

# 平成25年度 新学術領域研究（研究領域提案型） 中間評価結果（所見）

## 研究領域名

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

## 研究期間

平成23年度～平成27年度

## 領域代表者

浅井 祥仁（東京大学・大学院理学系研究科・教授）

## 研究領域の概要

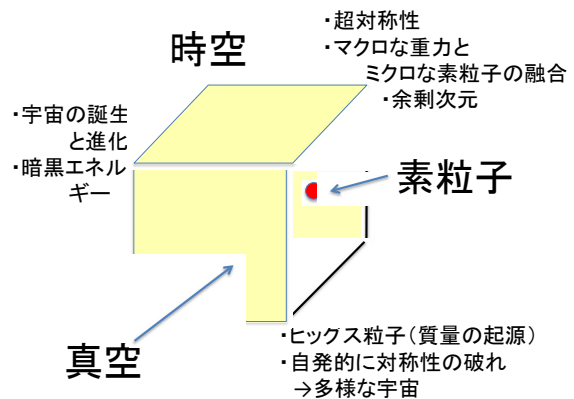
先端加速器LHCでヒッグス粒子を発見し、「真空」が持つ豊かな構造や質量の起源を解明する。また超対称性や余剰次元の発見から、宇宙の暗黒物質の正体を解明し、「時空」構造の解明をすすめる。これらの成果は、自発的対称性の破れによる相転移が現在の多様な宇宙の起源であることを実証するものである。また我々の感覚に直接結びついた「時空」の理解に革命的な変革をもたらす。本申請領域は、これまで粒子やその相互作用が主な研究対象であった素粒子研究を大きく広げ、従来入れ物であった「時空」や「真空」を探る新たな研究領域を形成する。確実な成果が期待されるLHCでのテラスケール物理成果を核に、エネルギーフロンティア実験の鍵となる加速器・検出器技術の開発や、宇宙、時空、超弦理論などの研究を展開する。

## 領域代表者からの報告

### 1. 研究領域の目的及び意義

（領域目的の全体像）

- ◎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
- ◎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。右図に示すように、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



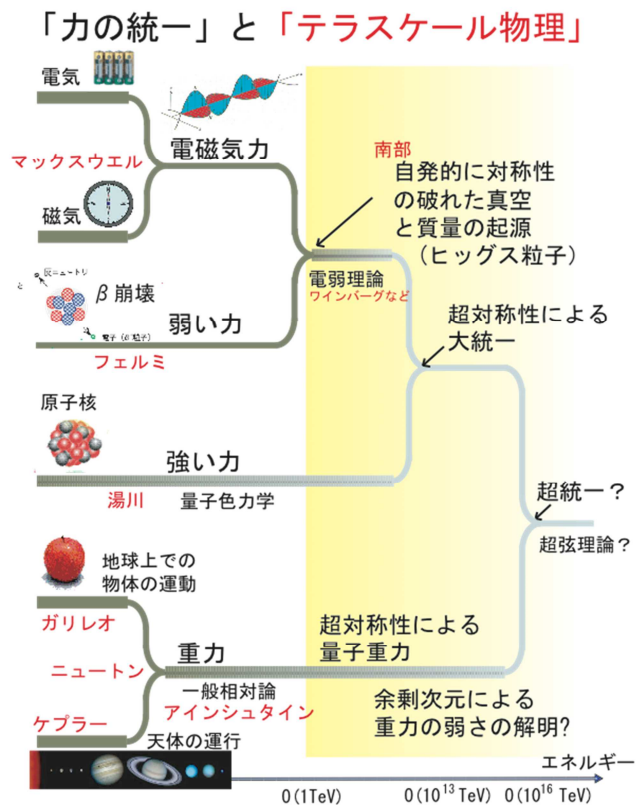
（領域の研究目的）

- ◎先端加速器LHCでのアトラス実験で、『テラスケール( $\text{TeV}=10^{12}$ 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、その容器物である「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。
- ◎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)。このよう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。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。

(我が国の学術水準の向上・強化につながる理由)

◎ 湯川、朝永、小柴、南部、小林、益川、六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に計り知れない大きな効果が期待される。この領域が切り拓く新しいテラスケール物理は、真空や時空の構造の解明など、科学全般の基礎となるものである。

