

領域略称名：テラスケール物理  
領域番号：2303

平成28年度科学研究費補助金「新学術領域研究  
(研究領域提案型)」に係る事後評価報告書

「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」

(領域設定期間)

平成23年度～平成27年度

平成28年6月

領域代表者 (東京大学・理学部・教授・浅井 祥仁)

# 目 次

1. 研究領域の目的及び概要	4
2. 研究領域の設定目的の達成度	5
3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況	8
4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況	9
5. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	11
6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	14
7. 研究組織（公募研究を含む。）と各研究項目の連携状況	19
8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	21
9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度	25
10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況	26
11. 総括班評価者による評価	27

**研究組織** (総括：総括班，計画：総括班以外の計画研究，公募：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 総括	23104001 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年度～ 平成27年度	浅井 祥仁	東京大学・理学(系)研究科(研 究院)・教授	12
A01 計画	23104002 ヒッグス粒子の発見による素粒 子の質量起源の解明	平成23年度～ 平成27年度	徳宿 克夫	大学共同利用機関法人高エネ ルギー加速器研究機構・素粒子 原子核研究所・所長	10
A02 計画	23104003 超対称性の発見と大統一理論の 実験的検証	平成23年度～ 平成27年度	浅井 祥仁	東京大学・理学(系)研究科(研 究院)・教授	10
A03 計画	23104004 素粒子標準模型の精密検証で探 るテラスケール物理現象	平成23年度～ 平成27年度	藏重 久弥	神戸大学・自然科学系先端融合 研究環・教授	5
A04 計画	23104005 トップクォークを用いた新しい 素粒子現象の探索	平成23年度～ 平成27年度	戸本 誠	名古屋大学・理学(系)研究科(研 究院)・准教授	5
A05 計画	23104006 テラスケール物理の理論的研究	平成23年度～ 平成27年度	野尻 美保子	大学共同利用機関法人高エネ ルギー加速器研究機構・素粒子 原子核研究所・教授	3
A06 計画	23104007 LHCでの発見が導く次世代エ ネルギーフロンティアの発展	平成23年度～ 平成27年度	駒宮 幸男	東京大学・理学(系)研究科(研 究院)・教授	4
B01 計画	23104008 LHC時代の新しい初期宇宙像	平成23年度～ 平成27年度	山口 昌弘	東北大学・理学(系)研究科(研 究院)・教授	3
B02 計画	23104009 テラスケール物理がもたらす新 しい時空像	平成23年度～ 平成27年度	細谷 裕	大阪大学・理学(系)研究科(研 究院)・教授	3
B03 計画	23104010 テラスケール物理から超弦理論 への展開	平成23年度～ 平成27年度	渡利 泰山	東京大学・数物連携宇宙研究機 構・特任准教授	3
B04 計画	23104011 テラスケール物理における世代 構造の研究	平成23年度～ 平成27年度	久野 純治	名古屋大学・基礎理論研究セン ター・教授	5
計画研究 計 11 件					

公募研究	26104701 世界最高輝度 X 線を用いた真空の構造の研究	平成 26 年度～ 平成 27 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	5
公募研究	26104702 テラスケール余剰次元模型の性質についての現象論的研究	平成 26 年度～ 平成 27 年度	柿崎 充	富山大学・大学院理工学教育部理学領域・助教	1
公募研究	26104703 吸収層を用いる画期的ハドロンカロリメータの開発	平成 26 年度～ 平成 27 年度	竹下 徹	信州大学・理学部・教授	2
公募研究	26104704 標準ヒッグス結合のズレからテラスケールへ	平成 26 年度～ 平成 27 年度	津村 浩二	京都大学・理学(系)研究科(研究院)・助教	2
公募研究	26104705 ミューオン異常磁気能率のアノマリーを説明する新物理の現象論的研究	平成 26 年度～ 平成 27 年度	戸部 和弘	名古屋大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授	1
公募研究	26104706 微細加工技術を用いた ATLAS ミューオン前方検出器の開発	平成 26 年度～ 平成 27 年度	越智 敦彦	神戸大学・大学院理学研究科・准教授	4
公募研究	26104707 重力波で探る新たな時空像	平成 26 年度～ 平成 27 年度	早田 次郎	神戸大学・大学院理学研究科・教授	2
公募研究	26104708 sub-eV 弱結合中性ボゾン探索に向けた原子起因四光波混合の定量化	平成 26 年度～ 平成 27 年度	本間 謙輔	広島大学・理学(系)研究科(研究院)・助教	3
公募研究	24104501 ジルコニウム 96 を用いたニュートリノを放出しない 2 重ベータ崩壊事象の探索実験	平成 24 年度～ 平成 25 年度	福田 善之	宮城教育大学・教育学部・教授	2
公募研究	24104502 精密測定実験に基づくテラスケール素粒子模型の研究	平成 24 年度～ 平成 25 年度	曹 基哲	お茶の水女子大学・大学院人間文化創成科学研究科・教授	1
公募研究	24104503 LHC 後に必須な超微細分割カロリメータの検出器要素の基礎的研究	平成 24 年度～ 平成 25 年度	小寺 克茂	信州大学・理学部・研究員	3
公募研究	24104504 ゲージボソン 3 点結合の精密測定による新物理探索とそれを可能にするトリガーの研究	平成 24 年度～ 平成 25 年度	石野 雅也	京都大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授	1
公募研究	24104505 テラスケール弦模型の定式化と加速器実験での検証	平成 24 年度～ 平成 25 年度	北澤 敬章	首都大学東京・理工学研究科・助教	1
公募研究 計 13 件					

# 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。

（研究領域の全体像）

- ◎本領域の目的は、ヒッグス粒子や超対称性粒子などの確実な発見を目指す。
- ◎その発見を核に、素粒子・時空・真空の新しい融合領域の生成を目指す。素粒子をプローブとして時空や真空を探り、新たな宇宙観や自然観の創成を目指す

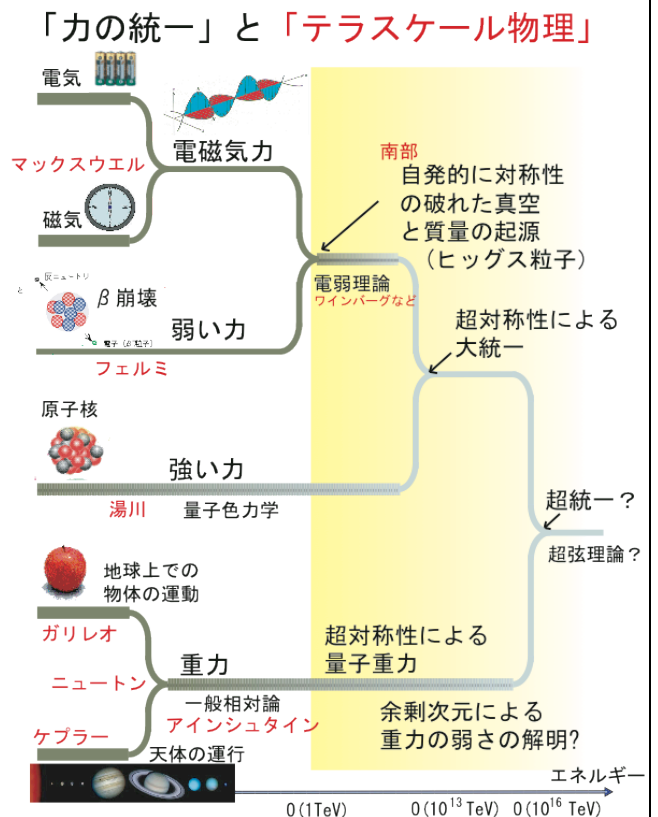
（領域の研究目的）

- 1) 先端加速器 LHC でのアトラス実験で、『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)』の物理を直接研究することができる。**本領域の一つ目の研究目的は、このテラスケールに期待されているヒッグス粒子や超対称性粒子などの確実な発見**である。ヒッグス粒子や超対称性粒子の発見は、「物質」や「力」などの研究ばかりでなく、その容れ物である「真空」や「時空」の研究へと発展するものであり、本領域はこれらの発見をさらに推し進めて標準理論を超えた新しいパラダイムの構築を目指す。このため、**物理研究のみならず、最先端検出器の開発や新しい加速器技術の開発を通してエネルギーフロンティアの更なる改善を図る。**
- 2) これらテラスケールでの実験的成果を核に、宇宙、時空の謎などの研究を、**新しいパラダイムの中で大きく展開させ新しい研究領域を創造する**ことが第二の目的である。

右図にテラスケールの物理の成果が大きな成果につながるものであることを示す。素粒子研究は「統一」の歴史そのものである。ヒッグス粒子の発見で、電磁気力と弱い力を統一し、質量の起源を解明することが出来る。超対称性粒子の発見は、強い力を含めた3つの力の大統一の証拠となる。超対称性や余剰次元は重力をも統一する（超統一）。

この様なテラスケールでの新しい物理の発見は、素粒子物理学に大きく貢献するのみならず、宇宙の進化の解明など、科学全般への計り知れない貢献をもたらすものである。素粒子研究や宇宙研究の我が国の学術水準は、多くのノーベル物理学賞が示す様に高いものであるが、この成果により更に向上することができる。

また時間や空間は、我々の日常生活に密接に結びついた概念であり、超対称性の発見や余剰次元の研究を通して新しい「自然観」を創造することが期待される。

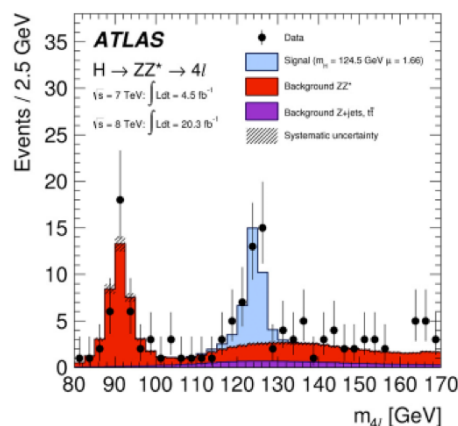


## 2. 研究領域の設定目的の達成度（3 ページ以内）

研究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、また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らしての達成度合いについて、具体的に記述してください。必要に応じ、公募研究を含めた研究項目ごとの状況してください。

### (1) ヒッグス粒子発見

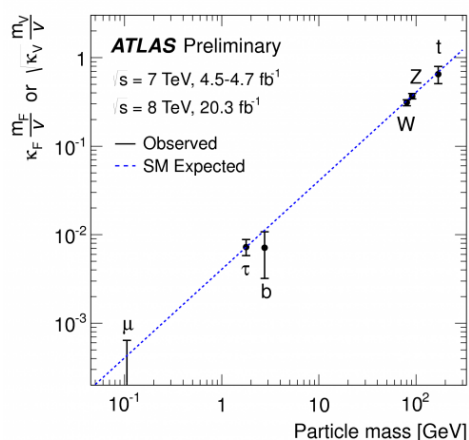
本領域の一番大きな成果は、ヒッグス粒子の発見（右図は不変質量分布:ヒッグス粒子が ZZ を経由して 4つのレプトンに崩壊した場合）と、質量の起源の解明(右中央)にある。測定されたヒッグス粒子の質量は、 $125.09 \pm 0.24 \text{ GeV}$  であり、すでに 0.2% の精度で決まった。ヒッグス粒子とゲージ粒子の結合のみならず、フェルミ粒子との結合が測定され、ヒッグス粒子がゲージ粒子とフェルミ粒子の質量の起源であることが分かった。また、第 2 世代の結合が弱いことも分かり、世代の理解をすすめることができた。今後はより測定精度を高め、質量起源の全貌を解明する為に、より詳細な研究が必要である。



### (2) 超対称性など標準理論を超える新しい素粒子現象に対する厳しい制限と新現象の可能性の示唆

新現象を確実に捉えるため、標準理論反応過程の精密検証と新現象の直接探索の両輪で研究を推進した。

◎超対称性粒子に対して厳しい制限（グルイノに対して、約 1.5TeV より重い）が得られた。従来考えられていた超対称性理論のモデルやパラメーターに対する厳しい制約が得られ、ヒッグス粒子の質量とあいまって、ナチュラルネス（自然さ）を考え直す大きな成果となった。また暗黒物質に対する制限も厳しいものが得られた。



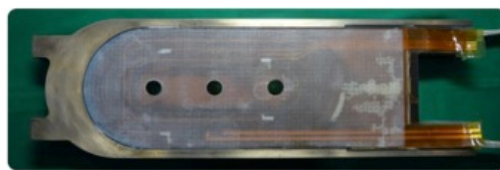
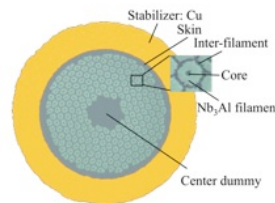
### (3) ヒッグス粒子の発見は、真空が相転移しヒッグス場が凝縮した特殊な状態にあることの実験的な証拠

