

領域略称名：テラスケール物理
領域番号：2303

平成25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

「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

平成25年6月

領域代表者 東京大学・大学院理学系研究科・教授

浅井祥仁

目 次

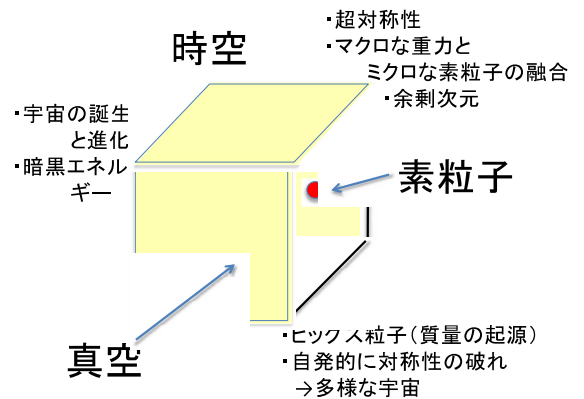
1. 研究領域の目的及び概要	3
2. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	5
3. 研究の進展状況	8
4. 若手研究者の育成に関する取組状況	11
5. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	12
6. 総括班評価者による評価	14
7. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	17
8. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	22
9. 今後の研究領域の推進方策	29

1. 研究領域の目的及び概要（2ページ程度）

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、これまでの研究成果を発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。

（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



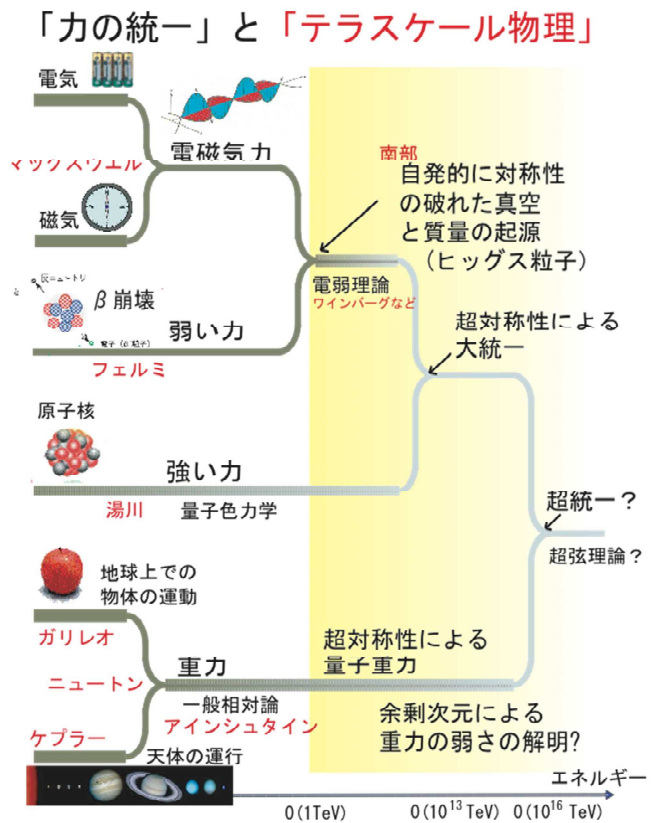
（領域の研究目的）

◎先端加速器 LHC でのアトラス実験で、『テラスケール(TeV=10¹²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。

◎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。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)

