura, K. Sakurai, H. Sugiyama, “Testing neutrino mass generation mechanisms from the lepton flavor violating decay of the Higgs boson”, Phys. Lett. B, 763, 352-357, 2016
10. ▲J. Hisano, Y. Muramatsu, Y. Omura, Y. Shigekami, “Flavor physics induced by light Z' from SO(10) GUT”, JHEP 1611, 018, 2016

【計画研究 C01】

1. ATLAS Collaboration, “Search for the standard model Higgs boson produced in association with top quarks and decaying into a $b\bar{b}$ pair in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, Phys. Rev. D, 97, 072016, 2018
2. 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”, EPJC, 77, 40, 2017
3. ATLAS Collaboration, “Search for top quark decays $t \rightarrow qH$, with $H \rightarrow \gamma\gamma$, in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions using the ATLAS detector”, JHEP, 1710, 129, 2017
4. 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
5. 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
6. ATLAS Collaboration, “Measurement of the top quark mass in the $t\bar{t} \rightarrow$ dilepton channel from $\sqrt{s} = 8$ TeV ATLAS data”, Phys. Lett. B, 761, 350-371, 2016
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

【計画研究 C02】

1. ATLAS Collaboration, “Performance of the ATLAS trigger system in 2015”, EPJC, 77, 1-53, 2016
2. ATLAS Collaboration, “Searches for heavy diboson resonance in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with ATLAS detector”, JHEP, 1709, 173, 2016
3. ATLAS Collaboration, “Search for single production of vector-like quarks decaying into Wb in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector”, EPJC, 76, 1-26, 2016
4. ATLAS Collaboration, “Search for new phenomena in dijet mass and angular distributions from pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, Phys. Lett. B, 754, 302-322, 2016
5. K. Yorita, et al. [ATLAS FTK Collaboration], “Design of a hardware track finder (Fast Tracker) for the ATLAS trigger”, JINST, 11, C02056, 2016
6. ATLAS Collaboration, “Reconstruction of hadronic decay products of tau leptons with the ATLAS experiment”, EPJC, 76, 1-26, 2016
7. 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, 372-392, 2016

【公募研究】

1. ▲R. Daido, F. Takahashi and N. Yokozaki, “Enhanced axionphoton coupling in GUT with hidden photon”, Phys. Lett. B, 780, 538-542, 2018
2. ▲D. Goncalves, K. Kong, K. Sakurai, M. Takeuchi, “Monotop signature from a fermionic top partner”, Phys. Rev D, 97, 015002, 2018
3. ▲N. Maekawa, Y. Omura, Y. Shigekami and M. Yoshida, “Spontaneous SUSY breaking without R-symmetry in supergravity”, Phys. Rev. D, 97, 055015, 2018
4. ▲T. Suehara, I. Sekiya, S. Callier, V. Balagura, V. Boudry, J-C. Brient, C. de la Taille, K. Kawagoe, A. Irles, 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
5. ▲T. Kobayashi, N. Omoto, H. Otsuka, and T. H. Tatsuishi, “Supersymmetry preserving and breaking degenerate vacuum, and radiative moduli stabilization”, Phys. Rev. D, 96, 046004, 2017
6. ▲*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
7. ▲K. Ishiwata and Y. Yonekura, “Longitudinal W boson scattering in a light scalar top scenario”, Phys. Rev. D, 96, 015009, 2017
8. ▲K. Mikami, *M. Tanaka, Y. Yamamoto, “Probing new intra-atomic force with isotope shifts”, EPJC, 77, 896, 2017
9. ▲T. Shindou, “UV complete model with a composite Higgs sector for Baryogenesis, DM, and neutrino masses”, BLED WORKSHOPS IN PHYSICS 18, 190-196, 2017

書籍

1. 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. Physics in LHC and the Early Universe, 2017年1月9-11日, 東京大学
2. Workshop on Beyond Standard Model and the Early Universe, 2017年10月25-27日, 東北大学
3. Higgs as a Probe of New Physics 2017, 2017年3月1-5日, 富山大学
4. Out of the Higgs Era into the Dark, 2017年11月20-24日, ダーラム大学(英国)

【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, 2017年4月7日, 2017年12月25日, 東京大学
3. Anomalies in b to sll and its implications, 2017年5月11日, 東京大学