- ◎ ヒッグス粒子の詳細な研究を通して、真空がどのような構造を持っているのかを調べ、宇宙の相転移に関する知見が得られた。この質量は、この宇宙の状態が安定でなく、準安定な状態である可能性が指摘され、宇宙進化の重要な情報が得られた。
- ◎ ヒッグスの 3 点結合測定に関し、次世代の ILC での精度がもたらす成果について新しい知見が得られた。CMB などの情報とあいまってインフレーションのモデルを絞ることができる。
- ◎ 125GeV のヒッグス粒子の存在と、超対称性などの新しい素粒子現象が 1 TeV より軽い領域にないことから、宇宙初期像や素粒子世代の研究に大きな影響を与えた。特に、ヒッグス粒子の質量スケールの自然さを問い直す新しい展開があった。（人間原理など）

### (4) LHC 高輝度実験・次世代エネルギーフロンティア実験の基盤技術の確立

◎ LHC 実験での経験から、高性能・耐放射線検出器、高速トリガーシステム、超伝導加速器技術に新たな知見が得られ、それを基に次世代の基盤

技術の開発を行っている。より強い磁場を発生させることができる Nb<sub>3</sub>Al 線材(右上図：ラザフォード線断面図、右下写真：試作した Nb<sub>3</sub>Al 磁石)を開発し、放射線や機械的な強度耐性などを調べ設計に反映された。これらの技術は、次世代実験の鍵となる技術であり、J-PARC など広い応用への道筋ができた。



◎ビームのエミッタンスの向上にむけてビームサイズの精密測定技術を開発し、ATF で測定に用いられている。

◎ 半導体検出器、ミュオン検出器、高速トリガーシステム、カロリメータの主要な技術開発を行っている。例えば、n-in-p 型 pixel 検出器の開発、ミュオントリガーチェンバー、高速トラックト

リガーシステム、High Level Trigger、カロリメータなどであり、ルミノシティを10倍に増強したHL-LHCや、次世代実験ILCの検出器の基幹技術である。特にHL-LHCの検出器のグランドデザインとなる基幹技術の開発に成功した。これらは、LHCに限らず、エネルギーフロンティア実験全体に大きな貢献ができ、多くの応用が行われた。

以下各研究項目別の成果を報告する。

#### 研究項目 A01 計画研究（ヒッグス粒子の発見による素粒子の質量起源の解明）

- ヒッグス粒子を発見した。統計を増やして各崩壊モードの解析を行い、ヒッグス粒子が標準模型の予測する性質を持つことを確認した。標準模型を超えたヒッグス粒子の探索では兆候は確認されていない。
- 次世代型シリコンピクセル検出器の開発を進めた。試作後、本実験で想定される放射線量を照射した。その後の性能評価を国内外の加速器施設におけるビームラインを用いて行い、十分な性能を確認した。

#### 研究項目 A02 計画研究（超対称性の発見と大統一理論の実験的検証）

- 生成・崩壊の事象トポロジー分類により、超対称性粒子探索を組織的に進めることを目標とした。発見には至らず、各チャンネルに厳しい制限を課した。一方、超対称性の存在を示唆する事象も確認した。
- 長寿命粒子、高質量共鳴ピーク、その他特異な終状態など、超対称性以外の新粒子・現象の発見を目標とした。発見には至らず、各チャンネルに厳しい制限を課した。一方で、統計的有意な超過も確認した。
- LHC高輝度アップグレードに向けた磁石の開発、並びに次世代加速器用高磁場超電導磁石・線材の開発を目標にした。新開発の耐放射線線材を開発。線材を組み込んだ、2m長モデル機の試作に成功し、冷却励磁試験を実施した。10Tを超える高磁場磁石を製作し、励磁試験によりケーブル性能を評価した。

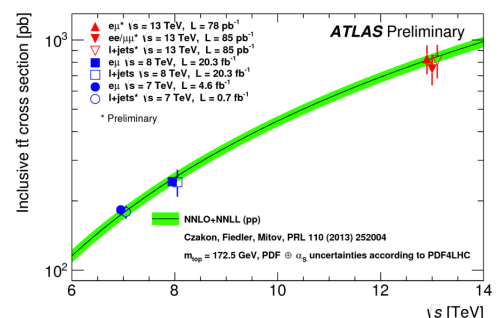
#### 研究項目 A03 計画研究（素粒子標準模型の精密検証で探るテラスケール物理現象）

- 弱ボゾン生成、ジェット生成などからLHCエネルギー領域での標準模型を精密検証し、同時に新物理探索のバックグラウンド理解を高めることを目標とした。パートン密度の新制限など標準模型の理解を深め、弱ボゾン融合生成や4レプトン崩壊など、ヒッグス粒子の測定感度を上げる測定ができた。
- 複数の弱ボゾン生成を通して標準模型の特徴的構造である弱ボゾンの3点・4点ゲージ結合を精密測定し、また生成断面積の異常から新物理を探ることを目標とした。高精度の測定により、異常ゲージ結合に対し上限値を1桁以上更新した。また、新物理に感度の高い弱ボゾン同士の散乱を初めて観測した。
- 次世代の高ルミノシティLHC実験に対応した、事象を効率よく選別できるミュオントリガー検出器とトリガー回路の開発を目標とした。次のアップグレード用に放電を抑制したミュオントリガー検出器、トリガー論理と回路を開発した。より高ルミノシティ用の放射線耐性を持つ回路も開発した。

#### 研究項目 A04 計画研究

##### （トップクォークを用いた新しい素粒子現象の探索）

- 重心系エネルギー7、8、13TeVの陽子陽子衝突によるトップクォークの生成と崩壊を詳細に検証し（右図）、テラスケールに至るまで、摂動QCDがトップクォーク対生成を良く記述する有効理論であることを立証した。また、高速飛跡再構成トリガーを新たに開発するなど、トリガーシステムを改良した。



#### 研究項目 A05 計画研究（テラスケール物理の理論的研究）

- QCDの理論特性を利用して新物理の探索感度を上げる研究をおこない、テラスケール物理探索の背景事象をより正しく理解することを目標とした。ジェットの構造や制動放射に関する研究を行い、クォーク・グルーオン識別の向上や、ISRの性質を利用した背景事象の低減方法を明らかにした。
- 標準模型の分布のズレから新粒子の断面積、崩壊パターン、スピン、質量を測定する新しい解析方法を考案することを目的とした。新物理の信号である高エネルギーのトップジェットから偏極を導き出す方法を明らかにするとともに、ISRの分布からスピンを明らかにする方法などを研究した。
- テラスケールでの新物理を新しいパラダイム（時空、宇宙など）に転換する研究を行い、この実験的検証にむけた現象論研究を目的とした。バリオン数生成、暗黒物質、ニュートリノ質量の生成機構とヒッグス粒子が関係する模型を網羅的に検討して、拡張模型を制限する方法を明らかにした。

#### 研究項目 A06 計画研究（LHCの発見が導く次世代エネルギーフロンティアの発展）

- ILCでの実用に向けたジェットエネルギー高精度測定用の稠密な電磁カロリメータを開発。素子の放射線耐性を、中性子を用いて精査した。ドイツで電子ビームを用いたプロトタイプのパフォーマンス評価に成功した。
- KEKの試験加速器ATF2において、電子ビームサイズを極限に抑え、鉛直方向世界最小サイズ41nm

の測定に成功した。フィードバックを用いたビームジッター抑制を英国や KEK と共同で行い成功した。

- LHC で新粒子の事象候補があった。これらを ILC の実験で精査し物理の方向を見極める方法を開発した。

#### 研究項目 B01 計画研究 (LHC 時代の新しい宇宙像)

- 実験結果に基づきテラスケールの素粒子模型を構築し、宇宙進化史への影響を明らかにすることを目標とした。ヒッグス粒子の質量を説明する超対称模型を複数構築し、暗黒物質の性質を中心に宇宙進化史への影響を明らかにした。
- 標準模型を超える物理がもたらす宇宙進化への影響を明らかにすることを目標とした。超対称 Peccei-Quinn 模型の宇宙進化史について、宇宙初期の熱的プラズマの影響がアクシオンの超対称対の振る舞いに大きな影響を与えることを見つけたことができた。
- LHC 実験が示唆する物理に基づき、インフレーションに関する理解を進めることを目標とした。ヒッグス場がインフレーションを引き起こす可能性を追求し、運動項が重要となるインフレーション模型において実現できることを示した。

#### 研究項目 B02 計画研究 (テラスケール物理がもたらす新しい時空像)

- 5次元時空ゲージヒッグス統合理論の構成を目標とした。期間中に達成した。低エネルギー実験や LHC 実験と無矛盾な  $SU(5) \times U(1)$  統合理論を構成した。
- 14 TeV LHC 実験で検証できる予言を導くことを目標とした。ヒッグス粒子と標準模型粒子の結合は、標準模型とはほぼ同じであるが、6TeV-10TeV 領域に、幅の大きい  $Z'$  (KK 粒子) が現れる事を予言した。ヒッグス粒子の自己相互作用も標準模型からずれるが、この検証は LHC では難しい。
- ヒッグス場をもとにした新しい宇宙論の構築を目標とした。ヒッグスインフレーション理論を精密化した。ヒッグス場をもとにプランクスケールの物理が探れることを明らかにした。目標は概ね達成した。

#### 研究項目 B03 計画研究 (テラスケール物理の超弦理論への展開)

- 超弦理論のコンパクト化の文脈で初期宇宙、フレーバー構造を探索し、シナリオを絞りこむことを企図した。フレーバー、統一理論については、超弦理論で詰め切れるところまで達した。
- 超対称性と例外系代数がある時空の量子像の開拓。F-理論コンパクト化のモジュラー群の同定、弦理論双対性対応の対応関係の精密化などの成果が挙げられた。
- ハドロン高エネルギー散乱の非摂動的側面を扱う理論手法の開発においては、ハドロン内のパートンの(縦方向だけでない)3次元情報を捕まえる理論的枠組みを確立した。

#### 研究項目 B04 計画研究 (テラスケールにおける世代構造の研究)

- テラスケール物理における世代構造をフレーバーの物理から制限を与え、それにより LHC 実験で模型の選別を行うことを目的とした。LHC 実験では明確な新物理の発見はなかったが、超対称模型、拡張ヒッグス模型などに対して、LHC 実験とフレーバーの物理から期待される新物理の可能性を明らかにした。
- 新しい素粒子像の構築を目的とした LHC 実験とフレーバーの物理から期待される新物理を外挿し、超対称大統一模型の現象論、超対称性の破れの起源、ニュートリノ質量起源の可能性を明らかにした。
- 宇宙の物質・反物質の非対称性の解明を目指した。拡張ヒッグス模型における電弱バリオン数生成の可能性を明らかにし、その検証の方法を明らかにした。世代対称性を課した超対称大統一模型においてレプトジェネシスが宇宙のバリオン数を説明できることを明らかにした。

#### 公募研究

平成 24 年～平成 25 年に 5 件、平成 26 年～平成 27 年に 8 件の公募研究を採択した。

LHC 実験の高度化にむけた検出器開発に関するもの、LHC の実験結果の現象論的予測を研究計画 A05 とは別の角度から与えるもの、LHC の結果を受けて弦理論、重力波の理論など更に高エネルギーの素粒子論との整合性を問う研究などが行われた。また、LHC の結果を受け、将来の国際リニアコライダー (ILC) を建設した際に用いられる検出器の開発、低・中エネルギー実験で探る真空構造など、LHC の物理に間接的に関係する研究も行われ、それぞれ一定の成果を収め、学術論文の形で研究結果を公開している。



### 3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況（1 ページ以内）

研究推進時に問題が生じた場合には、その問題点とそれを解決するために講じた対応策等について具体的に記述してください。また、組織変更を行った場合は、変更による効果についても記述してください。

#### 計画研究：

LHC は、速やかにヒッグス粒子を発見するために、重心系エネルギーを 7 及び 8TeV で実験を行い、2 年間の運転停止、修理を行って平成 27 年より、重心系エネルギーを 13TeV に増強する 2 段構えの実験になった。

1) 速やかなヒッグス粒子発見にむけて、重心系エネルギーが低いまま実験を開始したことに関しては、本領域は速やかな対応を行い、 $H \rightarrow \gamma\gamma$ ,  $WW$ ,  $\tau\tau$  の 3 つの研究テーマに絞って集中的な研究を行い、この 3 つの解析の責任者や副責任者をつとめた。十分な対応が出来た。

2) LHC の運転停止期間が 2 年間あった。その間、ヒッグス粒子や、超対称性粒子の直接探索ばかりでなく、 $20\text{fb}^{-1}$  のデータを用いて、様々な現象をトポロジーベースで詳細な探索を行った。また、同時に標準理論過程の精密測定を行い、特にトップクォークの質量や、崩壊のヘリシティ測定など、新しい様々研究を行った。これらの研究には、実験と理論が密接に連携して、精密科学としてのハドロンコライダーの新しい成果が得られた。