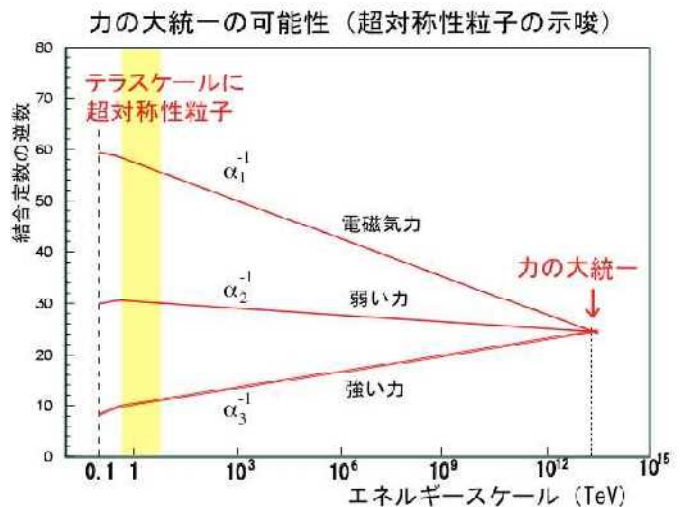
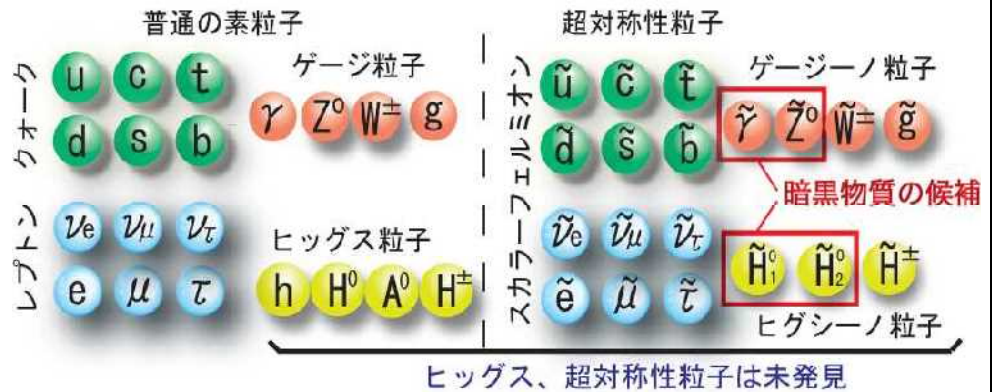
◎ 我々はこれまで、一世代前のエネルギーフロンティア実験 LEP (電子・陽電子衝突実験)、HERA (電子・陽子衝突実験) や TEVATRON (陽子・反陽子衝突実験) を通して、標準理論の確立に大きな貢献をし、標準理論を超える新しいテラスケールの物理の重要性を指摘してきた。2010 年より欧州素粒子原子核研究所 (CERN) に於いて大型陽子・陽子衝突型加速器 (LHC) が稼働し、テラスケールでの新しい物理研究が初めて可能となった。

◎ 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. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2 ページ程度）

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 LHC・アトラス実験での物理研究により、ヒッグス粒子の発見や、テラスケールの新しい物理の発見を行う。LHC・アトラス実験での経験を基にエネルギーフロンティア実験を推進するための次世代実験の基幹技術の開発や準備研究を行う。
- ◎ 研究項目 B 新しく切り拓かれたパラダイムを核に、宇宙物理、真空の構造、時空の解明、超弦理論へと研究を展開し大きな領域を形成する。