アウトリーチ活動

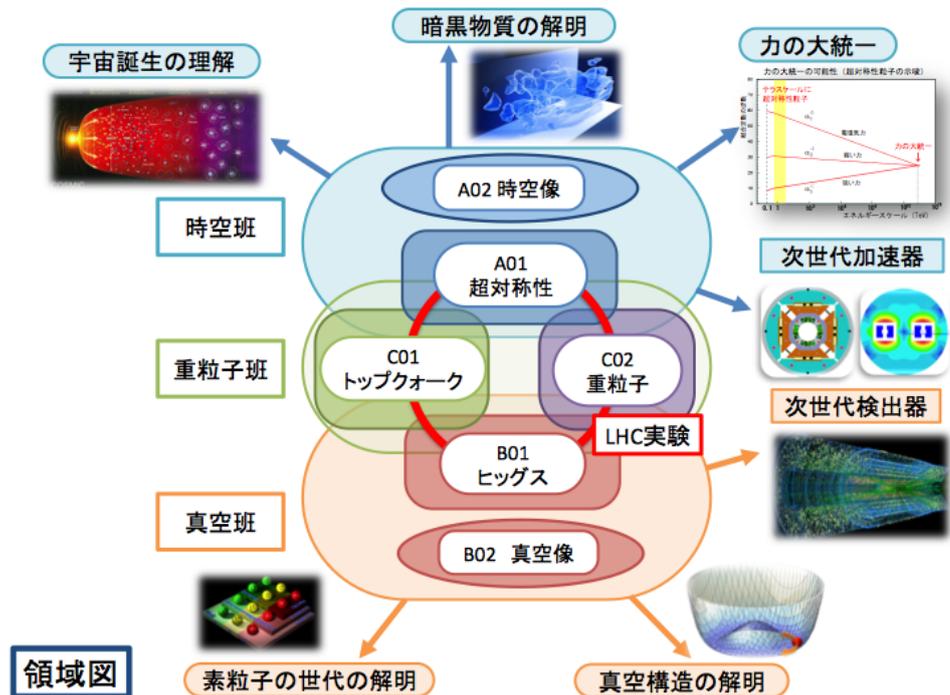
1. 一般公開講演会 第33回湯川記念講演会「素粒子の質量起源: 湯川カップリングと対称性の自発的破れ」
兼村晋哉, 大阪大学南部陽一郎ホール 2018年1月21日
2. 一般公開講演会 NHK 文化センター名古屋教室 宇宙講座 2017「宇宙にみちる水素」, 題目「素粒子と宇宙を記述する未知の対称性: 超対称性」久野純治, 2017年10月4日
3. 一般公開講演会 東京大学特別講座「宇宙誕生の非常識—ヒッグス粒子を通して宇宙誕生に迫る—」浅井祥仁, 取手ウェルネスプラザ 2017年8月27日
4. 一般公開講演会 東京大学オープンキャンパス「世界最高エネルギー加速器 LHC で探る宇宙誕生の謎」浅井祥仁、川本辰男、江成祐二, 東京大学, 2017年8月2-3日
5. 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
6. 一般公開講演会「加速器で宇宙をさぐる」花垣和則, 大学共同利用機関シンポジウム, 秋葉原, 2016年11月27日
7. 一般公開講演会 NHK 文化センター名古屋教室 宇宙講座 2016「最新宇宙学: 名古屋大学発」, 題目「素粒子質量の起源、ニュートリノ質量の起源」久野純治, 2016年9月7日
8. 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!～」坂本宏, 石野雅也, 東京大学 2016年8月3-4日
9. 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
10. KEK 高校生実習受入「世界最大の加速器 LHC がさぐる宇宙のはじまり」花垣和則, 富山高校(2017年8月2日), 奈良高校(2017年8月3日), 「質量の起源ヒッグスを追う」花垣和則, 川越高校(2016年7月25日), 宇都宮高校(2016年11月29日)
11. 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
12. 高校生対象の講演会 高校出前講義「世界最大の加速器で探る素粒子と宇宙」山崎祐司, 三重県立四日市高校 2017年11月8日
13. 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」寺師弘三 2017年10月5日

6. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2 ページ以内）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、研究組織間の連携状況について組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

