

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2011～2015

課題番号：23104001

研究課題名(和文) 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

研究課題名(英文) Particles Physics opening up the Tera-scale horizon using LHC

研究代表者

浅井 祥仁 (ASAI, Shoji)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授

研究者番号：60282505

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 20,900,000円

研究成果の概要(和文)：最大の成果はヒッグス粒子の発見と質量の起源の解明にある。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、第2世代の結合が弱いこと、がわかり、世代の理解を進めることができた。またヒッグスの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。

標準理論を超える新しい素粒子現象を確実に捉えるための研究を推進し、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1.5TeVより重い)が得られた。

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を確立した。

研究成果の概要(英文)：We have also obtained the stringent constraints on the SUSY particles, for example, the lower limit on the gluino mass is about 1.5TeV. Dark matter whose mass is  $O(100)$ GeV is also shown to be disfavored. This is big effect on the direct dark matter searches.

研究分野：素粒子物理学実験

キーワード：LHC テラスケール ヒッグス 超対称性 真空

1. 研究開始当初の背景

実験開始当時は、標準理論の最大の謎である質量の起源やその鍵となるヒッグス粒子が未解決、未発見であった。

一方、暗黒物質やヒッグス粒子存在の期待から、ヒッグス粒子と同程度の質量をもつ超対称性粒子の存在が期待されていた。

本研究により、ヒッグス粒子が発見され質量の起源が解明されたが、なぜこのような軽いヒッグス粒子が存在できるのかに関しては新しい謎が生まれることとなった。

2. 研究の目的

(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。

図1にテラスケールの物理的成果が大きな成果につながるものであることを示す。

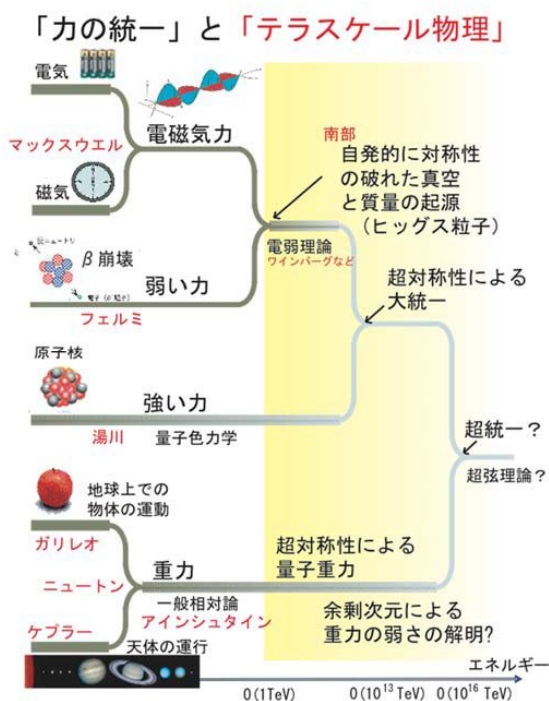


図1

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。

3. 研究の方法

総括班を、各計画研究の代表者と科学コミュニケーションの専門家及び事務担当者で組織する。総括班会議を毎月開き、最新の研究成果の共有、相互の情報交換を積極的に行い、各計画研究の発展が他の計画研究の進展に結びつき、新しい研究領域に広がるようにする。また、研究成果をまとめ、計画研究や公募研究の間の情報交換、研究支援の目的で、研究会を随時開催する。本領域の研究内容や成果を一般社会に広く知ってもらうため、公開講演会を含めたコミュニケーション活動を行い、新しい自然観を社会と共有していく。

平成 23~24 年度は、LHC でのテラスケールでの新現象発見に向けて、発見能力を最大限に高めるように領域全体での研究支援を行う。この発見に本領域研究が主導的な役割を果たすように領域全体の支援を行う。また、最先端実験の現場での経験や成果を生かして、次世代実験の加速器や検出器のデザインやプロトタイプ製作を支援する。

平成 25 年度以降は、テラスケール物理の新たな発見から領域を広げ、新たなパラダイムを創造する。テラスケールでの研究内容を共有し、宇宙、素粒子、時空、真空、数学へと研究を展開し、新しい先端研究領域を形成するように領域全体の研究支援を行う。またその成果に立脚して、次世代エネルギーフロンティア実験に求められる性能を評価し、その実現に向けて最先端の加速器・検出器技術の開発を支援する。

またこれらの成果や自然観、技術を、研究者や一般社会に広く発信する活動を行う。

#### 4. 研究成果

##### (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(図2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(図3)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、世代の理解を進めることができた。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、より詳細な研究が必要である。