3) 更に 2) の成果を、重心系エネルギー 8TeV から 13TeV に外挿し、13TeV での研究を速やかに開始することが出来た。

4) 重心系エネルギーを 13TeV に増強して行った平成 27 年の実験は、加速器を調整しながら行ったため、領域発足当時に予定していた  $\text{Luminosity } 10\text{--}30\text{fb}^{-1}$  に対して、 $3\text{fb}^{-1}$  しかデータが収集できなかった。これに対して、超対称性粒子の探索は、新たに、事象の形を使ってバックグラウンドを抑える方法を考案し、感度を 30% 高めることに成功した。

#### 公募研究：

平成 24, 25 年の公募研究の応募が少なく（想定していた公募数の半分）、その理由をいろいろ探った。「実験研究を行う上で、年間 200 万程度、2 年の期間では十分な成果が得られない可能性が高い」ことが、応募の少なかった理由であった。そこで、平成 26, 27 年の公募研究は、実験研究の額を最高 700 万/年間にして（件数を減らして）、公募を行った所多くの公募が得られた。

中間評価で、「公募研究に広がりがない。計画研究を補完するものになっていない」と指摘をうけて、公募の文面にも、広がりを求める内容を強調した。結果、多くの公募は、真空や低エネルギーに関係した広いバリエーションを持ったものが多数含まれ、成果が来た出来るものを選んだ結果も、計画研究を補完して、広げる研究になった。テラスケール研究会で積極的に成果を発表してもらい、連携を深めた

**4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況（2 ページ以内）**

審査結果の所見及び中間評価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。

＜審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況＞

とくにありませんでした。

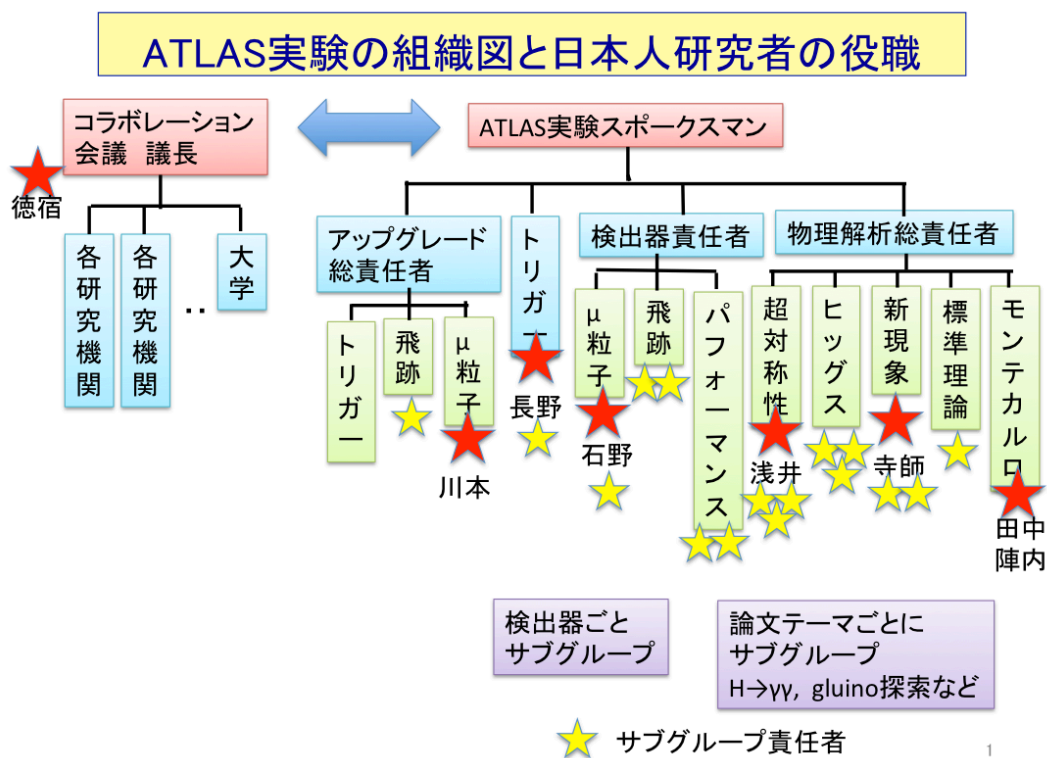
＜中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況＞

評価結果：A+（研究領域の設定目的に照らして、期待以上の進展が認められる）を得た。

指摘：要請を受けた点として

1) 一方で、全体として非常に大きなプロジェクトであるが、その中で日本人研究者のビジビリティを示していただきたい。

実験が行われている現地に長期に滞在し、研究のイニシアチブを持つことビジビリティを一層出すように推進してきた。ビジビリティ評価の一つの方法として、LHCアトラス実験内部の様々な部門の責任者を本領域研究者がどれだけしめて来たかが分かり易い。実験の全体の最高意志決定機関である「コラボレーションボード」の議長をはじめ、実験や研究を遂行する上での、部門長の多くに、本領域研究の代表や分担者が大きく貢献している（図中赤色の星）。そして、各論文のテーマや検出器の運用などの本領域研究の若手連携研究者が勤めている（図中黄色の星）



2) 研究組織に関して「公募研究の数が少ない。新興・融合領域創成のためには、計画研究を補完しうる公募研究の参画が求められる。また、理論項目との連携が不足しているため、今後、研究項目A05 と研究項目B のグループのより一層の連携・融合が進むことを期待したい。」と指摘された。

公募研究については、3.の問題点ですでに述べたように、公募件数が少ない理由を調べ、公募額の変更と、計画研究を補完する内容を重視する公募を行い、この問題は解決した。理論の連携の問題は、本領域のもう一つの柱である、「超対称性などの新現象」がそのエネルギーに存在するかヒッグス粒子発見まではあまりはつきりしなかった。そのため、ボトムアップ型の研究をするA05班、B01班、B04班、トップダウン型の研究をするB02班、B03班の両方から、新現象のエネルギースケールを絞っていく 領域構成になっている。そこでまだ二つのアプローチがかみ合っていなかった。ヒッグス粒子が発見され、その質量が125 GeVと分かり、性質もかなり分かってきたので、この二つのアプローチを一つにまとめて、何故プランクスケールから、ヒッグス粒子のスケールが出てきたのか？問いを絞り、トップダウンとボトムアップの両方のアプローチで連携を取りながら研究を進めている。

## 5. 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

#### 計画研究 A01（ヒッグス粒子の発見による素粒子の質量起源の解明）

2012年7月に、ヒッグス粒子と考えられる新粒子を発見でき、その後収集したデータにより、この新粒子がヒッグス粒子であり、標準理論の予測する性質と合致していることが判明した。ヒッグスの発見、スピン・パリティの解析に続き、全データを使った各崩壊モードでの解析と、超対称性粒子等で予想される他のヒッグス粒子の探索が進み、ほぼすべての解析が終了し論文として発表した。W,Z及び $\gamma$ への崩壊は確立し、フェルミ粒子への崩壊に関しては $\tau$ への崩壊が $4.5\sigma$ で観測できている。一方で $\mu$ への崩壊は $\tau$ と同レベルでは観測されないことは確定できており、この粒子が二つのレプトン（二つの世代）を区別することを実験的に示した。ボトムへの崩壊や、トップクォークとの随伴生成の探索も進めている。これらのモードでは、標準理論のヒッグスと無矛盾であることを示すことができている。これらの測定結果から、この粒子が標準理論のヒッグスとよく合っていることを示せた。もう一つのLHC実験であるCMS実験との共同解析も進み、0.2%精度の質量測定を達成した。結合定数に関する共同研究も進んでいる。発見したヒッグス粒子に加えて、新たな荷電及び中性ヒッグス粒子の探索も行った。残念ながら新しい粒子の兆候は得られていない。

ピクセル検出器開発：大面積の検出器を作る上でコストを下げられるn-in-p型のシリコンセンサーの開発を進めた。センサーを試作後、放射線照射をした上で、国内外の加速器施設を使ったビームテストを行って、ピクセルの構造のどの部分が放射線損傷に弱いかを洗い出し、その改良を進め、弱点の克服にほぼ目処がたった。

#### 計画研究 A02（超対称性の発見と大統一理論の実験的検証）

超対称性探索：重心系エネルギー 13, 8, 7 TeVの陽子陽子衝突を用いて超対称性粒子の探索を進めた。Z/W+jets、 $t\bar{t}$ +jetsなどの背景事象の高精度な見積り手法の開発も進め、第3世代スクォーク（超対称性クォークパートナー）質量下限0.84TeV（於13TeV）、グルイーノ、第1,2世代スクォーク質量下限1.9TeV（於8TeV）、電弱生成ゲージ粒子パートナー質量下限0.4TeV（於8TeV）などの厳しい制限を課した。一方で、複数ジェット+消失エネルギー+Zを要求するチャンネルでは $3\sigma$ の超過事象数があることを確認。また13TeV衝突におけるグルイーノ・スクォーク対生成の0レプトン探索チャンネルでは、超対称性事象の可能性がある事象も複数確認されており、高エネルギー・高統計での追解析が急がれる。

その他の標準模型を超える物理の探索：検出器中で崩壊する比較的長寿命の未知粒子、高質量領域の共鳴質量ピーク、その他特異な終状態など、超対称性以外の新粒子・現象の探索が行われ、多くのチャンネルに厳しい制限を課した。高質量領域では崩壊後のボソンが2本の近接したジェットに崩壊し、既存の手法では検出効率が下がる問題があったが、近接ジェットを再構成する新手法を開発し、8TeV衝突で2ボソン共鳴の超過を $2.5\sigma$ で確認した。高エネルギー・高統計での追解析が急がれる。

加速器開発：LHC高輝度アップグレードに向けたビーム分離用大口径双極超電導磁石の開発を行い、電磁設計・機械構造設計などの基礎開発を進めた。2m長モデル機を試作し、1.9Kにおける冷却励磁試験を行った。同時に耐放射線性に優れた有機絶縁構造材料の開発を進めた。放射線照射による試験、並びに2m長モデル機に搭載し性能評価を行った。次世代高エネルギー加速器(FCC)計画に向けた、高磁場超電導磁石及び線材の開発も行った。10Tを超える高磁場下でも臨界電流密度が安定する機械特性に優れたNb3Al線材に着目し研究開発を進めた。こちらはラザフォードケーブル（撚線）の試作に成功し、性能評価を行った。

#### 計画研究 A03（素粒子標準模型の精密検証で探るテラスケール物理現象）

W/Z および WW,WZ,ZZ,2光子生成断面積測定：最高で約10%の精度で行い、理論予想値と矛盾しない結果を得た。これらの測定結果から、異常3点ゲージ結合カップリングとして、Tevatron/LEPの測定より1桁以上小さい上限値を得た。また、ヒッグス粒子生成と関連の深いZ粒子の4レプトン崩壊、ベクトルボソン融合過程などの散乱断面積を精密に測定した。

b-taggingの改良により、高Ptを持つZ粒子のb崩壊過程や、 $B_c^+$ 稀崩壊過程の測定を行った。

ジェット生成反応の異なる重心系エネルギーでの断面積測定を行い、QCD Next Leading Orderプロセスの計算結果との比較などによって、PDF決定につなげた。

ミューオン検出器開発：LHCフェーズ1アップグレードで計画されているATLASミューオンスモールウ

ールでの Micromegas 検出器も開発を中心に行った。電極の構造・製造方法の開発を行い、アノードに高抵抗電極を用いることで、中性子による大きな電離損失事象に起因する放電を大幅に押さえられることがわかった。これを受けて、スモールウィールのプロトタイプの製作を行った。

トリガー開発： スモールウィール検出器を用いたトリガーのためのアルゴリズム及びプロセッサの開発を行った。LHC フェーズ2アップグレードで計画されている高ルミノシティー運転におけるミューオントリガーのために、ドリフトチューブを用いたアルゴリズムについて検討を行い、トリガーレートを削減できることを明らかにした。また、そのための高精度 TDC など放射線耐性をもつフロントエンド回路の開発を行った。

#### 計画研究 A04 (トップクォークを用いた新しい素粒子現象の探索)

トップクォーク物理： 重心系エネルギー13TeV、8TeV、7TeV の陽子陽子衝突による t クォーク対の生成断面積を、2 レプトン終状態事象 (両方の t クォークの崩壊粒子に電子または  $\mu$  粒子が含まれる) を用いて精密に測定し、摂動 QCD がトップクォーク生成を良く記述する有効理論であることを立証した。

t クォークの崩壊による荷電レプトンと b クォークの角度差から、 $t \rightarrow Wb$  崩壊中の W 粒子の 3 種類の偏極度 ( $F_L, F_0, F_R$ ) を測定した。 $F_0 = 0.687 \pm 0.005$ ,  $F_R = 0.0017 \pm 0.0001$  ( $F_L = 1 - F_0 - F_R$ ) の結果は、V-A 型の弱い相互作用によって t クォークが崩壊する時の偏極度と無矛盾であることを示した。

重心系エネルギー7TeV の陽子陽子衝突による t クォーク対の生成断面積を  $\tau_{\text{had}}$ -レプトン事象 (片方にハドロン崩壊をする  $\tau$  粒子、もう一方に電子また  $\mu$  粒子が含まれる)、全ハドロン事象 (両方ともハドロンに崩壊する) を用いて測定し、標準模型と無矛盾であることを示した。