研究組織の関係

「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、右図中央の LHC 実験で示された 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。



研究項目 A（時空）の公募研究：

- AK1) 「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」（実験、代表：神谷）
- AK2) 「CMB 偏光超精密観測に用いる非駆動型偏光変調器の開発」（実験、代表：石野）
- AK3) 「加速器実験と宇宙観測に基づく時空の構造の解明」（理論、代表：柿崎）

研究項目 B（真空）の公募研究：

- BK1) 「真空のポンプ・プローブ実験による真空構造の解明」（実験、代表：難波）
- BK2) 「高時間・空間分解能を持つ新型シリコンセンサーの開発」（実験、代表：末原）
- BK3) 「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」（理論、代表：石渡）
- BK4) 「フレーバー物理による暗黒物質と真空構造の解明」（理論、代表：大村）
- BK5) 「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」（理論、代表：田中）
- BK6) 「超弦理論におけるモジュライの物理について」（理論、代表：小林）
- BK7) 「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」（理論、代表：進藤）

研究項目 C（重粒子）の公募研究

- CK1) 「超対称 ttH プロセスで探る真空像」（理論、代表：竹内）
- CK2) 「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」（理論、代表：横崎）

12 の公募研究は、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更に広げる為に、以下の 5 つの領域内の役割を担って、研究項目 A-C と共同で研究をすすめている。

- 1) 低エネルギー（Axion のような）領域での真空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（AK1, BK1）
- 2) 素粒子の研究を宇宙・時空物理へと拡張する研究（AK2, AK3, BK3, BK4）
- 3) 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（BK6）
- 4) 次世代の加速器実験の R&D（BK2）

5) 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 (BK5, BK7, CK1, CK2)

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。A02, B02 は図では離れているが、3. の所見への対応ですすでに述べた様に、協力しており、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これまで5回ひらき、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 (3. 所見への対応参照) を推進している。

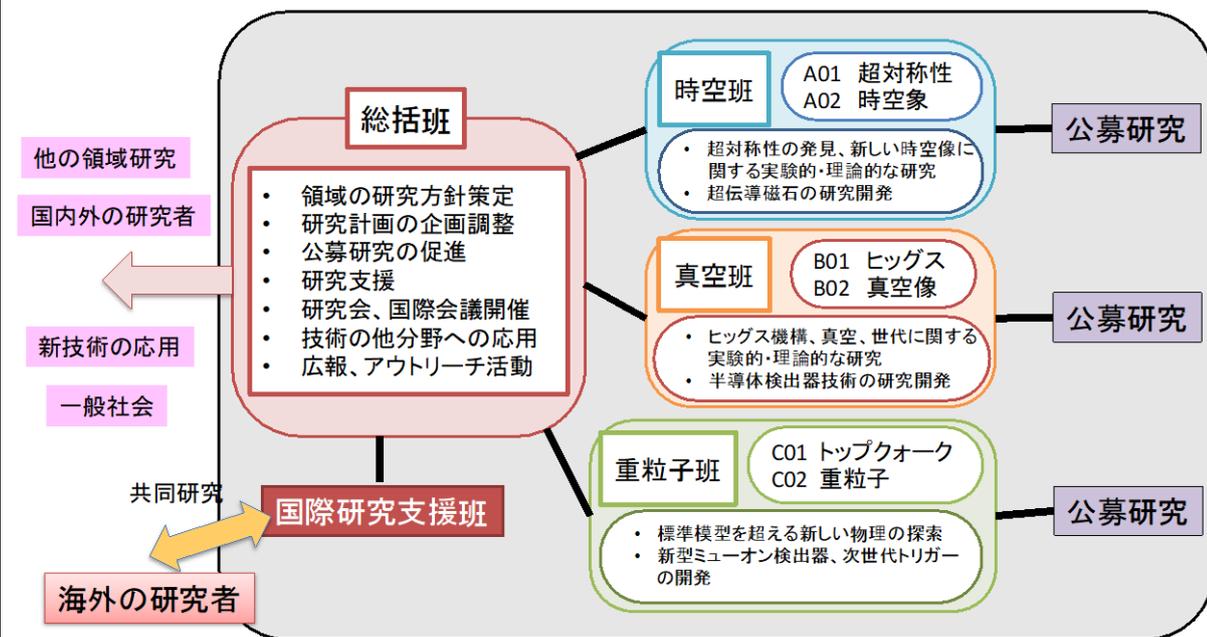
理論実験の共同研究例：

(1) H. Ito, O. Jinnouchi, T. Moroi, N. Nagata, H. Otono,

“Extending the LHC Reach for New Physics with Sub-Millimeter Displaced Vertices”,
Phys.Lett. B771, P. 568, (2017)

