

科学研究費助成事業 研究成果報告書

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：23104003

研究課題名(和文)超対称性の発見と大統一理論の実験的検証

研究課題名(英文) Searches for the super-symmetric signatures and the verification of the Grand Unification Theory

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) 246,200,000円

研究成果の概要(和文)：超対称性粒子探索を生成・崩壊の事象トポロジー分類により組織的に進めた。超対称性の存在を示唆する事象も確認したが、発見には至らず各チャンネルに厳しい制限を課した。また長寿命粒子、高質量共鳴ピーク、特異な終状態、など超対称性以外の新粒子・現象の探索も行った。統計的に有意な超過も見られたが、発見には至らず各チャンネルに対し厳しい制限を課した。

LHC高輝度アップグレードに向けた磁石の開発では、次世代加速器用開発として耐放射線線材を開発した。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。また10T超の高磁場磁石を製作し励磁試験でケーブル性能を評価した。

研究成果の概要(英文)：Searches for the super-symmetric signatures were systematically conducted for the categorized channels based on the production and the decay topologies of the assumed signals. Although some signal-like events were detected, none of the channels were significant, hence the stringent limits were set. Also the new particles, and exotics phenomena were searched for with the signatures such as, long-lived particles, high-mass resonances, peculiar final states. None of them had a large enough significance for the discovery and the limits were set accordingly. For the magnet developments towards the high-luminosity LHC accelerator upgrade, the high radiation tolerant cables were developed. 2-m model pilot magnet was fabricated and the excitation test at 1.9K was performed. In addition, high field magnet beyond 10T was developed and performance of the cables was assessed.

研究分野：素粒子物理学実験

キーワード：LHC ATLAS 超対称性粒子 ヒッグス粒子 超伝導

1. 研究開始当初の背景

素粒子標準理論はこれまで電弱エネルギースケールにおいて高精度に検証されてきた。しかし、標準理論は暗黒物質を含まないなど観測との矛盾や、階層性問題など幾つかの理論的な課題を抱えており、より本質的な基礎理論が存在すると考えられている。その中で最も有望視されているのが、超対称性理論である。TeV領域における新しい素粒子現象、特に新粒子群の発見が、LEPなどの精密測定、3つの力の大一統、暗黒物質、階層性問題の解決などから予言されている。超対称性粒子探索はCERNのLHC加速器と国際共同実験ATLAS検出器を用いて行う。本計画研究開始の前年にはパイロット実験が行われ、研究代表者を中心とした解析チームにより、超対称性粒子の低質量領域を棄却することに成功した。本計画研究は、開始前年度の経験・実績を踏まえ、データ量が大幅に増加する平成23年から本格的な探索を開始した。また本研究で得られる研究成果は次世代実験計画に大きなインパクトを持つ。それらの計画で期待される物理と加速器スペックの策定を行い、次世代の加速器開発を進めることが重要である。これにより、本計画研究で得られた物理成果を発展させることができる。

2. 研究の目的

(1)LHCアトラス実験で、超対称性など、標準理論を超える新しい素粒子現象を直接的に発見することである。探索対象が未知なため、探索は特定の現象論モデルに依存しないよう、観測事象のイベント・トポロジーを基本とした直接探索を系統的に行う。これにより確実な発見を目指す。

(2)背景事象量の評価を、実験データを用いて行う。この研究は(1)の発見に不可欠であると同時に、他の実験系の研究班にとっても、共通に重要な要素となる。

(3)次世代加速器に向けた新しい超伝導素材の開発を行う。また耐放射線性能、高磁場実現を両立させることのできる、次世代超伝導磁石を開発する。プロトタイプ磁石を制作し、性能評価をする。

(4)理論系の計画研究班と共同で得られた成果を元に、新しい素粒子像を創生する。B01班とは、本研究の新物理と宇宙の暗黒物質との関係、宇宙進化に与えた影響を探る。B02、B03班との共同研究により、超対称性が導く新たな時空像、数学構造を発展させる。

3. 研究の方法

(1)検出器の理解を進める。特にハドロン・ジェットのエネギー較正、検出器ノイズや宇宙線事象の除去、消失運動量の算出手法や較正について、精度の向上を目指す。背景事象量を実験データから直接見積り、その不定性を評価する。

(2)超対称性や余剰次元などの信号を、ジェット数、レプトン数、b-jet数、消失エネルギーの大小などにより、事象トポロジー毎に分類し、系統的な探索を行う。

(3)超伝導加速器用の新しい Nb3Al超伝導線の開発を行う。超伝導材を機械的に固定する樹脂を選定する。放射線耐性が期待できるシアネートエステル樹脂の性能評価を行う。更に最終年度の平成27年には、衝突エネルギーが倍増され 13TeVでの運転を行った。