トリガー開発： 将来の高輝度 LHC 実験に向け、これまではトリガーに用いる必要のなかった精密飛跡検出器による  $\mu$  粒子トリガー回路の開発を行った。TDC 回路の基礎設計を終えた。

Run2 での導入を目指し、高速飛跡再構成トリガー(FTK)回路の開発と製作を行った。本計画研究によって開発する回路が ATLAS 実験の量産要請を満たすことを確認し、本研究によって構築したテストスタンドを用いて量産時の諸問題に対するフィードバックを行った結果、回路製作の量産を完遂させた。

t クォーク対生成事象の取得に重要な  $\mu$  粒子トリガーや電子トリガーの運動量閾値を 25GeV 程度の低い値に抑えつつ、トリガーレートを低く維持するアルゴリズムの開発に成功した。

#### 計画研究 A05 (テラスケール物理の理論的研究)

検出手法の研究： QCD の知見を用い a) QCD の高次過程の特性を利用して新粒子を発見する手法の考案 b) ジェットの種となるパートンがクォークかグルーオンかによって異なることを用いた、新粒子探索における S/N 向上方法の提案と理論的不定性の解明 c) Boost された top quark や重たいゲージ粒子から生成されるジェットの内部構造をもちいた scalar top や heavy boson の探索可能性の検討等を行った。

暗黒物質探索： 暗黒物質を含む模型について総合的に検討を行い、超対称模型、バリオン数生成と暗黒物質を関係づける模型、フェルミオンと暗黒物質のある系など、LHC での検証が可能である領域を明らかにした。

新物理の理論的検討： ヒッグス粒子の発見に伴い、その性質の精密測定によって、新しい物理の構造の手がかりを得ることが可能なのではないかと期待された。Radion と Higgs の混合のあ Randall-Sundrum 模型、超対称模型、Minimal composite Higgs 模型などについて、Higgs の生成、分岐比等の研究によって、広いパラメータ領域で新物理を明らかにできることを示した。また、兼村はヒッグスセクターの取り得る構造を輻射補正も含めて研究し ILC 実験や LHC 実験でその性質が明らかにできることを示した。また、電弱対称性の破れの背後の物理、標準理論で説明できない諸現象 (暗黒物質、バリオン数生成、ニュートリノ質量) とヒッグス物理の関係を研究し、LHC Run2 等の将来実験を用いて検証可能である場合を明らかにした。

#### 計画研究 A06 (LHC の発見が導く次世代エネルギーフロンティアの発展)

ヒッグス発見により重要性を増した国際リニアコライダー(ILC)計画推進のため多くの研究を行った。

超対称性などの兆候が LHC で見えた時に、ILC での詳細研究によって、超対称性の破れや暗黒物質の解明の方法を開発。

ILC ビーム収束系開発： local chromatic 補正と言うビームオプティクスを確立した。KEK の試験加速器 ATF2 において、世界で最小の縦方向ビームサイズ  $\sigma_y = 41 \text{nm}$  を達成した。2 バンチのビームを ATF でつくり 1 バンチ目の測定でフィードバックをかけ 2 バンチ目のビームジッターを減らすことに成功。

ILC のシリコン電磁カロリメータの詳細設計において安価でかつ性能を落とさないための素子のスペックを研究した。また、素子の放射線耐性を神戸大学の中性子ビームを用いて精査。十分な耐性があることを検証。ドイツ DESY においてプロトタイプのビームテストに成功。

$\tau$  の再構成は、重いヒッグスの CP 混合の決定に重要である。ILC での衝突点の位置、荷電粒子の軌道、 $\pi^0$  からの光子の電磁カロリメータでのシャワー測定を用いて、いかなる  $\tau$  崩壊も再構成できることを証明。

#### 研究項目 B01 計画研究 (LHC 時代の新しい宇宙像)

ヒッグス発見が超対称標準模型に与える示唆を研究：ヒッグス粒子質量を説明するには、超対称粒子が重い  
か、超対称標準模型を拡張する必要がある。①ゲージ重項を加えた模型について詳細に研究し、Peccei-Quinn  
対称性を持つ模型を構成、ヒッグスセクターの量子補正や混合によりヒッグス質量を実現できることを示し、  
暗黒物質の性質など宇宙論的影響を考察した。②超対称粒子の質量スケールが 10TeV にある可能性の重要性を  
指摘し、特に Wino 暗黒物質の場合、直接探査実験による検証可能性や、LHC における発見可能性を議論した。

超対称 Peccei-Quinn 模型に基づく宇宙論の研究：超対称化された Peccei-Quinn 模型に基づく宇宙進化に  
ついて、宇宙初期の熱的プラズマがアクシオンやその超対称対の運動に与える影響を考察し、特にアクシーノ  
場についてはプラズマとの相互作用がその運動に大きな影響を与え得ることを明らかにした。

ヒッグスインフレーション：運動項のヒッグス場自身への依存性を用いることでヒッグス粒子がインフレー  
ションを引き起こす running kinetic inflation を提唱した。

### 研究項目 B02 計画研究 (テラスケール物理がもたらす新しい時空像)

ゲージヒッグス統合理論：ヒッグス場の正体を明らかにし、新しい時空像を探った。ヒッグス場が 5 次元  
目のゲージ場であるとする  $S_0(5) \times U(1)$  ゲージヒッグス統合理論が、低エネルギーや LHC での実験結果と整合す  
ること、5次元目があるにもかかわらず高次の量子補正が有限になること、6TeV-10TeV 領域に、幅の大きい  
 $Z'$  (KK 粒子) が現れることを示した。今後の LHC 実験で 5次元目が探索できることを示した。一般にゲージヒ  
ッグス統合のシナリオでは、高次元でのゲージ不変性により紫外発散が相殺し、ヒッグス粒子の質量の安定性や  
崩壊幅の有限性が保証され、超対称性理論にとって代わる理論的枠組みになることを示した。

また、ヒッグス場と重力との結合の結果、ヒッグス場によるインフレーションが可能となり、繰り込み群の  
解析から、プランクスケールまで標準理論を適用でき、超弦理論と結びつくことも示した。

### 研究項目 B03 計画研究 (テラスケール物理の超弦理論への展開)

A: 超弦理論の解の統計学。当科研究費補助事業期間中、7本の連作論文(総計 377 ページ)において、超弦理  
論の解の統計を研究するための物理理論、数学的道具の開発を行い、実際の統計の結果をした。その結果、1)  
標準模型の  $U(1)$  ゲージ場を得るためには、「統一理論の低エネルギー有効理論として標準模型を得ること」が  
もっとも統計的に典型的であること、2) 素粒子の世代数は統計的にガウス分布に従うこと、分散は  $0(1)$ 、3)  
 $R$ -パリティの自発的破れの有効理論となる解は、超弦理論においては非常に稀であること、などがあげられる。

ハドロンの高エネルギー散乱を解析する理論的枠組みの構築。パートン同志の散乱であり大運動量移行が含  
まれる場合には、量子色力学を用いた理論計算が可能である。より一般のハドロンの散乱過程で非摂動的な情報  
を扱える理論的枠組みを、AdS/CFT 対応を用いることによって目指す。2014 年の西尾・渡利の論文は Brower  
et. al. の 2006 年の論文で導入された理論を拡張し、ハドロンの 2 体 → 2 体の非弾性散乱を扱えるようにした。

この成果は、より一般のハドロンの 2 体 →  $N$  体 の非弾性散乱を扱える理論を構築する上でのささやかな前  
進であることと見ることができる。一方、この 2 体 → 2 体 非弾性、の理論の段階で、すでに  $ep \rightarrow ep$   
 $\gamma$  (exclusive) の散乱過程の部分過程として含まれる、 $\gamma$  (off shell) +  $p \rightarrow \gamma$  (on shell) +  $p$  に  
適用することができる。そして、この部分過程は、一般化されたパートン分布関数 (GPD) というハドロンの非  
摂動的情報によって決定されることが知られている。このことを利用して、上記論文では、AdS/CFT 対応  
(holographic) 原理を用いた一般化パートン分布関数の模型をも導いた。

### 研究項目 B04 計画研究 (テラスケールにおける世代構造の研究)

中性子 EDM: クォークの EDM、カラー EDM の中性子 EDM への寄与を QCD 和則、次元 6 までの CP 対称性を破る  
相互作用のウィルソン係数のくりこみ群の方程式の導出など、中性子の EDM の系統的な評価のための研究を行  
った。超対称模型、拡張ヒッグス模型などの標準模型を超える理論の EDM を評価し、模型に制限を与えると  
ともに、将来実験での検証の可能性の議論をした。

レプトンフレーバー研究: 超対称性シーソー模型におけるレプトンフレーバーを破る過程の研究を行った。  
ヒッグス質量をインプットとして、 $\mu \rightarrow e\gamma$  や  $\tau \rightarrow \mu\gamma$  などに対しどのような予言が得られるかを明らかにした。

拡張ヒッグス模型で電弱バリオン数生成を評価、現在のバリオン数を説明できる理論が電子、中性子の電気  
双極子能率の測定、ヒッグス粒子精密測定、新粒子探索により検証可能であることを示した。超対称性の破れ  
が 100TeV 程度の超対称標準模型は発見されたヒッグス粒子の質量 125GeV を説明しようが、この模型は超対称  
大統一模型に拡張した時、ゲージ結合定数の統一が改善すること、カラーヒッグス交換による陽子崩壊の問題  
が解消することを示した。超対称大統一模型の予言する  $X$  ボゾン交換による陽子崩壊に対する高次の量子補正  
を電弱スケールから大統一スケールまでの間の全てにおいて系統的に評価し、予言の信頼性を高めた。

## 6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（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。

---

### 計画研究 A01（ヒッグス粒子の発見による素粒子の質量起源の解明）

- [1] “Determination of spin and parity of the Higgs boson in the  $WW^* \rightarrow e \nu \mu \nu$  decay channel with the ATLAS detector”, G. Aad et al. (ATLAS Collaboration) Phys. Eur. Phys. J. C75 (2015) 231
- [2] “Evidence for the Higgs-boson Yukawa coupling to tau leptons with the ATLAS detector”, G. Aad et al. (ATLAS Collaboration) JHEP 04 (2015) 117
- [3] “Combined measurement of the Higgs Boson mass in pp collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV with the ATLAS and CMS experiments”, The ATLAS and CMS Collaboration) Phys. Rev. Lett. 114 (2015) 191803
- [4] “Irradiation and testbeam of KEK/HPK planar p-type pixel modules for HL-LHC.”, \*K. Nakamura, Y. Unno et al. JINST 10 (2015) C06008
- [5] “Search for the Standard Model Higgs boson decay to  $\mu + \mu^-$  with the ATLAS detector”, G. Aad et al. (ATLAS Collaboration) Phys. Lett. B738 (2014) 68-86
- [6] “Development of  $N^+$  in P pixel sensors for a high-luminosity large hadron collider.”, \*S. Kameda, Y. Unno et al. Nucl. Inst. Meth. A765 (2014) 118-124
- [7] “Evidence for the spin-0 nature of the Higgs boson using ATLAS data”, G. Aad et al. (ATLAS Collaboration) Phys. Lett. B738 (2013) 120-144
- [8] “Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC”, The ATLAS collaboration, Phys. Lett. B 716 (2012) 1-29
- [9] “A Massive Particle Consistent with the Standard Model Higgs Boson observed with the ATLAS Detector at the Large Hadron Collider”, The ATLAS collaboration, Science Vol.338 no.6114 pp. (2012) 1576-1582

### 書籍,記事

- [1] “Proceedings, 6th International Workshop on Semiconductor Pixel Detectors for Particles and Imaging (PIXEL2012) Inawashiro, Japan, September 3-7, 2012”, Y. Unno et al. Elsevier B.V.
- [2] 「宇宙の物質はどのようにできたのか 素粒子から生命へ」日本物理学会（編集）（徳宿克夫、他）日本評論社（2015）

### 主催シンポジウム等

- [1] 一般向け講演会「科学と音楽の饗宴」2012年11月10日（茨城県つくば市ノバホール）「質量の起源とヒッグス粒子—理論と実験の成果」 小林誠、徳宿克夫 約800名が参加
- [2] 「宇宙の物質はどのようにできたのか 素粒子から生命へ」, 日本物理学会（編集）（徳宿克夫、他）, 日本評論社。（日本物理学会主催の一般シンポジウム講演）
- [3] 「Higgs 粒子の発見」中村浩二、総研大中高生セミナー、横須賀市自然・人文博物館講座室、2013年07月23日

### 計画研究 A02（超対称性の発見と大統一理論の実験的検証）

- [1] “Search for electroweak production of supersymmetric particles in  $\sqrt{s} = 8$  TeV pp collisions with the ATLAS detector”, G. Aad et al. (ATLAS Collaboration), Phys.Rev.D93 (2016) 052002
- [2] “Search for resonances in diphoton events with the ATLAS detector at  $\sqrt{s} = 13$  TeV”, G. Aad et al. (ATLAS Collaboration), ATLAS-CONF-2016-018
- [3] “Development Status of a 2-m Model Magnet of Beam Separation Dipole for the HL-LHC Upgrade”,