(2) H. Fukuda, M. Ibe, O. Jinnouchi, M. Nojiri,

“Cracking Down on Fake Photons – A Case of 750 GeV Diphoton Resonance –”,
PTEP, 2017 033B05, 2017



7. 若手研究者の育成に係る取組状況（1ページ以内）

領域内の若手研究者の育成に係る取組状況について記述してください。

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。若手研究者は、そのような環境である CERN に長期滞在し、諸外国の第一線の研究者と議論を重ね切磋琢磨することで、国際的に活躍する優秀な研究者に成長することができる。最先端の素粒子研究に従事することで、研究を直に学ぶ、経験することで将来のキャリアについて考える機会を与えている。修士号を取得した学生は 41 名で 17 名が進学、博士号を取得した学生は 28 名でそのうち 17 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。

実験・理論の融合を通じた若手研究者の育成

本領域の展開する研究は、最先端の素粒子・宇宙研究であると同時に、領域として実験・理論を融合した研究を推進してきた。若手研究者にはテラスケース研究会、共同研究会、国際会議を開催する(合計 21 回)などして実験と理論の両方の視点から研究を進める、他では得がたい研究環境を提供を行っている。

博士研究員の雇用と育成

本領域の特徴として博士研究員(13 名)を多く採用した。LHC・アトラス実験の Run 2 の成果が出続けるなか、取り組むべき研究テーマは次々と生まれている。このような研究環境は単に若手研究者を引きつける魅力ある環境としてだけでなく若手研究者を優秀な研究者に育成する環境でもある。若手研究者 171 名が参加する研究領域である。かれらの多くは、これらの研究をへてアカデミックな分野でプロモーションし活躍している。最後に本領域に関わった若手研究者の動向をまとめる。

8. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）（1 ページ以内）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について総括班研究課題の活動状況と併せて記述してください。

◎ 設備等の活用状況

本領域では、LHC・アトラス実験の運転のために、研究者が実験の行われている CERN に長期滞在し、検出器の運転を行いながら、物理研究を推進している。また次世代加速器の開発や、アトラス実験の高度化に向けた新型検出器開発を国内で進めている。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、一部ものは領域内の研究グループ間で共有し有効活用した。

(1) Logic Analyzer 34 channels（型番 16861A） 2,102,868 円（名古屋大学）（H29）

C01 班と C02 班（名古屋大学、神戸大学、KEK、東京大学、京都大学など）が共同で開発を進めるアトラス実験の高度化に向けた新しい μ 粒子トリガーエレクトロニクス動作検証のために Logic Analyzer 34 channels（型番 16861A）を購入した。C01 班と C02 班との間で組織立って研究を進め、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に選んだ結果、効率的に開発したエレクトロニクスの動作検証を終えることができ、予定通りに 2 種類の技術仕様設計書（Muon と TDAQ）を完成させることができた。

(2) 鉄ヨーク用電磁鋼板 約 191 万円（1,919,563 円 : 7,280kg） JFE スチール EFE2R（H28）

超伝導コイル部品用ガラス繊維強化プラスチックパイプ 約 285 万円（2,851,200 円, 4 本）

有沢製作所 S ガラスクロス基材 BT2160/2170 プリプレグ S-BT パイプ

1 番目は次世代加速器用に鉄ヨーク用電磁鋼板であり。これは D1 超伝導磁石の機械支持構造と磁束リターンの機能を担う『鉄ヨーク』の原材料となるものである。2, 3 番目は、超伝導コイルの主要部品となるウェッジ及びエンドスペーサーの素材であり、D1 磁石の高い耐放射線機械特性を実現できた。