(4)エネルギー増強により、新物理への感度が上がった。直接探索を組織的に展開し、超対称性粒子や新しい素粒子現象の兆候を確認する。

(5)LHC 高輝度アップグレードを念頭に、強磁場双極超伝導磁石の設計と試作を行い、冷却励磁試験などを通して性能評価を行う。

4. 研究成果

LHC 加速器の陽子・陽子衝突を用いて行った。平成24年までの7、8TeV衝突エネルギーを用いた第一実験期(Run1)と、平成27、28年の13TeVを用いた第二実験期(Run2)の結果を合わせて報告する。但し本計画研究では、平成27年の段階で、幾つかの探索チャンネルに3程度の超過が見られており、物理信号であるかどうか見極めるために、補助事業の期間を延長することとした。従ってここでは平成28年前半の結果も含む。

(1)超対称性粒子探索に対する厳しい制限：観測事象のイベント・トポロジーに探索チャンネルを分類し、組織的な探索を展開した。また背景事象の見積りをシミュレーションによるものに加えて、実験データを用いたものも導入し、評価の不定性を著しく抑えることに成功した。これらの手法の開発・調整は平成24年までに大きな進展が見られた。同様の手法を平成27年にも用いて探索を進めた。

Run1で発見されたヒッグス粒子の質量125GeVを実現するために、第3世代超対称クォーク(スカラートップ等)が1TeV以下程度に軽い、というのが自然に期待される。広域な質量領域に渡り、軽いスカラートップの存在

を棄却する結果となった。0.85 TeVの制限を設けた(図1)。

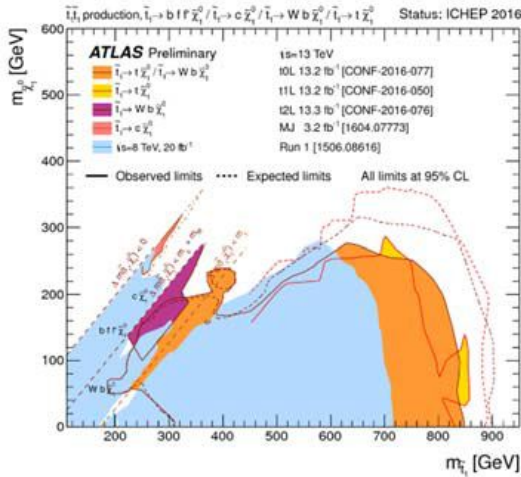


図1

強い相互作用により生成されるグルイーノ・スクォークの探索を、多数ジェット+消失エネルギーを用いた高統計の解析により行った。グルイーノ質量 = スクォーク質量の仮定で 1.85 TeV の厳しい制限を設けた(図2)

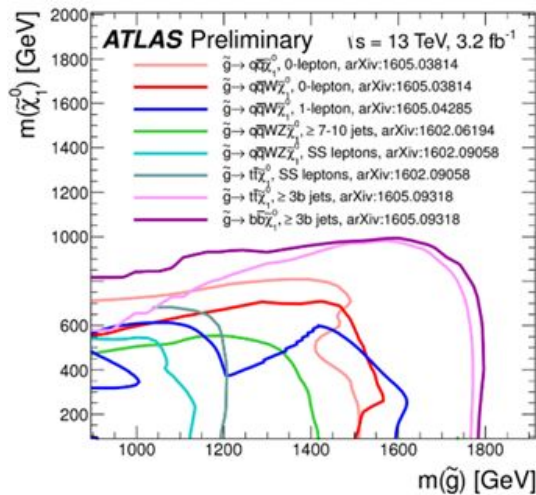


図2

電弱相互作用によるゲージノ生成も統計の増加に伴い重要なチャンネルとなった。複数のレプトンを要求する解析では、様々な崩壊過程を考慮して広範囲に渡る質量領域を棄却した。

(2) 超対称性粒子以外の新粒子・現象も含む事象に対する厳しい制限:

飛跡検出器の理解が進み、検出器内で崩壊するような長寿命の新粒子探索が可能になった。飛跡が検出器内で消失する事象や、崩壊パーティックスが検出器中央からずれるような特異な事象の探索を進めた(図3)。