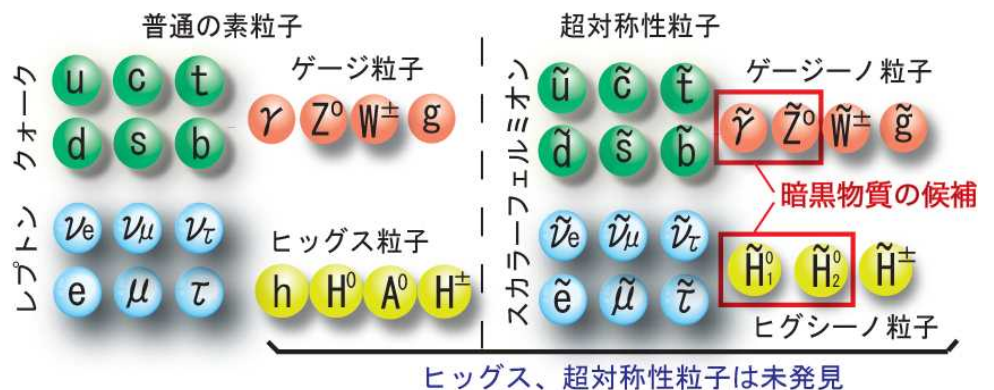


◎現在稼働中のLHC加速器の超伝導技術や半導体技術で、日本の最先端技術が重要な役割を果たしており、「日本の技術なくしては、LHCは出来なかった」とLHCのプロジェクトマネージャー(Lyn Evans氏)も語っている。本領域はLHCでの建設経験や運用・研究経験を基に、次世代のエネルギーフロンティア実験の基幹の技術開発を行う。これは、我が国の基礎科学の技術的な基礎となるものであり、学術・技術水準の向上・強化につながる。新しい超伝導材、半導体検出器技術、高放射線耐性検出器、高速エレクトロニクスシステムなど、次世代のエネルギーフロンティア実験のみならず大きなスピノフも期待できる。

(学術的背景：着想に至った経緯)

◎我々はこれまで、一世代前のエネルギーフロンティア実験 LEP (電子・陽電子衝突実験)、HERA (電子・陽子衝突実験) や TEVATRON (陽子・反陽子衝突実験) を通して、標準理論の確立に大きな貢献をし、標準理論を超える新しいテラスケールの物理の重要性を指摘してきた。2010年より欧州素粒子原子核研究所(CERN)に於いて大型陽子・陽子衝突型加速器 (LHC) が稼働し、テラスケールでの新しい物理研究が初めて可能となった。

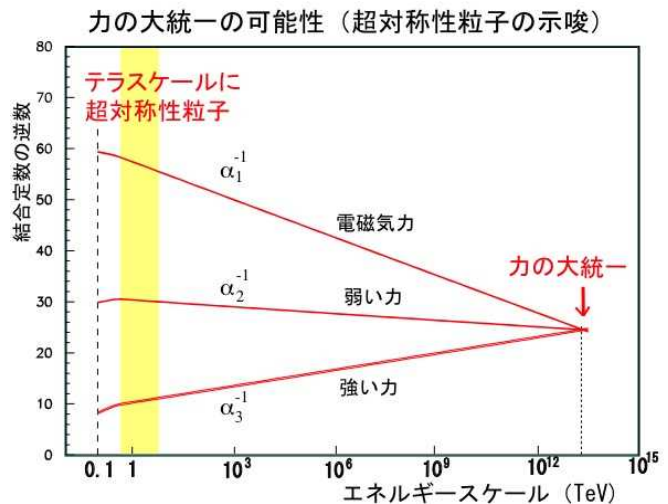
◎LHC を用いたアトラス実験では、ヒッグス粒子の確実な発見が可能である。またテラスケール領域に存在が期待されている一連の超対称性粒子 (右図) の発見により、「暗黒物質の解明」



や「力の大統一」(右下図)などが期待されている。

この目的のため我々のグループはLHC 加速器やアトラス検出器の開発・製作を行ってきた。本領域で、この重要な発見を主導的に推進していくことがこれまでの研究の流れから自然であると同時に、国際的にも強く望まれている。