(3) メカニカルショートモデル向け精密鉄ヨーク 約 145 万円（1,447,200 円, 1 式）

アキタファインブランキング F, S ヨーク <http://www.akitafb.co.jp/seihin.html>

超伝導磁石用材料剛性試験装置 約 50 万円（502,200 円, 1 式） J121-812-001

D1 超伝導磁石の機械構造設計を検証するために、メカニカルショートモデル向けの鉄ヨーク板や超伝導磁石の磁場性能やクエンチ性能に強く影響を与える超伝導コイルの機械特性を測定するための装置を購入し、プロトタイプ機が十分な機械的構造があることを確認した。

◎ 研究費の効果的使用について

本領域の主な活動が、CERN における実験データ収集活動ならびにデータ解析業務であるため、研究者を、特に若手の研究者・大学院生を多人数 CERN に長期派遣する必要があった。優秀な若手研究者や大学院生が長期に滞在できるようにし、旅費の支給を抑えて、長期に滞在できるようにし、経費の効果的使用に努めている。また、活動を定期的に評価し、優秀で活動的な人材に絞って派遣している。

また、優秀な若手研究者の育成が、本領域の大きな目的である。特に理論研究班（A02, B02）では、若手研究者雇用のための人件費が研究費の主要項目となっている。実験・理論合わせて 14 名の若手研究者を雇用している。高い倍率の中から選んだ研究者であり、最新の成果がでるように、実験・理論交流を進めながら育成を行っている。

9. 総括班評価者による評価（2ページ以内）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

本領域は以下の3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いただいている。

飯嶋徹（名古屋大学大学院・理学研究科・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（東北大学大学院・理学研究科・教授）

飯嶋評価委員のコメント

1. 先鋭的な高エネルギー加速器実験で、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。ヒッグスの性質の解明は確実に進んでおり、それだけでも素粒子物理学の進歩に大きく貢献する成果が出てきていると言ってよい。
2. 超対称性などの新物理探索に対して、組織的な物理解析が精力的に進んでいる。その結果、新物理の兆候はまだ見えていないが、それもまた素粒子物理の原理となっている「自然さ」に疑問を投げかけるインパクトの大きな結果となっている。今後、さらに感度を向上した結果に期待したい。
3. 高エネルギーフロンティアでの先鋭的な素粒子研究を進めながらも、研究会等で、低エネルギーでのフレーバー物理、暗黒物質研究との連携研究や、宇宙物理との境界研究を積極的に進め、理論研究の論文成果も出ていることは高く評価できる。今後も更に発展させて欲しい。
4. 既存のデータから以上の成果を出しつつ、将来に向けた装置開発目標を明確化して進めている。大学研究室で見えても、その方針が大学院生にも浸透し、活気ある研究が進んでいると感じる。高輝度LHCに向けても日本人研究者が主導的に技術提案を進めている。
5. 本領域によって、若手がCERN等に滞在して、海外研究者と積極的に協力・競争することが可能となっていることが、以上の成果に繋がっている。その点では、旅費やポスドク雇用費の不足がちなのが懸念される。他の研究経費との連携など工夫が必要である。
6. アウトリーチ活動も活発なようである。LHC実験の成果や意義を国民に伝え理解を得ることが、ILCやFCCのような将来計画を進めるうえで重要となるので、今後も積極的に進めることを期待したい。

森評価委員のコメント

1. CERNの委員会などに参加しても、日本の研究者の大きな貢献の話を聞く。物理解析、検出器の運用から、R&Dまで広域にわたって高く評価されており、領域が有効に活動している証しであり、評価に値する。
2. ATLAS実験のグループ会議を日本で開催し、300名を超える海外のメンバーが訪日予定であることなどが、領域をはじめとする日本の活躍の証しであり、多くの国際会議を開いて活発な活動を行っている。これも評価の値する。
3. 超対称性粒子がまだ発見されていないのは残念であるが、これから大量のデータが取得、解析されるのを期待している。これらの全データを使って、是非兆候を捉えてもらいたい。その時は、単発な解析でなく、網羅的な研究が重要で、領域内外の共同研究をもっと加速して、いい結果を出してもらいたい。