M. Sugano, S. Enomoto, T. Nakamoto, H. Kawamata, K. Sasaki, et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 26, no. 4 (2016) 4002606 10.1109

- [4] “Summary of the ATLAS experiment's sensitivity to supersymmetry after LHC Run1 – interpreted in the phenomenological MSSM”, G. Aad et al. (ATLAS Collaboration), JHEP10 (2015) 134
- [5] “Summary of the searches for squarks and gluinos using  $\sqrt{s} = 8$  TeV pp collisions with the ATLAS experiment at the LHC”, G. Aad et al. (ATLAS Collaboration), JHEP10 (2015) 054
- [6] “Search for supersymmetry in events containing a same-flavour opposite-sign dilepton pair, jets, and large missing transverse momentum in  $\sqrt{s}=8$  TeV pp collisions with the ATLAS detector”, G. Aad et al. (ATLAS Collaboration), Eur. Phys. J.C75 (2015) 318
- [7] “Search for high-mass diboson resonances with boson-tagged jets in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector”, G. Aad et al. (ATLAS Collaboration), JHEP12 (2015) 55
- [8] “Test Results of a Nb<sub>3</sub>Al/Nb<sub>3</sub>Sn Subscale Magnet for Accelerator Application”, \*M. Iio, Q. Xu, T. Nakamoto, K. Sasaki, T. Ogitsu, A. Yamamoto, et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 25, no. 3 (2015) 4003405
- [9] “Model Magnet Development of D1 Beam Separation Dipole for the HL-LHC Upgrade”, \*T. Nakamoto, M. Sugano, Q. Xu, H. Kawamata, S. Enomoto, N. Higashi, K. Sasaki, et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 25, no. 3 (2015) 4000505

#### 計画研究 A03 (素粒子標準模型の精密検証で探るテラスケール物理現象)

- [1] “Measurement of the ZZ Production Cross Section in pp Collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS Detector”, G Aad et al.(ATLAS Collaboration), Phys. Rev. Lett. **116** (2016) 10181
- [2] “Measurement of the cross section of high transverse momentum  $Z \rightarrow b\bar{b}$  production in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector”, G Aad et al. (ATLAS Collaboration) Phys. Lett. B738 (2014) 25-43
- [3] “Evidence of electroweak production of WWjj in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector”, G Aad et al. (ATLAS Collaboration), Phys. Rev. Lett. **113** (2014) 141803
- [4] “Measurement of the 4l Cross Section at the Z Resonance and Determination of the Branching Fraction of  $Z \rightarrow 4 l$  in pp Collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV with ATLAS”, G Aad et al. (ATLAS Collaboration), Phys. Rev. Lett. **112** (2014) 231806
- [5] “Measurement of the electroweak production of dijets in association with a Z-boson and distributions sensitive to vector boson fusion in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV using the ATLAS detector”, G Aad et al. (ATLAS Collaboration), JHEP04 (2014) 031
- [6] “Measurement of the inclusive jet cross section in pp collisions at  $\sqrt{s} = 2.76$  TeV and comparison to the inclusive jet cross section at  $\sqrt{s} = 7$  TeV using the ATLAS detector”, G Aad et al. (ATLAS Collaboration), Eur. Phys. J. **C73** (2013) 2509

#### 主催シンポジウム等

一般公開講演会「LHC 実験にて新粒子（ヒッグス粒子？）発見」

2012年8月19日（名古屋大学 坂田・平田ホール），8月26日（大阪大学中之島センター），9月22日（神戸大学 百年記念館），9月29日（九州大学 箱崎キャンパス）

<http://www.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/atlas/outreach/Higgs2012/>

ヒッグス粒子発見について一般講演会を行い（講師 戸本、花垣、藏重、山崎、川越）のべ約 500 名の参加者があった。

#### 計画研究 A04 (トップクォークを用いた新しい素粒子現象の探索)

- [1] “Development of a sub-nanosecond time-to-digital converter based on a field-programmable gate array”, Y. Sano, M. Tomoto, Y. Horii, O. Sasaki, et.al, JINST 11 (2016) C03053
- [2] “Design of a hardware track finder (Fast Tracker) for the ATLAS trigger”, V. Cavaliere, K. Yorita, et al., JINST 11 (2015) C02056
- [3] “Measurement of the top-quark mass in the fully hadronic decay channel from ATLAS data at  $\sqrt{s}=7$  TeV”, The ATLAS collaboration, Eur. Phys. J. C (2015) 75:158
- [4] “Performance of the ATLAS muon trigger in pp collisions at  $\sqrt{s}=8$  TeV”, The ATLAS collaboration,



Eur. Phys. J. C (2015) 75:120

- [5] “Measurement of the  $tt$  production cross-section using  $eu$  events with  $b$ -tagged jets in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV with the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, Eur. Phys. J. C 74 (2014) 3109
- [6] “Measurement of normalized differential cross sections for  $tt$  production in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV using the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, Phys. Rev. D 90 (2014) 072004
- [7] “A fast hardware tracker for the ATLAS trigger system”, N. Kimura, K. Yorita, et al., Nucl. Instr. Meth. A 731 (2013) 224-228
- [8] “Measurement of W boson polarization in top quark decays with the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, J. High Energy Phys. 1206 (2012) 088
- [9] “FTK: a Fast Track Trigger for ATLAS”, J. Anderson, K. Yorita, et al., JINST 7 (2012) C10002

書籍

「ヒッグス粒子のを見つけ方 質量の起源を追う」, 戸本誠, 花垣和則, 山崎祐司 著, 丸善出版, 2012/12/25  
主催一般講演等

- (1) 「ヒッグス粒子を探せ “質量の起源にせまる”」, 戸本誠、名古屋電気文化会館, 2012年3月17日  
ヒッグス粒子探索に関する最新結果を、高校生を基準に一般に講演した。
- (2) ノーベル賞記念一般講演会「ヒッグス粒子発見」、寄田浩平、井深大記念ホール、2013年10月27日  
ヒッグス氏とアングレール氏のノーベル賞受賞を記念し、ヒッグス粒子の発見に関する講演をした。

#### 計画研究 A05 (テラスケール物理の理論的研究)

- [1] “Heavy fermion bound states for diphoton excess at 750 GeV — collider and cosmological constraints”, Chengcheng Han, Koji Ichikawa, Shigeki Matsumoto, Mihoko M. Nojiri, et al., JHEP 1604 (2016) 159, 1
- [2] “Prospects for Spin-1 Resonance Search at 13 TeV LHC and the ATLAS Diboson Excess”, Tomohiro Abe, Teppei Kitahara and Mihoko M. Nojiri, JHEP 1602 (2016) 084
- [3] “Associated jet and subjet rates in light-quark and gluon jet discrimination”, Biplob Bhattacharjee, Satyanarayan Mukhopadhyay, Mihoko M. Nojiri, et al., JHEP 1504 (2015) 131
- [4] “Fingerprinting nonminimal Higgs sectors”, Shinya Kanemura, Koji Tsumura, Kei Yagyu, and Hiroshi Yokoya, Phys. Rev. D90 (2014) 075001
- [5] “First Constraint on the Mass of Doubly Charged Higgs bosons in the same sign diboson decay scenario at the LHC”, Shinya Kanemura, Kei Yagyu, Hiroshi Yokoya, Phys. Lett. B726 (2013) 316
- [6] “Top Polarization and Stop Mixing from Boosted Jet Substructure”, Biplob Bhattacharjee, Sourav K. Mandal and Mihoko M. Nojiri, JHEP 1303 (2013) 105
- [7] “Search for the Top Partner at the LHC using Multi- $b$ -Jet Channels”, Keisuke Harigaya, Shigeki Matsumoto, Mihoko M. Nojiri, and Kohsaku Tobioka, Phys.Rev. D86 (2012) 015005.
- [8] “Testing the Higgs triplet model with the mass difference at LHC”, Mayumi Aoki, Shinya Kanemura, Kei Yagyu, Phys. Rev. D85 (2012) 055007

国際シンポジウム開催

- (1) “Physics Opportunities at LHC”, 野尻美保子、久野純治、高エネルギー加速器研究機構  
つくば市、平成24年2月16日~18日
- (2) “Higgs as a Probe of New Physics 2013”, 兼村晋哉、富山大学、平成 25 年 2 月 13 日~16 日  
一般公開講演会
- (3) パブリック・レクチャー「素粒子と宇宙」、野尻美保子、富山大学、平成 2 5 年 2 月 1 7 日  
[http://jodo.sci.u-toyama.ac.jp/theory/HPNP2013\\_lecture/index.html](http://jodo.sci.u-toyama.ac.jp/theory/HPNP2013_lecture/index.html)

#### 計画研究 A06 (LHC の発見が導く次世代エネルギーフロンティアの発展)

- [1] “Tau Lepton Reconstruction at Collider Experiments Using Impact Parameters”, D. Jeans, NIM. A 810 (2016) 51
- [2] “Pion and Proton Showers in the CALICE Scintillator-Steel Analogue Hadron Calorimeter”, CALICE Collaboration, B. Bilki, D. Jeans et al., JINST 10 (2015) P04014
- [3] “A Novel Strip Energy Splitting Algorithm for the Fine Granular Readout of a Scintillator Strip Electromagnetic Calorimeter”; K. Kotera, D. Jeans et al., NIM. A789 (2015) 158
- [4] “Experimental Validation of a Compact Focusing Scheme for Future Energy-Frontier Linear

- Lepton Colliders”, G. White, S. Komamiya et al., Phys. Rev. Lett., 112 (2014) 034802
- [5] “Validation of GEANT4 Monte Carlo Models with a Highly Granular Scintillator-Steel Hadron Calorimeter”, CALICE Collaboration, C. Adloff, D. Jeans et al., JINST 8 (2013) 07005
- [6] “Testing Bell’s Inequality Using Charmonium Decays”, S. Chen, Y. Nakaguchi and S. Komamiya, PTEP 112 (2013) 034802
- [7] “Current Status of Nanometer Beam Size Monitor at ATF2”, Y. Yamaguchi, S. Komamiya et al., Phys. Procedia, 37, (2012) 1983
- [8] “Hadronic Energy Resolution of a Highly Granular Scintillator-Steel Hadron Calorimeter Using Software Compensation Techniques”, CALICE Collaboration, C. Adloff, D. Jeans et al., JINST 7 (2012) P09017

#### 主催シンポジウム

International Linear Collider Workshop (LCWS13), 11-15 November 2013, The University of Tokyo  
一般向けアウトリーチ活動

- 「ILCの社会的役割」、駒宮幸男、2015年1月14日、北上工業クラブ新春講演会
- 「ヒッグス粒子の発見と素粒子物理学の発展」、駒宮幸男、2014年8/19、サマーチャレンジ（高エネルギー加速器研究機構）
- 「LHCでのヒッグス粒子の発見とILCの発展」、駒宮幸男、2014年1/25、朝日カルチャースクール新宿
- 「詳説ヒッグス粒子」、駒宮幸男、2013年4/27、5/25、6/15、朝日カルチャースクール横浜
- 「素粒子物理学の最前線「ヒッグス粒子」発見はなにを意味するのか」、駒宮幸男、2013年5月16日、アカデミーヒルズセミナー
- 「ヒッグス粒子発見！素粒子物理学の一大革命」、駒宮幸男、2013年1/12、東京学芸大学附属高等学校特別講義
- 「ヒッグス粒子の発見」、駒宮幸男、2012年12/1、朝日カルチャースクール湘南
- 「素粒子と宇宙」、駒宮幸男、2012年11/11、楽しむ科学教室（福岡県中小企業振興センター）

#### 計画研究 B01 (LHC時代の新しい宇宙像)

- [1] ▲“AMS-02 Antiprotons from Annihilating or Decaying Dark Matter”, K. Hamaguchi, T. Moroi and K. Nakayama, Phys. Lett. B747, (2015) 523
- [2] ▲“Gravitational waves from Higgs domain walls”, N. Kitajima and F. Takahashi, Phys. Lett. B, 745 (2015) 112
- [3] ▲“Higgs Chaotic Inflation and the Primordial B-mode Polarization Discovered by BICEP2”, K. Nakayama and F. Takahashi, Phys. Lett. B734 (2014) 96
- [4] ▲“Higgs Mixing in the NMSSM and Light Higgsinos”, K.S. Jeong, Y. Shoji and M. Yamaguchi, JHEP, 1411 (2014) 148
- [5] ▲“Cosmic-Ray Neutrinos from the Decay of Long-Lived Particle and the Recent IceCube Result”, Y. Ema, R. Jinno and T. Moroi, Phys. Lett. B733 (2014) 120
- [6] ▲“Higgs mixing and diphoton rate enhancement in NMSSM models”, K. Choi, S.H. Im, K.S. Jeong, and M. Yamaguchi, JHEP, 1302, (2013) 090
- [7] ▲“Light Higgsino from Axion Dark Radiation”, K.S. Jeong and F. Takahashi JHEP 1208 (2012) 017
- [8] ▲“Peccei-Quinn invariant extension of the NMSSM”, K. S. Jeong, Y. Shoji, and M. Yamaguchi, JHEP 1204 (2012) 022
- [9] ▲“Thermal Effects on Saxion in Supersymmetric Model with Peccei-Quinn Symmetry”, T. Moroi and M. Takimoto, Phys. Lett. B 718 (2012) 105