◎素粒子理論の研究は湯川・朝永先生をはじめとする日本の重要な分野である。これらの素粒子研究を本領域のもとでまとめ、テラスケールでの新しい発見と相まって新しい方向を展開することも自然な流れである。



## 2. 研究の進展状況及び成果の概要

(本領域で具体的に期待できる成果は以下の4点である)

- (1) ヒッグス粒子の確実な発見と質量の起源の解明
- (2) 超対称性粒子など標準理論を超える新しい素粒子現象の発見：直接探索、間接探索の両輪で確実な発見を目指す。
- (3) ヒッグス粒子や超対称性粒子の研究を通して時空や真空の解明を目指す。
- (4) LHC・アトラス検出器の性能向上や次世代エネルギーフロンティア実験にむけて、加速器・検出器の基礎技術の開発を行う。

現在の進行状況に対応つけて、まとめる。

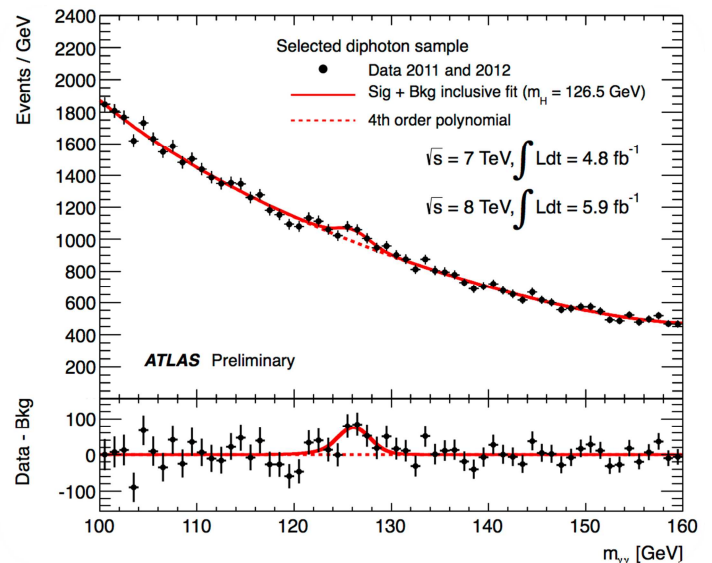
### (1) ヒッグス粒子発見

◎2012年7月4日に会見を行い、質量126GeVのヒッグス粒子と思われる新粒子を発見した。右図にヒッグス粒子が光子2つに崩壊した時の不変質量分布を示す。質量126GeVの箇所に、ヒッグス粒子と思われる新粒子のピークが観測された。これは、自然科学の歴史に残る大きな成果であり、学術的にも極めて大きな影響があると同時に新聞やテレビでも一面に大きく取り扱われた。(写真右下)

このときは、ゲージ粒子への結合だけが観測されていたので、発見された新粒子はヒッグス粒子であるとは断定せずに、実験を続けた。

◎データ量を約2倍に増やし、フェルミ粒子との結合が(2σ程度の確度で)測定され、同時にスピンゼロ、パリティ正であることも観測できたので、2013年3月に、**発見された新粒子は、ヒッグス粒子である**と断定した。質量の起源に関係していることも確かめられたが、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。

この歴史に残る成果には、バックグラウンド研究や検出器較正などアトラス実験での物理研究に参加している4つの計画研究A01-04が共同で行った。



### (2) 超対称性など標準理論を超える新しい素粒子現象に厳しい制限

◎ヒッグス粒子の性質の標準理論からのズレ、標準理論反応過程の精密検証、標準理論を超える新現象の直接探索の3つの方法を計画研究A01-06が共同して推進した。LHCの重心系エネルギー8TeVまで

には、標準理論を超える新しい素粒子現象は残念ながら発見されなかった。

◎超対称性粒子に対して厳しい制限（グルイーノに対して、約1.4TeV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た。

◎2015年（本領域の研究年度内）にLHCの運転エネルギーは14TeVに倍増されるので、超対称性などの新粒子発見が期待されている。8TeVでの研究を進展させ、14TeVでの速やかな発見にむけて現在準備研究を進めている。