4. 旅費の不足が深刻そうである。旅費の滞在費などを大きく抑制するなど努力がみられるが、他の財源の獲得などを行わないと、日本の活動の将来に大きな影響を残すことになる。国際共同研究の重要性が、アカデミア全体で言われているなかで、この領域の活動は、ロールモデルであり、今後の活動に注視したい。
5. この領域の目指す、真空の解明や超対称性による新しい素粒子像は、素粒子物理研究の方向性をきめるものであり、ILCやFCCなどの多くの将来計画につながっており、コミュニティに果たした役割はきわめて大きい。

日笠評価委員のコメント

1. 領域の主導により、理論・実験合同の研究会を定期的で開催し、最新の実験・理論の研究成果を積極的に発信している。また、理論班は様々な研究会、勉強会を開催しており、若手の教育、理論研究者の交流に貢献をしている。理論班は、領域外の研究者との研究会や共同研究も進められており、領域内の発展を越えて広く物理の発展に貢献をしており、素粒子分野に極めて大きな貢献をしている領域である。
2. ゲージ階層性問題や暗黒物質の観点から超対称模型はテラスケール新物理の有力候補であるが、超対称性粒子の探索は、崩壊モードを網羅的に捉える系統的な解析が丁寧に行われており、これによりグルイーノに対して約2 TeV、第3世代のスクォークに対して約1 TeV という制限をLHC実験はこれまで導いた。このことは、「自然さ」という観点から導かれた比較的軽い超対称粒子の存在への期待を裏切るものであり、「自然さ」という理論のパラダイムの転換を今後導きうる重要な結論であり、今後の研究がますます重要である。
3. ヒッグス粒子の発見以降、ヒッグス粒子の相互作用に対してより精密な測定がなされ、ヒッグス機構がW, Zボゾンだけではなく、第3世代の粒子の質量にも関与していることがほぼ実験的に確立されつつあり、インパクトのある結果である。今後はヒッグス機構のより精密なテストを通して、ヒッグス機構の研究が期待されるが、実験・理論の協力が不可欠であり、領域の活動に期待する。
4. 本領域の理論研究は、以上の観点を正しく踏まえ、着実にインパクトのある研究を進めており、順調に研究が進捗していると判断する。今後新たな物理の発見があれば素粒子物理学の進むべき方向性がさらに明確になり、これまで展開してきた研究が大きく花開くことが期待される。

10. 今後の研究領域の推進方策（2 ページ以内）

今後どのように領域研究を推進していく予定であるか、研究領域の推進方策について記述してください。また、領域研究を推進する上での問題点がある場合は、その問題点と今後の対応策についても記述してください。また、目標達成に向け、不足していると考えているスキルを有する研究者の公募研究での重点的な補充や国内外の研究者との連携による組織の強化についても記述してください。

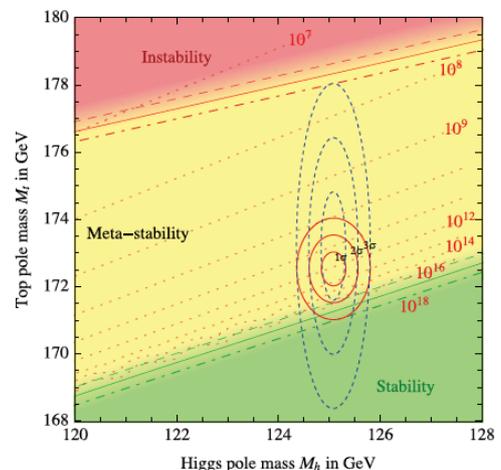
LHC 実験は、これまでもデータと合わせて第 2 期実験全体で、 150fb^{-1} のデータを収集する予定である。この中間評価で示しているデータの 3 倍になる。これを用いて、4 つの設定目標へむけて以下の通りに研究を推進する。

- ① A) 現在観測されている小さな乖離 ($2-3\sigma$ 程度) の理解、LHCb でのアノマリーに対応する探索を進める。データ量が大きく増えるため、これらの理解が進むことが期待でき、新現象の兆候がつかめる可能性もあり、領域全体で多角的に研究をすすめる。
- B) 超対称性粒子や電弱対称性の破れの起源の可能性となる現象の探索は、系統的に行い漏れがないようにすすめる。特に、探索している粒子（グルイーノやスカラートップクォーク、チャージーノなど）が、ニュートラリーノとの質量差が比較的小さい領域では、探索が難しくなる。検出器の理解やバックグラウンドの理解が鍵となるため、領域全体で情報を共有が不可欠である。理論研究や領域外の研究から、重点的に行う探索モードや質量領域などについての考察するため、研究会などを通して共同研究を推進する。
- C) 直接探索ばかりでなく、C01 班のトップの精密測定や、C02 班のゲージ粒子の精密測定や、Super-KEKB, LHC b などの精密測定、ニュートリノ CP の破れなど多くのヒントを新現象発見につなげていく。