#### 計画研究 B02 (テラスケール物理がもたらす新しい時空像)

- [1] ▲“H  $\rightarrow$  Z gamma in the gauge-Higgs unification”, S. Funatsu, H. Hatanaka, and Y. Hosotani, Phys. Rev. D92 (2015) 115003, 1-20.
- [2] ▲“Is the 126 GeV Higgs boson mass calculable in gauge-Higgs unification?”, C.S. Lim and N. Maru, and T. Miura, Prog. Theor. Exp. Phys., 2015 (2015) 043B0, 1-23.
- [3] ▲“Eternal Higgs inflation and the cosmological constant problem”, Y. Hamada, H. Kawai, and K. Oda, Phys. Rev. D92 (2015) 045009, 1-30.
- [4] ▲“LHC signals of in the SO(5)xU(1) gauge-Higgs unification”, S. Funatsu, H. Hatanaka, Y. Hosotani, Y. Orikasa and T. Shimotani, Phys. Rev. D89 (2014) 095019, 1-28.
- [5] ▲“Polyakov loops and the Hosotani mechanism on the lattice”, G. Cossu, H. Hatanaka, Y. Hosotani, J. Noaki, Phys. Rev. D89 (2014) 094509, 1-22.
- [6] ▲“The Higgs Particle and Higher-Dimensional Theories”, C.S. Lim, Prog. Theor. Exp. Phys., 2014 (2014) 02A101, 1-21.
- [7] ▲“Novel universality and Higgs decay H  $\rightarrow$  gamma gamma, gg in the SO(5)xU(1) gauge-Higgs unification”, S. Funatsu, H. Hatanaka, Y. Hosotani, Y. Orikasa and T. Shimotani, Phys. Lett. B722 (2013) 94-99.

- [8] ▲“Universal extra dimensions after Higgs discovery”, T. Kakuda, K. Nishiwaki, K. Oda and R. Watanabe, Phys. Rev. D88 (2013) 035007, 1-20.
- [9] ▲“SUSY breaking scales in the gauge-Higgs unification”, H. Hatanaka, Y. Hosotani, Phys. Lett. B713 (2012) 481-484.

計画研究 B03 (テラスケール物理の超弦理論への展開)

- [1] ▲“The Noether-Lefschetz problem and gauge-group-resolved landscapes: F-theory on  $K3 \times K3$  as a test case,” A. P. Braun and T. Watari, JHEP 1404 (2014) 050.
- [2] “A keV string axion from high-scale supersymmetry,” B. Henning, J. Kehayias, H. Murayama, D. Pinner and T. T. Yanagida, Phys.Rev.D90 (2015), 4, 045036.
- [3] ▲“The vertical, the horizontal and the rest: anatomy of the middle cohomology of Calabi—Yau fourfolds and F-theory applications,” A. P. Braun and T. Watari, JHEP 1501 (2015) 047.
- [4] ▲“Statistics of F-theory flux vacua for particle physics,” T. Watari, JHEP 1511 (2015) 065.
- [5] “Chaotic inflation from non-linear sigma models in supergravity,” S. Hellerman, J. Kehayias and T. T. Yanagida, Phys. Lett. B742 (2015) 390-393.
- [6] ▲“Distribution of number of generations in flux compactifications,” A. P. Braun and T. Watari, Phys.Rev. D90 (2014) 12, 121901.
- [7] ▲“Skewness dependence of generalized parton distributions, conformal OPE and the AdS/CFT correspondence,” R. Nishio and T. Watari, Phys. Rev. D90 (2014) 12, 125001.

研究会主催 “Holography and QCD --- Recent progress and challenges”

東大柏、平成 25 年 9 月 24-28 日。スライド等は [http://research.ipmu.jp/seminar/?conference\\_id=70](http://research.ipmu.jp/seminar/?conference_id=70)  
 アウトリーチ：記事執筆 (渡利泰山)

- [1] Kavli IPMU news no.22 「ニュートリノ振動の大角度混合がもたらした衝撃」  
 [2] 日本物理学会誌 2016年6月号 解説「超弦理論のコンパクト化 After Thirty Years」

計画研究 B04 (テラスケールにおける世代構造の研究)

- [1]“Toward verification of electroweak baryogenesis by electric dipole moments”,Kari Fuyuto, Junji Hisano, Eibun Senaha, Phys.Lett. B755 (2016)491
- [2] “Leptogenesis in  $E_6 \times U(1)_A$  SUSY GUT model”,Takuya Ishihara, Nobuhiro Maekawa, Mao Takegawa, Masato Yamanaka, JHEP 1602 (2016) 108
- [3] “Interpretations of the ATLAS Diboson Resonances”, Junji Hisano, Natsumi Nagata, Yuji Omura, Phys.Rev. D92 (2015) no.5, 055001,
- [4]“Nucleon Electric Dipole Moments in High-Scale Supersymmetric Models”, Junji Hisano, Daiki Kobayashi, Wataru Kuramoto, Takumi Kuwahara, JHEP 1511 (2015) 085
- [5]“The heavy graviton, naturalness, and sizable anomaly mediation”,Nobuhiro Maekawa, Kenichi Takayama, PTEP 2014 (2014) 093B04
- [6]“Gauge invariant Barr-Zee type contributions to fermionic EDMs in the two-Higgs doublet models”,Tomohiro Abe, Junji Hisano, Teppei Kitahara, Kohsaku Tobioka, JHEP 1401 (2014) 106
- [7]“The heavy graviton, naturalness, and sizable anomaly mediation”,Nobuhiro Maekawa, Kenichi Takayama, PTEP 2014 (2014) 093B04
- [8]“Decoupling Can Revive Minimal Supersymmetric SU(5)”, Junji Hisano, Daiki Kobayashi, Takumi Kuwahara, Natsumi Nagata, JHEP 1307 (2013) 038
- [9]“Grand Unification in High-scale Supersymmetry”, Junji Hisano, Takumi Kuwahara, Natsumi Nagata, Phys.Lett. B723 (2013) 324-329

公募研究

- [1] ◎▲“Probing circular polarization in stochastic gravitational wave background with pulsar timing arrays”, R.Kato and J.Soda, Phys. Rev. D 93, (2016) 062003
- [2] ◎▲“Search for sub-eV scalar and pseudoscalar resonances via four-wave mixing with a laser collider”, T. Hasebe, K. Homma, Y. Nakamiya, K. Matsuura, K. Otani, M. Hashida, S. Inoue, S. Sakabe, Prog. Theor. Exp. Phys. 2015, 073C01.
- [3] ◎▲”X線自由電子レーザーを用いて真空を探る”, 山崎高幸、山道智博、稲田聡明, 高エネルギーニュース 34(2015)97-104
- [4] ◎▲“Perspective to search for sub-eV neutral boson resonances with stimulated laser colliders”, “K.Homma, Eur.Phys.J.ST 223, 1131-1137, 2014.”
- [5] ◎▲“The first search for sub-eV scalar fields via four-wave mixing at a quasi-parallel laser collider”, K.Homma, T.Hasebe, K.Kume, Prog. Theor. Exp. Phys., 083C01, 2014.

## 7. 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、総括班研究課題の活動状況も含め、どのように研究組織間の連携や計画研究と公募研究の調和を図ってきたか、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。

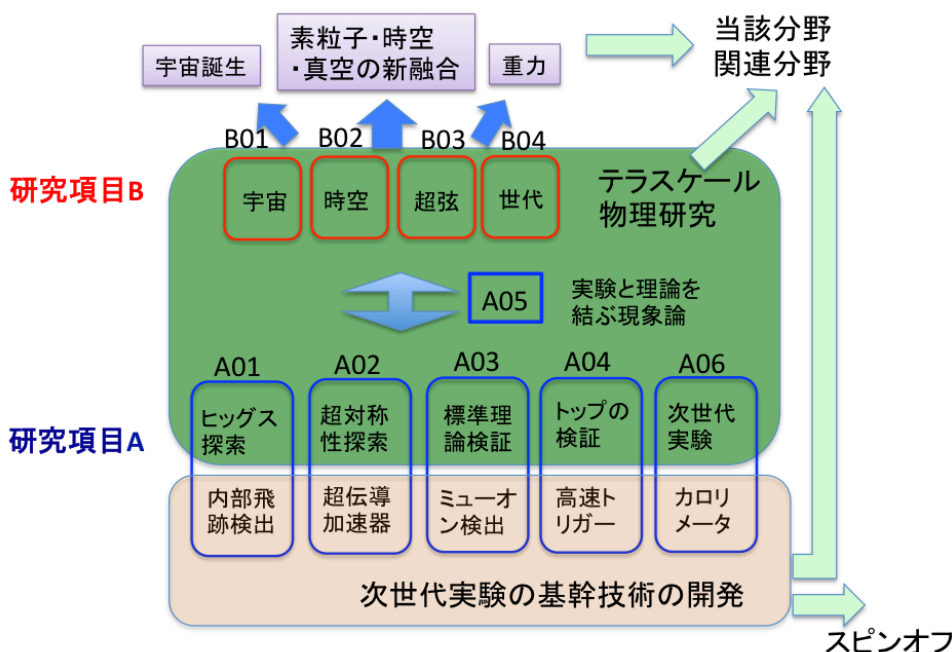
本領域は、LHC・アトラス実験でのテラスケール物理の研究（研究項目 A）を核に、宇宙、余剰次元、真空、超弦理論などの新しい展開を推進する研究（研究項目 B）の2つの研究項目で構成されている。

研究項目 A を推進するのが6つの計画研究(A01-06)である。

- ◎計画研究 A01(徳宿克夫(KEK)) ヒッグス粒子の発見、次世代半導体検出器の開発
- ◎計画研究 A02(浅井祥仁(東京大)) 超対称性粒子や余剰次元などテラスケールでの新しい物理現象の探索、次世代加速器の基幹技術となる新しい超伝導技術の開発
- ◎計画研究 A03(蔵重久弥(神戸大)) 標準理論の精密検証を通して、そのズレを探る、次世代の高放射線耐性、高速ミュオン検出器の開発
- ◎計画研究 A04(戸本誠(名古屋大)) トップクォークの詳細な研究、高速エレクトロニクスを用いた新しいトリガーシステムの開発
- ◎計画研究 A05(野尻美保子(KEK)) テラスケール物理の現象論的研究
- ◎計画研究 A06(駒宮幸男(東京大)) 次世代エネルギーフロンティア実験の準備研究、高性能カロリメータの開発研究

研究項目 B を推進するのが4つの計画研究(B01-04)である。

- ◎計画研究 B01(山口昌弘(東北大)) LHC 時代の新しい宇宙像
- ◎計画研究 B02(細谷裕(大阪大)) テラスケール物理がもたらす新しい時空像
- ◎計画研究 B03(渡利泰山(IPMU)) テラスケール物理から超弦理論への展開
- ◎計画研究 B04(久野純治(名古屋大)) テラスケール物理における世代構造の研究



## 領域の連携について

- ◎ 計画研究 A01, 02 は、高い感度を有する直接探索による方法で、ヒッグス粒子や超対称性粒子などの標準理論を超えた新しい物理の直接発見を目指す。計画研究 A03, A04 は標準理論やトップクォークを精密に検証し、そのズレを探ることで新しい素粒子現象の発見を目指す。この方法は間接的であるが、特定のモデルに依存することなく、直接探索では見えないより高いエネルギースケールの物理を発見できる。このように直接・間接の二つの方法は相補的な研究で確実に新しい素粒子現象をとらえる。
- ◎ A01-A04 及び A06 各計画研究は、他の計画研究のバックグラウンドの理解や、検出器の効果の理解など共有すべきトピックスが多数ある。実験が行われている CERN に長期滞在している各計画研究の研究者が、毎月定期的に会合をもって、最新の検出器の状況や、解析の現状を共有している。（図中緑部の下側横の繋がり）
- ◎ 次世代のエネルギーフロンティア実験での超伝導加速器や検出器の基幹技術を、ただ開発するのではなく、LHC・アトラス実験での現場での実験経験にもとづいて開発を進めるところが本領域の大きな特徴である。成果や経験のフィードバックを絶えず行うために、各研究計画の中で情報を共有し、物理研究と基幹技術開発を平行に行う。（図中、緑部と肌色部を共有する様に計画研究を構成した。）
- ◎ 計画研究 A05 が、実験と理論を結びつける現象論的な研究である。テラスケールでの現象論的研究は、研究項目 A 及び B の両方と情報を常時交換しながら研究を進めている。
- ◎ 計画研究 A06 は、LHC でのテラスケール物理の成果を次世代実験に結びつける準備研究を行う。ヒッグスの発見からその背後のヒッグス・ポテンシャル解明への道筋を研究する。これと同時に次世代カロリメータ開発を行う。以上の5つで次期技術の主要なものをカバーする。
- ◎ 研究項目 B の成果は、宇宙、重力、真空・時空の融合と本領域の外に広がりを持つ。当該分野のみならず、関連分野へと広がっていく。
- ◎ 計画研究 B02, B03 は時空構造や超弦理論研究であり、top-down 型の研究を通して、テラスケールの物理を探る。
- ◎ 研究項目 B の各計画研究は、互いに協力しながら、関係する外国の研究者や国内の研究者を招待しミニワークショップを開催し、お互いの連携を深めている。このミニワークショップなどには、研究項目 A の研究者も参加して最新の実験成果を発表すると同時に、新しい理論的な成果を取り込んで研究を進めている。（図中緑の上部の横の連携）
- ◎ 次世代の実験の基幹技術開発は、当該分野の発展に大きな寄与をするばかりでなく、超伝導、放射線耐性検出器などスピンオフが期待される。