### (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、時空と真空の関係など詳細な研究が進展している。

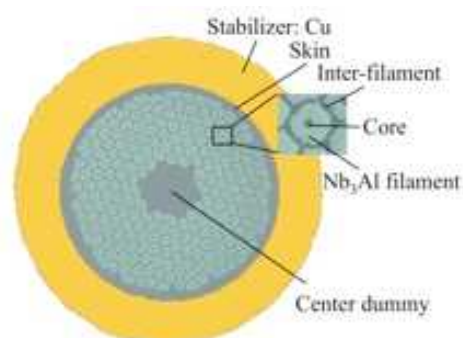
◎ 「質量起源の解明」という素粒子分野の成果ばかりでなく、真空のエネルギーや、真空の相転移によって宇宙が誕生・進化してきたことを示す成果であり宇宙物理の研究が進展している。

◎ 軽い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1TeVより軽い領域にないことから、研究項目Bの研究成果とあいまって、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。

### (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。

例えば、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。



◎超伝導技術ばかりでなく、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。これらの成果は2018年に予定されているアトラス検出器の大幅な性能増強に活かされる。



(本領域が設定した対象は以下の2つ)

#### 「既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域創成」

本領域は、核となるテラスケール物理の新たな現象を発見し、この実験的成果をもとに、新しい宇宙像、時空概念、素粒子の大きな謎である世代構造の解明、自然を表現する数学などへの研究を直接展開することにより新たな領域を創成するものである。

(研究項目A)

◎本領域の核となる重要な課題の一つであるヒッグス粒子を2012年に発見、その質量や性質を決めることができたのは、大きな成果である。ヒッグス粒子の発見は、単に質量の起源が解明され、素粒子標準模型が完成することを意味するのではなく、真空の相転移によって宇宙進化や素粒子の性質が決められていることの実験的な証拠であり、既存の学問分野を超えて新しい展開につながる。またメディアや一般向け科学誌が扱った様に、人々の自然観に影響を及ぼす社会的に大きな反響のある結果であった。

(研究項目B)

◎ヒッグス粒子の発見とその質量は、標準理論を超える物理を理解する上で、大きなインパクトがあった。単純な超対称性理論で考えると質量がやや重すぎること、この質量領域であれば宇宙の初期からヒッグス場が安定であっても良いことなどから、これまで考えられてきた従来のテラスケール物理の枠組みを再構築する必要が出てきた。研究項目Bは、新しい研究の枠組みを構築し、新しい宇宙像・時空概念の構築、さらには新しい自然観に向けて、新しい方向を打ち出した。

「当該領域の研究の発展が他の研究分野に大きな波及効果をもたらす」

本領域は、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。また、現在のインターネット社会の基盤をなしているWWWも素粒子実験の情報を共有する目的で開発されたものである様に、検出器技術や高速データ収集技術、Associative Memoryと呼ばれるデータでなく判断を保存するメモリを使ったトリガーの開発なども含めて、計算技術関連分野は、基礎科学分野のみならず、産業界にも大きな効果が期待できる。また超伝導線材の基礎技術は、広く工業応用が期待される。

(研究項目A)

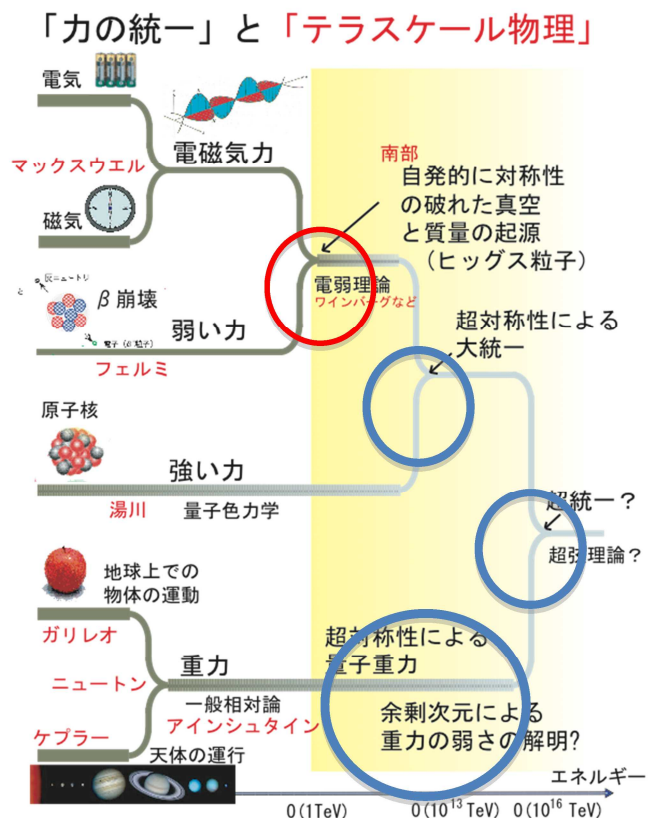
◎未だに超対称性などの新しい兆候は得られていないが、ヒッグス粒子の発見は、真空の概念を変えるものであると同時に、宇宙の誕生や進化に真空の相転移が役割を果たしている初めての実験的な証拠であり、宇宙物理学の分野に大きな波及効果をすでに与えた。