これらを総動員し、新現象の兆候をつかむ。このため、公募研究に積極的に外部の実験を採用したり、他の領域（地下実験、ニュートリノ、宇宙、重力波など）との連携を推進し、組織的な研究をすすめる。

② ヒッグス粒子の結合の精密測定から、真空の安定性や宇宙初期の解明、宇宙の相転移の機構を探る。

右図に示すようにヒッグスの質量や性質、トップクォークの質量の測定で宇宙の真空の安定性がわかる。測定の精度をかめていくことで、宇宙の安定性やポテンシャルが解明できる。これからは、系統誤差の解明による誤差の制御と、第 2 世代の湯川結合の測定が重要である。系統誤差には、理論の高次計算などがあり日本ではあまり研究されていない部分であった。この目的で本領域の代表は 2012 年にヒッグス粒



子発見と同時に Higgs Coupling という国際会議を立ち上げ、重点的にこれらの研究を進め、これまで高次の補正や PDF などの大きな成果が得られた。2018 年 11 月のこの国際会議を再び日本で本領域の研究者が主催する予定であり、ヒッグスの精密測定から、宇宙や世代へテーマを広げる。

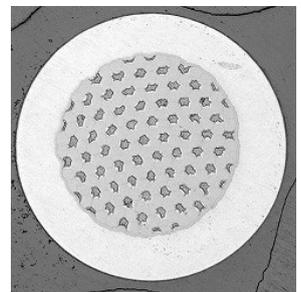
- ③ LHC での新現象がまだ発見されていないが、①での研究とあわせて、様々な可能性を調べていく。拡張ヒッグス模型やより現実的な超対称模型の構築、フレーバー物理における異常事象を説明する模型の探索、また新たなパラダイムの可能性として古典的共型対称性のある模型など広く考慮し、ボトムアップとして研究を進める一方で、それらの研究が真空の安定性、宇宙、時空構造、世代構造、大統一、弦理論にどうつながるかといったトップダウン型の視点でも研究を進める。

超対称性粒子や、電弱対称性の破れの起源が発見されない場合：

ヒッグス粒子 125GeV の質量を自然に説明することは難しくなっている。ボトムアップで発展してきた物理学のこれまでの大きな指導原理であった「自然さ」に疑問をなげかけるものであり、今後の素粒子研究に大きな影響を与える成果である。この場合は、真空の安定性、宇宙、時空構造、世代構造、大統一、弦理論にどうつながるかの観点と、宇宙観測、他の実験の結果などをつきあわせて、新現象の期待されるスケールや機構を評価し、精密測定などとの連携で新現象の可能性をさぐる。

④LHC は、エネルギーを 14TeV に増強して第 3 期実験を H33 年より開始する。その準備を行う。C01, C02 班が、R&D を行った項目（新しいトリガーシステム）を第 3 期実験で一部実装を行い、性能評価を行う。これらの実験に即した研究を行うと同時に、将来の基幹技術開発をすすめる。また、2026 年からの高輝度 LHC 実験への最終的な R&D をすすめるばかりでなく、ILC, FCC のような将来計画に、開発した基幹技術を提案し、それらのフィードバックを得て、さらなる研究をすすめる予定である。

(A) 超電導研究は、Nb₃Sn 線材(右写真)の開発をすすめ 16T の強力な磁石の実現を目指す。この磁石開発は、素粒子研究ばかりでなく、広く spin off が期待できる。



(B) 2017 年度末に完成した、50 μm 角のピクセルを持つシリコンセンサーの評価を進める。特に、ノイズの大きさ、放射線照射後の電荷収集効率を精査し、問題がなければ概念設計を終了する。ピクセル検出器のモジュール化に関して、引き続き、組み立て工程の最適化と、部材の選定を進める。