## 8. 研究経費の使用状況（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記述してください（総括班における設備共用等への取組の状況を含む。）。

### ◎ 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、物理解析の作業に従事した。一方、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、領域内の研究グループ間で共有し有効活用した。

#### ● 研究計画 A01 新型ピクセル検出器開発

（照射可動装置一式、4 チップセンサー、ハイブリッドカード、センサーモジュール テストカード、Precision LCR メータ、等）

シリコン・ピクセル検出器の開発において、放射線照射作業時に作業効率を上げる目的で照射稼働装置を開発、また、センサー、モジュールテストカードなど実機に向けた試作機を購入し、それらを放射線照射後に、ビーム試験にて性能評価を行った。LCR メータは、シリコンセンサーの電気容量の測定において有用で、周波数依存性等の測定に威力を発揮した。

#### ● 計画研究 A02 次世代加速器開発

（Nb<sub>3</sub>Sn 超電導線、絶縁付 2G HTS テープ線材一式、第三低温棟超電導磁石試験用アイソレーションアンプ一式、高磁場サブスケール超電導磁石用非磁性ステンレス板一式、等）

LHC 高輝度アップグレード向けモデル磁石試作と 1.9K 励磁試験のため耐放射線材料及び構造部品、試験装置（電源、計測器）を調達・整備し、開発を成功させることができた。また次世代向け Nb<sub>3</sub>Al 高磁場超伝導磁石開発と併せ、他の先端超伝導線材を用いた基礎的な開発研究を実施することができた。

#### ● 計画研究 A03 ミューオン検出器開発・トリガーロジック開発

（デジタルマイクロスコープ、ロジックアナライザ、オシロスコープ、Precision LCR メータ、等）

（デジタルマイクロスコープ）：マイクロ・パターン・ガス・チェンバーを応用したミューオン検出器の開発において、中性子による放電による損傷や製造時のバラツキなどを目視で確認でき、検出器性能向上・製造方法の検討に必須のものであった。

（ロジックアナライザ）：高速かつ大量のデータを扱えるため、トリガーエレクトロニクスの開発において必須のもので、作成した回路のデバッグに用いられている。

（広帯域オシロスコープ）：微妙なタイミング調整を要するファームウェア開発時に使用した。単位時間あたりに莫大なデータ転送するためのデータ収集システム開発に必須のものであり、この物品なしには、本研究費で開発した検出器を完成させることはできなかった。

#### ● 計画研究 A04 高速飛跡再構成トリガー (FTK) の開発

（VME モジュール装置、ACTA システム、等）

Run2 実験での導入を目指し、FTK 回路の開発を行う上で、構築の必要があったテストスタンドに用いた。これにより、量産時の諸問題を事前に調査・検討することができた。

### ◎ 研究費の効果的使用について

設備に関しては上記の通り、最先端の加速器・検出器開発を行う上で必要となる性能を満たす機器を選定し、購入・使用した。一方、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。そのため申請時から必要な旅費を計上しており、計画通りに使用した。また、優秀な若手研究者の確保が、本領域の大きな成果につながった。特に理論研究班（A05 及び B01-B04）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。

・研究費の使用状況

(1) 主要な物品明細 (計画研究において購入した主要な物品 (設備・備品等。実績報告書の「主要な物品明細書」欄に記載したもの。) について、金額の大きい順に、枠内に収まる範囲で記載してください。)

年度	品名	仕様・性能等	数量	単価 (円)	金額 (円)	設置(使用)研究機関
23	デジタルマイクروسコープ	(株)キーエンス製 VHX-2000	1	7,784,070	7,784,070	神戸大学
	Nb3Sn 超電導線	日立電線商事 (株) 800m	1	2,992,500	2,992,500	高エネルギー加速器研究機構
	ロジックアナライザ	(株)TFF テクトロクス社製 TLA6202	1	2,371,244	2,371,244	神戸大学
	データ解析用計算機	デル社製 PowerEdge610	1	1,980,000	1,980,000	大阪大学
24	Nb3Sn 超電導線 (レーザーフォードケーブル化)	日立電線商事 (株)	1	2,887,500	2,887,500	高エネルギー加速器研究機構
	2MHz Precision LCR Meter	E4980A	1	1,603,350	1,603,350	大阪大学
25	オシロスコープ	Infiniium MSO 4GHz, 10/20GS/s	1	4,368,000	4,368,000	大阪大学
	デジタルオシロスコープ	ローデ・シュワルツ社 RTO1044	1	3,206,700	3,206,700	東京大学
	絶縁付 2G HTS テープ線材一式	SCS4050-AP-i	1	2,987,250	2,987,250	高エネルギー加速器研究機構
	第三低温棟超電導磁石試験用アイソレーションアンプ一式	MS-525. P-62A	1	2,805,600	2,805,600	高エネルギー加速器研究機構
26	高磁場サブスケール超電導磁石用非磁性ステンレス板一式	NSSC130S 2B	1	2,299,057	2,299,057	高エネルギー加速器研究機構
	S ガラスクロス基剤	BT2160/2170 プリプレダ SW-P・300m	1	1,854,900	1,854,900	高エネルギー加速器研究機構
27	4 チップセンサー	浜松ホトニクス (株)製 S10938-6048	4	702,000	2,808,000	高エネルギー加速器研究機構
	デジタルオシロスコープ	テクトロニクス社・DP0410B-L	1	1,449,360	1,449,360	東京大学

(2) 計画研究における支出のうち、旅費、人件費・謝金、その他の主要なものについて、年度ごと、費目別に、金額の大きい順に使途、金額、研究上必要な理由等を具体的に記述してください。

【平成23年度】

◎ 旅費 総額 (96,443,203 円)

● 主な支出は、研究代表者、研究分担者、協力研究者の CERN(スイス・ジュネーブ)への海外渡航費である。アトラス実験遂行のため、共同研究者との国際共同研究・議論が不可欠なため、現地に赴く必要があった。  
● 研究代表者、研究分担者、協力研究者の国内・国際会議への交通・滞在費。本研究成果発表のため必要。  
● 研究者招聘(計画研究 A05: 4,026,437 円) 研究会 [Physics Opportunities with LHC at 7TeV] 2012年2月16日～18日 研究計画のスタートアップのため。海外から研究者10名を招聘した。

◎ 人件費・謝金 (総額 16,076,847 円)

● 研究支援員の雇用(研究計画 A03:標準模型精密測定解析。A05:暗黒物質理論研究、B02:時空像理論研究、B03:超弦理論研究、B04:拡張ヒッグス理論研究) 当領域の研究を完遂する上で必要であった。  
● 事務補助員の雇用(研究計画 A03:事務業務補助)。  
● 講演謝金((計画研究 A04: 44,560 円) エネルギーフロンティア実験の第一線で活躍する研究者との議論のため必要であった)。

◎ その他 (総額 2,158,913 円)

● 会場設営費(研究計画 A04: 300,915 円)アウトリーチ活動「ヒッグス粒子を探せ “質量の起源にせまる”」の会場設営費、研究活動の成果を広く一般に広めるために必要であった。  
● 研究代表者、研究分担者、協力研究者の国内学会、国際会議への参加費。本研究成果発表のため必要。

【平成24年度】

◎ 旅費 (総額 112,184,556 円)

● 主な支出は、研究代表者、研究分担者、協力研究者の CERN(スイス・ジュネーブ)への海外渡航費である。アトラス実験遂行のため、共同研究者との国際共同研究・議論が不可欠なため、現地に赴く必要があった。  
● 研究代表者、研究分担者、協力研究者の国内・国際会議への交通・滞在費。本研究成果発表のため必要。  
● 研究者招聘(計画研究 A05) 富山大学における新ヒッグス勉強会開催、講演者招聘  
● 研究者招聘(計画研究 B03) 研究会開催。主要参加者の旅費。

◎ 人件費・謝金 (総額 50,547,159 円)

● 研究支援員の雇用(研究計画 A03:標準模型精密測定解析。A04:トピックーク物理解析、A05:暗黒物質理論研究、A06:電磁カロリメータ開発、B02:時空像理論研究、B03:超弦理論研究、B04:拡張ヒッグス理論研究) 当領域の研究を完遂する上で必要であった。  
● 事務補助員の雇用(研究計画 A03:事務業務補助)。

◎ その他 (総額 6,460,046 円)

● 研究代表者、研究分担者、協力研究者の国内学会、国際会議への参加費。本研究成果発表のため必要。

【平成25年度】

◎ 旅費 (総額 107,445,395 円)

● 主な支出は、研究代表者、研究分担者、協力研究者の CERN(スイス・ジュネーブ)への海外渡航費である。アトラス実験遂行のため、共同研究者との国際共同研究・議論が不可欠なため、現地に赴く必要があった。  
● 研究代表者、研究分担者、協力研究者の国内・国際会議への交通・滞在費。本研究成果発表のため必要。  
● 研究者招聘(計画研究 A05) 富山大学における新ヒッグス勉強会、HPNP2013 (Higgs as a probe of new physics 2013 開催)に使用。IPMUにおいて School on future collider physics 開催(7月16日～19日)  
● 研究者招聘(計画研究 B03) 超弦理論専門家を12日間招聘し、議論を行った。

◎ 人件費・謝金 (総額 49,541,181 円)

● 研究支援員の雇用(計画研究 A01:ヒッグス探索解析、ミュオントリガー研究、ピクセル検出器開発。A03:標準模型精密測定解析。A04:トピックーク物理解析、A05:ヒッグス物理理論研究、A06:電磁カロリメータ開発、B02:時空像理論研究、B03:超弦理論研究、B04:拡張ヒッグス理論研究) 当領域の研究を完遂する上で必要であった。  
● 事務補助員の雇用(研究計画 A03:事務業務補助)。

◎ その他 (総額 5,528,382 円)

● 会場設営費(計画研究 A04: 196,300 円)アウトリーチ活動、高エネルギー物理春の学校、本研究の成果報告を広く若手研究者に伝える目的。  
● 研究代表者、研究分担者、協力研究者の国内学会、国際会議への参加費。本研究成果発表のため必要。



【平成26年度】

◎ 旅費（総額 98,760,885 円）

- 主な支出は、研究代表者、研究分担者、協力研究者の CERN(スイス・ジュネーブ)への海外渡航費である。アトラス実験遂行のため、共同研究者との国際共同研究・議論が不可欠なため、現地に赴く必要があった。
- 研究代表者、研究分担者、協力研究者の国内・国際会議への交通・滞在費。本研究成果発表のため必要。
- 研究者招聘（計画研究 A05）新 Higgs 勉強会開催。

◎ 人件費・謝金（総額 56,406,540 円）

- 研究支援員の雇用（計画研究 A01：ピクセル検出器開発。A02：超対称性探索解析。A03：標準模型精密測定解析。A04：トップクォーク物理解析、A05：ヒッグス物理理論研究、B02：時空像理論研究、B03：超弦理論研究、B04：大統一理論研究、超弦理論現象論研究）当領域の研究を完遂する上で必要であった。
- 事務補助員の雇用（研究計画 A03：事務業務補助）。

◎ その他（総額 6,430,089 円）

- 研究代表者、研究分担者、協力研究者の国内学会、国際会議への参加費。本研究成果発表のため必要。
- FTK 回路基板設計（計画研究 A04：844,145 円）複雑な FTK 回路基板の設計を専門の業者に発注した。

【平成27年度】

◎ 旅費（総額 78,397,256 円）

- 主な支出は、研究代表者、研究分担者、協力研究者の CERN(スイス・ジュネーブ)への海外渡航費である。アトラス実験遂行のため、共同研究者との国際共同研究・議論が不可欠なため、現地に赴く必要があった。
- 研究代表者、研究分担者、協力研究者の国内・国際会議への交通・滞在費。本研究成果発表のため必要。

◎ 人件費・謝金（総額 55,222,337 円）

- 研究支援員の雇用。（計画研究 A01：ピクセル検出器開発。A02：超対称性探索解析。A03：標準模型精密測定解析。A04：トップクォーク物理解析、A05：ヒッグス物理理論研究、B02：時空像理論研究、B03：超弦理論研究、B04：大統一模型理論研究）当領域の研究を完遂する上で必要であった。