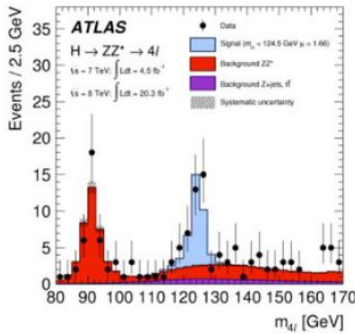


図2

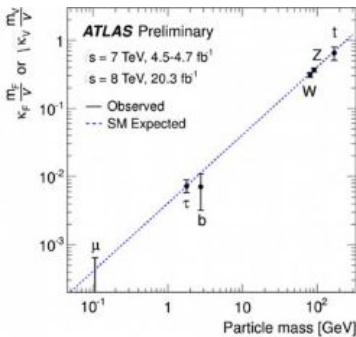


図3

(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(グルーオンに対して、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1TeV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Nb3Al線材(図4:ラザフォード線断面図、図5:試作したNb3Al磁石)を開発し、放射線や機械的な強度耐性を調べた。その結果をプロトタイプ加速器の設計に反映された。

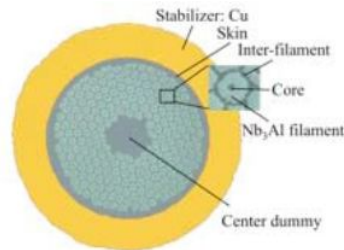


図4

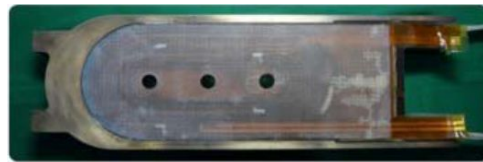


図5

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、ルミノシティーを10倍に増強したHL-LH 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。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計23件)

S. Asai et al. ATLAS Collaboration, "Evidence for the spin-0 nature of the Higgs boson using ATLAS data", Physics Letters B 726 (2013) 120-144  
10.1016/j.physletb.2013.08.026  
査読有

S. Asai et al. ATLAS Collaboration, "Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC", Physics Letters B 716 (2012) 1-29  
<https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.020>  
査読有

[学会発表](計19件)

J. Hisano, "Probing the TeV scale and beyond with EDMs, 4<sup>th</sup> KIAS Workshop on particle physics and cosmology, 31/October/2014, Seoul (Korea)

Y. Hosotani, "LHC signals and dark matter in the  $SU(5) \times U(1)$  gauge-Higgs unification", SUSY2014, 24/July/2014, Manchester (UK)

戸本誠, "LHC 8TeV 実験の成果", 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 21 日, 高知大学 (高知県高知市)

S. Asai, "Higgs Boson, Dawn of Physics to explore the vacuum", CLEO-PR & OECC/PS 2013, 2/July/2013, 京都国際会館 (京都府京都市)

M. Nojiri, "Theoretical Results on Physics Beyond the Standard Model", 2013 Lepton Photon Conference, 24/June/2013-29/June/2013, San Francisco (USA)

[図書](計1件)

浅井 祥仁, 共立出版, LHC の物理 ヒッグス粒子発見とその後の展開, 2016, 134

[その他]

ホームページ等

<http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/terascale/>

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

浅井 祥仁 (ASAI, Shoji)

東京大学・大学院理学系研究科・教授  
研究者番号: 60282505

##### (3)連携研究者

徳宿 克夫 (TOKUSHUKU, Katsuo)

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  
研究者番号: 80207547

藏重 久弥 (KURASHIGE, Hisaya)

神戸大学・大学院自然科学系先端融合研究環・教授  
研究者番号: 20205181

戸本 誠 (TOMOTO, Makoto)

名古屋大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号: 80432235

野尻 美保子 (NOJIRI, Mihoko)

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  
研究者番号: 30222201

駒宮 幸男 (KOMAMIYA, Sachio)

東京大学・大学院理学系研究科・教授  
研究者番号: 80126060

山口 昌弘 (YAMAGUCHI, Masahiro)

東北大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 10222366

細谷 裕 (HOSOTANI, Yutaka)

大阪大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 50324744

渡利 泰山 (WATARI, Taizan)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任准教授

研究者番号: 40451819

久野 純治 (HISANO, Junji)

名古屋大学・基礎理論研究センター・教授  
研究者番号: 60300670

横山 広美 (YOKOYAMA, Hiromi)  
東京大学・大学院理学系研究科・准教授  
研究者番号：50401708

坂本 宏 (SAKAMOTO, Hiroshi)  
東京大学・素粒子物理国際研究線センター・  
教授  
研究者番号：80178574