当初設定した目的:素粒子の歴史(右下図)で示すと、赤丸の部分为本研究成果である。

◎新しい超伝導素材の実用化、放射線耐性のすぐれた検出器などの開発も進んでいる。また、高速データ収集技術、GRIDコンピューティングなども含めて、技術関連分野に大きな波及効果がすでに及んでいる。

(研究項目B)

これまでのテラスケールでの物理成果を基礎に、宇宙誕生、時空の構造、超弦理論の数学的形式、素粒子の世代問題などに、新しい知見をもたらしている。また、テラスケールでの標準理論を超える新しい素粒子現象の発見には至っていないため、これらの知見はまだ限定的であるが、これらは設定した目標(右図)の3つの青丸の部分であり、物理学全般に及ぶものである。



審査部会における所見

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)

1. 総合所見

本研究領域は、ヒッグス粒子や超対称性粒子などの確実な発見とその発見を機に、素粒子・時空・真空の新しい融合領域の生成を目指しており、歴史的な成果であるヒッグス粒子の発見は期待以上の進展と言える。本研究領域の若手研究者を中心とした日本のグループが、大規模実験の中で重要な役割を果たして

いることも評価できる。今後も領域として研究を進め、2015年からの14TeVでの実験によるヒッグス粒子の精密測定、さらには超対称性粒子発見を目指してほしい。

## 2. 評価に当たっての着目点ごとの所見

### (a) 研究の進展状況

本研究領域は、綿密に計画された研究を推進することで着実に成果に繋げており、大きな目標の1つであったヒッグス粒子が質量126GeVに発見され、スピンパリティ(0+)が確定された成果は期待以上の進展と言える。2015年からの14TeVでの実験による超対称性粒子発見を期待する。また、ヒッグス粒子の精密測定により、標準ゲージ模型の破れの糸口を発見することも期待したい。

この実験的成果を踏まえて、素粒子・時空・真空 新しい融合領域の創成という目標に向けてさらに研究が展開されると思われる。前人未踏のエネルギー領域での物理の探求は常に新しい研究領域の開拓の可能性を秘めている。

ヒッグス粒子の発見は、素粒子物理学だけでなく、宇宙物理学をはじめとする他分野へ大きな波及効果があり、真空の構造や時空の解明を通して基礎となる自然観の変革へと波及する。また、ヒッグスの発見以外の最高エネルギーでの物理が及ぼす他分野への影響も今後大きくなると期待できる。この実験達成のために開発された半導体検出器技術、高速データ収集技術、超伝導技術は、産業・工業への波及効果が期待される。

### (b) 研究成果

大きな目標の1つであったヒッグス粒子の発見という成果は大きい。また、その性質も順次明らかにされつつあり、結果の公表も行われている。今後、標準理論を超える超対称性粒子の発見等を期待する。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。

### (c) 研究組織

国際的に活躍する若手研究者の育成は着実に進んでおり、評価できる。一方で、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。

### (d) 研究費の使用

特に問題点はなかった。

### (e) 今後の研究領域の推進方策

総括班による良好なマネジメントの下、ヒッグス粒子の発見をはじめとして、特に研究項目Aのグループでは研究が大変順調に進んでいる。今後は理論項目との連携を深めるとともに、公募研究の参画により融合研究がより一層進展することを期待する。

### (f) 各計画研究の継続に係る審査の必要性・経費の適切性

各計画研究については順調に成果をあげており、継続に係る審査の必要性はない。また、研究経費の用途についても妥当である。