◎ その他（総額 3,840,638 円）

- 研究代表者、研究分担者、協力研究者の国内学会、国際会議への参加費。本研究成果発表のため必要。
- FTK ボードのベゼル（支持部分）の加工依頼（計画研究 A04：505,440 円）FTK 回路を入れる支持の加工が必要となった。

(3) 最終年度（平成27年度）の研究費の繰越しを行った計画研究がある場合は、その内容を記述してください。

計画研究 A02：繰越金額（25,750,000 円）

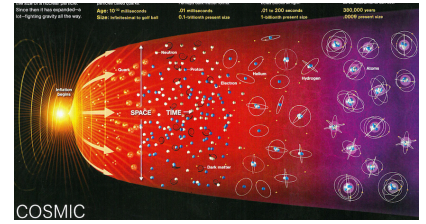
平成27年11月、LHCでの超対称性発見のための衝突実験の結果、幾つかの探索モードで標準理論の予言する背景事象に対して標準偏差3程度の事象の超過が観測された。この超過に関して、統計的なフラつきによるものか、もしくは何らかの信号なのかを、計画研究遂行上見極めることが極めて重要で不可欠である。このことから、この標準偏差3程度の超過についての研究を追加で実施する必要性が生じた。

## 9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度（1ページ以内）

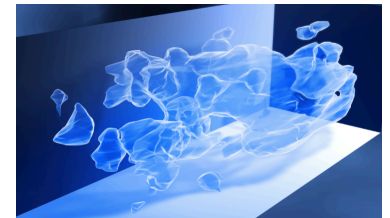
研究領域の研究成果が、当該学問分野や関連分野に与えたインパクトや波及効果などについて記述してください。

### 「ヒッグス粒子発見のインパクト」

本領域最大の成果であるヒッグス粒子の発見は当該素粒子分野に限らず、周辺分野まで含めその影響は極めて大きい。その重要性から発見翌年のノーベル物理学賞受賞へとつながった。ヒッグス粒子の発見、その後の性質測定により様々なことが分かって来ている。ヒッグス粒子の性質測定により、真空にはヒッグス場の凝縮状態が満ちており、



これにより力を伝える粒子（ゲージ粒子）のみならず、物質粒子も質量を得ていることが判明した。ヒッグス場は素粒子の世代を明確に区別しており、大きな未解決問題である世代問題に足がかりができた。また、この真空の場の変化（相転移）により、初期宇宙が進化してきたことを初めて実験的に立証できた。今後の宇宙理論はヒッグス場の存在・測定された性質を前提に相転移前の宇宙の解明を目指して発展してゆく。またヒッグス粒子が軽かった(125GeV)ことは、標準模型を超える物理がテラ電子ボルトスケールに潜んでいることを示す。LHC 実験の長期計画、ILC 実験など、次世代の高エネルギー素粒子分野を牽引する加速器計画に対しても、具体的な強い方向付けを与えた。



### 「新粒子事象の兆候」

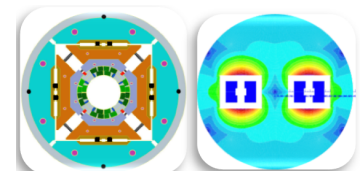
本領域最終年に 13TeV 衝突エネルギーで得られた幾つかの超過事象チャンネルから、宇宙・素粒子分野に大きな議論が巻き起こっている。高統計データにより存在が確認されれば、素粒子実験分野の将来計画を一気に具現化するインパクトをもつ。超対称性粒子探索チャンネルで見られた超過事象は、宇宙暗黒物質など未解決問題の解明にも大きく寄与することが期待される。

### 「標準模型を超える物理の探索・標準模型の精密検証」

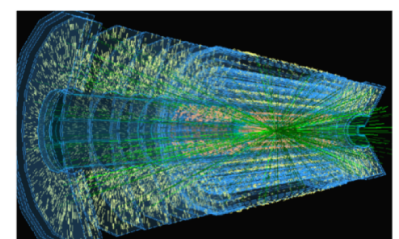
上述のように新物理の兆候は見られるが、一方で数多くの新物理探索チャンネルにおいて、新物理、特に従来考えられていた超対称性理論のモデルパラメータへの厳しい制限を得て、今後の探索領域を強く限定する成果を得た。特に、超対称性粒子探索など大きな消失エネルギーを用いるチャンネルからの制限より、宇宙暗黒物質の候補に対して強い制限を与える結果となり、非加速器実験による直接探索分野と相補的な暗黒物質研究が期待される。また、軽いヒッグス粒子の存在と新粒子未発見の事実は、これからの新たな物理模型構築の基本方針を大きく変更する成果となった。同時に精密測定による標準模型の精密検証、高統計データを用いた高次の標準模型過程が検証され、テラスケールにおける標準模型の有効領域が確認された。

### 「LHC 高輝度・次世代加速器開発による基盤技術の確立」

本領域では次世代加速器に向け、放射線耐性に優れ、高い磁場精度を保つ、超伝導素材開発が行われた。また、10T 以上の高電磁力線下での機械特性に優れた超伝導新素材の開発が行われた。これらの新たな超伝導加速器技術の知識・経験は我が国の加速器技術立国としての立場を不動のものにする影響力を持つ。



「次世代検出器開発」半導体検出器、ミュオン検出器等、アトラス実験の主要な構成検出器の高度化が進められた。これは次世代実験 ILC、その他の様々な実験で使われる検出器の基本設計に直接影響を及ぼす。



## 10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況（1ページ以内）

研究領域内での若手研究者育成の取組及び参画した若手研究者（※）の研究終了後の動向等を記述してください。

※研究代表者・研究分担者・連携研究者・研究協力者として参画した若手研究者を指します。

### 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激しい素粒子研究に従事させることで育成を行ってきた。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。本領域の若手研究者はヒッグス粒子発見において、3つの主要なチャンネルで解析責任者として現場を率いて発見という大きな成果をあげる活躍をした。そのほか多くの若手研究者（20名以上）が解析や検出器の責任者として活躍をしてきた。

### 実験・理論の融合を通じた若手研究者の育成

本領域の展開するテラスケール物理は、最先端の素粒子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。若手研究者には研究会や勉強会を開催する（合計11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することを行ってきた。

### 博士研究員の雇用と育成

本領域の特徴として理論研究の博士研究員（17名）を多く採用した。LHC・アトラス実験の Run1 の成果が出続けるなか、理論的に取り組むべき研究テーマは次々と生まれる。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。彼らの約9割はアカデミックな分野で教員（准教授1名、講師1名、助教3名）や研究員（10名）として活躍している。また、実験の博士研究員7名は若手研究者として上述した成果をあげて、7名全員がアカデミックな分野で教員（准教授1名、助教2名）や研究員（4名）として活躍している。

### 大学院生の育成

本領域では研究協力者として多くの大学院生を CERN という現場に中・長期に滞在させた。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きた。修士号を取得した学生は131名で57名が進学、博士号を取得した学生は70名でそのうち49名はアカデミックの分野で活躍している。

最後に本領域に関わった若手研究者の動向をまとめる。非常勤の研究職であった研究者の約半数は常勤の職に就き、博士号を取得した多くの大学院生が非常勤の研究者として研究人生をスタートさせていることが分かる。また、修士号のみを取得した大学院生は民間企業、官公庁などで活躍している。

本領域に関わった時点 → H28年4月1日の時点	人数
研究職（常勤） → 研究職（常勤）（昇格など）	4
研究職（非常勤） → 研究職（常勤）	21
研究職（非常勤） → 研究職（非常勤）	19
研究職（非常勤） → その他（企業など）	2
大学院生 → 研究職（常勤）	5
大学院生 → 研究職（非常勤）	44
大学院生 → その他（企業など）	95

## 11. 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、中間と最終評価の review を各1日開催し、各計画研究及び領域全体の評価を行った。また、評価者にはできる限り、テラスケール研究会（年に数回開催）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た。

飯嶋徹（名古屋大学大学院・理学研究科・教授） / 日笠健一（東北大学大学院・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）

### 【評価者1のコメント】

- 素粒子標準理論で唯一未発見に終わっていたヒッグス粒子の発見を達成したことは、本領域の科学的成果として最大限に評価したい。また、スピン、パリティなどの測定、ボゾン、フェルミオンとの結合定数の測定も進み、見つかった粒子が世代を区別していることが実験的に明らかになりつつある。これらの研究成果は、素粒子物理学を「新たな段階」に導くものである。
- ヒッグスの発見のみならず、標準理論の精密検証、トップクォークの精密測定も LHC 以前とは一線を画する成果が得られている。超対称性を始めとする新物理の兆候は未だ得られていないが、モデルに対する厳しい制限が得られた。
- 上記の物理成果は大規模な国際共同実験の結果であるが、その中で日本人研究者、特に若手研究者が物理解析や検出器運転において現地でリーダーシップを発揮し重要な役割を担ったことは特筆される。長寿命粒子の探索など、この領域の研究から提案された独自の研究も進んでいることも高く評価したい。
- こうした成果は、この領域に参画したシニア研究者の指導力、若手研究者の高い能力、本科研費による長期派遣などの研究支援があつて可能となったものである。今後もこの体制を維持・強化してゆくことが望まれる。
- 物理研究を支える測定器・加速器についての開発研究も進んでいる。将来のアップグレードに向けて日本グループとしてのより組織的な開発研究を進めて欲しい。また、開発された最先端技術は他の実験計画や他分野にもインパクトのあるものなので、積極的に情報発信して欲しい。
- 人材育成上の成果も大きく、多くの大学院生が学位を取得し、国内だけでなく、世界に羽ばたいている。また、雇用した若手研究員のうち5名がテニユアを獲得するなど、プロモーションも進んだ。

最終年度にあたって、本領域で得られた大きな科学的成果をまとめ積極的に発信してゆくことを望みたい。「新たな段階」の意味を咀嚼し、ヒッグス発見以降の素粒子物理の方向性、他の研究領域との関連性を、この領域のアウトプットとして示してほしい。そのために、レビュー論文の執筆を検討してはどうか？また、解説記事の執筆や、講演会、図書出版などの啓蒙活動も積極的に進めて欲しい。

### 【評価者2のコメント】

- 素粒子標準模型で最後まで未発見として残されたヒッグス粒子の発見は物理学における大きな進歩であり、ヒッグスらの 50 年来の業績によるノーベル賞の受賞はこれなしにはありえなかった。これを成し遂げたこの領域の成果は最大級の評価に値する。発見されたヒッグス粒子の性質の測定は、質量、スピン・パリティといった量子数、ボゾンやフェルミオンとの結合定数などを含め速やかに行われ成果を上げており、ヒッグス粒子の精密測定による標準模型の未検証部分を確立するとともに、標準模型を超える物理の探索という新たな段階へと素粒子物理学を導いた。
- ATLAS 実験によって行われたテラスケールの新物理の探索は、きわめて多数の可能性について、従来の実験結果をはるかに凌駕するレベルに到達し、超対称模型を含むテラスケールの新物理のほとんどがその可能性に強い制限を与えた。さらに、弱ボゾン、トップクォーク、ジェットの精密測定により、標準模型の検証の精度が LHC 以前と比較して著しく上昇し、新物理探索におけるバックグラウンドの理解に大きく貢献した。
- 国際リニアコライダー(ILC)計画はヒッグス粒子発見により重要性を増し、その推進のため多くの研究が行われた。
- ALTA 実験において新粒子が未発見であったこと、発見されたヒッグス粒子の質量が 126GeV であったことは、超対称模型を含むテラスケールの新物理に対して理論的再考が余儀なくされ、多数の新しい提案がなされた。その提案を ATLAS 実験における新粒子探索やヒッグス粒子の精密測定、さらにフレーバーの物理、宇宙観測による検証の方法が検討された。超弦理論のコンパクト化の文脈で低エネルギーの物理の可能性を絞り込むトップダウンの研究が進められた。お互いの研究をオーバーラップして推進することで有機的に研究が進められた。
- 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、常に最新の実験結果および理論的な成果を領域全体のみならず、国内の一般の研究者を含めて発信してきた。この会をきっかけとした共同研究は多くの成果をもたらし、領域としての機能が果たされている。また研究会では学生を含む若手研究者に積極的に講演させており、若手研究者の育成に寄与した。
- 多数の大学院生が学位を取得し国内外の研究職を獲得、また雇用した若手研究者が東大、京大など常勤研究職に就くなど、人材育成の面での成果も大きい。

#### 【評価者 3 のコメント】

ヒッグス粒子の発見をはじめ、素粒子研究の中核として大きな貢献を行ってきた。また人材育成でも大きな成果が上がっている。新現象の発見、LHC の増強、ILC とこれから多くの研究テーマがあるなかで、ますます国際的な競争が激しくなっていく。そのなかで、all Japan の研究体制を築き多くの成果を上げている点は、新学術研究領域の一つのロールモデルである。今後の成果、特に新現象、超対称性の発見を目指して強力に研究を推進してほしい。