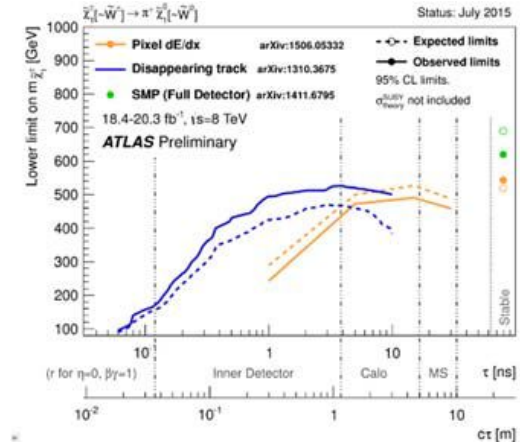


図3

レプトン対生成や2本ジェット等の不変質量分布を用いた、余剰次元模型や、その他幾つかの新しい理論体系が予言する新粒子に対して、直接探索を行った。余剰次元模型の一つである RS 模型が予言する重力子に対しては、3.2 TeV の下限を設けた。

マイクロ・ブラックホール生成、ベクターライク・クォーク等、特異な終状態をもつ新物理の探索も行った。これまでのところ、背景事象からの超過は見られていない。

(3) 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伝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。また、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て性能評価を行った。

次世代高エネルギー加速器(FCC)計画に向けた、高磁場超伝導磁石及び、線材の開発も行った。10T(テスラ)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(燃線)の試作に成功し、その性能評価を行った。

(4) 総括班が主催して開催した「テラスケール研究会」は11回に及び、2回/年のペースで行われた。領域全域に渡る議論が、長日に渡

り行われるが、特に超対称性探索、新粒子探索、暗黒物質、時空構造に関する議論を実験・理論間で展開することができた。理論・実験合同研究から発展した論文も出版された。

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 122 件)

ATLAS Collaboration の論文には、研究代表者・研究分担者・連携研究者の内アトラス実験関係者を全て含む

“Summary of the searches for squarks and gluinos using $s = 8$ TeV pp collisions with the ATLAS experiment at LHC”; The ATLAS collaboration, JHEP10(2015)054、査読有、DOI:10.1007/JHEP10(2015)054

“ATLAS Run1 searches for direct pair production of third-generation squarks at the Large

Hadron Collider”; The ATLAS collaboration, Euro. Phys. J. C (2015) 75: 510.、査読有、DOI:10.1140/epjc/s10052-015-3726-9

“Search for the electroweak production of supersymmetric particles in $s = 8$ TeV pp collisions with the ATLAS detector”; The ATLAS collaboration, Phys.Rev.D93, (2015) 052002、査読有、DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.93.052002

“Search for massive long-lived particles using multitrack displaced vertices of displaced lepton pairs in pp collisions”; The ATLAS collaboration, Phys.Rev.D93 (2015) 052002、査読有、DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.93.052002

“Model Magnet Development of D1 Beam Separation Dipole for the HL-LHC Upgrade”, T.Nakamoto, M. Sugano, Q. Xu et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 25, No.3 (2015) 4000505, 査読有

<http://ieeexplore.ieee.org/document/6915845/?reload=true>

[学会発表](計 33 件)

“Beyond the SM Higgs searches”, J.Tanaka, 4-th Annual Large Hadron Collider Physics Conference 2016, 13-19/June/2016, Lund (Sweden)

“New physics searches at the LHC: where do we go with run II?” O.Jinnouchi, TeV Particle Astrophysics 2015, ,

26-30/Oct/2015, 柏の葉カンファレンスセンター (千葉県柏市)

“SUSY searches at the LHC”, S. Asai, 27th Recontres de Blois, 31/May - 5/June/2015, Blois(France)

“Searches for BSM and Higgs boson at LHC”, O. Jinnouchi, International Workshop on Grand Unified Theories, 15-17/March/2012, 京都大学(京都府京都市)

“Search for the Standard Model Higgs boson at ATLAS”, J.Tanaka, Les Rencontres de Physique de la Vallée d’Aoste, 26/Feb-3/Mar/2012, La Thuile (Italy)

“R&D Efforts towards High Field Accelerator Magnets at KEK”, T. Nakamoto, 22nd International Conference on Magnet Technology (MT-22), 12-16/Sep/2011, Marseille(France)

[図書](計 2 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

浅井 祥仁、祥伝社出版、ヒッグス粒子の謎、2012、203

[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

(2)研究分担者

中本 建志 (NAKAMOTO, Tatsushi)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センター・教授
研究者番号：20290851

陣内 修 (JINNOUCHI, Osamu)
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：50360566

田中 純一 (TANAKA, Junichi)
東京大学・素粒子物理国際研究センター・准教授
研究者番号：80376699

(3)連携研究者

山本 明 (YAMAMOTO, Akira)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・研究員
研究者番号：30113418

佐々木 憲一 (SASAKI, Kenichi)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センター・准教授
研究者番号：70322831

菊池 章弘 (KIKUCHI, Akihiro)
国立研究開発法人物質・材料研究機構・超伝導線材ユニット・主席研究員
研究者番号：50343877

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