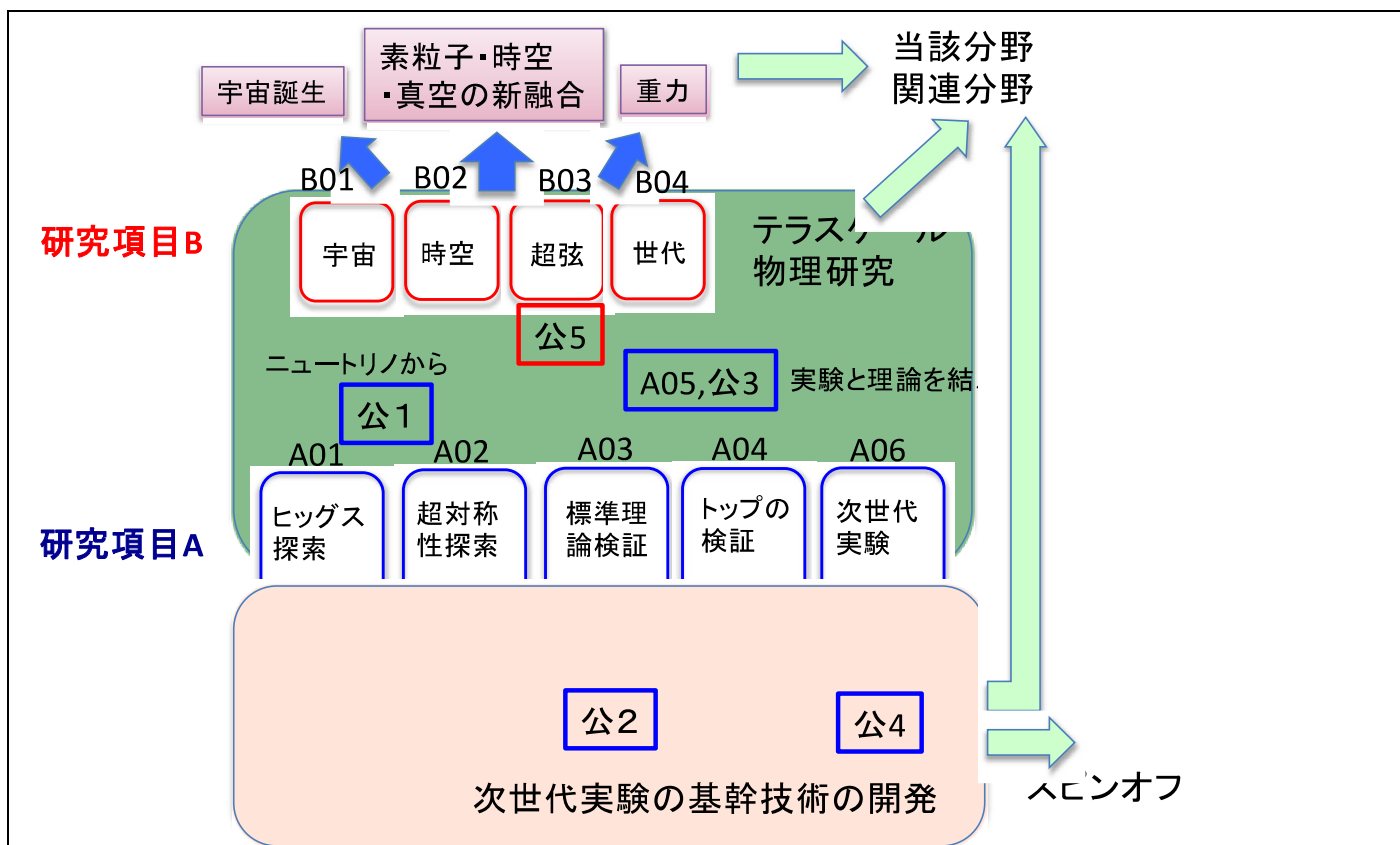
研究項目 A を推進するのが 6 つの計画研究(A01-06)と 4 つの公募研究である。

- ◎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の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、高速ミューオン検出器の開発
- ◎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
- ◎公募研究 1(福田善之(宮城教育大)) ジルコニウム 96 を用いた 2 重ベータ崩壊事探索
ニュートリノの質量の解明は、ヒッグス以外の質量機構の解明や真空の理解につながる。
- ◎公募研究 2(石野雅也(京都大)) ゲージボソン 3 点結合の精密測定
標準モデルを超える新しい素粒子現象に感度があるゲージ粒子の 3 点結合の測定
- ◎公募研究 3(曹基哲(お茶大)) 精密測定実験に基づくテラスケール素粒子模型の研究
LHC/LEP や低エネルギーでの精密測定の結果を加味してテラスケール物理を探る
- ◎公募研究 4(小寺克茂(信州大)) LHC 後に必須な超微細分割カロリメータ開発

研究項目 B を推進するのが 4 つの計画研究(B01-04)と 1 つの公募研究である。

- ◎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
- ◎公募研究 5(北澤敬章(首都大)) テラスケール弦模型の定式化と加速器実験での検証

研究組織の関係と役割を簡略的に次頁の図に示す。



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 と公募研究 3 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(計画研究 A05)、及び低エネルギー実験まで含めた標準モデルの精密な理論的検証(公募 3)は、テーマに重複はなく、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。二つの項目を結びつける役割を果たしている。
- ◎ 公募研究 1 のニュートリノ質量探索は、研究計画 A01, 02 と共同で進め、他のニュートリノ実験の成果なども含めて、ニュートリノからテラスケール物理を探る。
- ◎ 公募研究 2 と A03 は共同で、ゲージ 3 点結合の研究を進める。また現在のミュオン検出器を高精度化(公募 3)と次世代のミュオン検出器開発 (A03) を行っており、重複無く研究を進めている。
- ◎ 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。特に、シリコン半導体を使った次世代の超微細構造電磁カロリメータを開発する。シンチレータとシリコン PMT を用いた方法によるカロリメータ開発は、公募研究 4 が行う。

◎ 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。 研究項目 A、B、公募研究の成果を共有するため、毎月の総括班会議の他に、年に数回、大規模な研究会を総括班が主催して開催している。

毎回実験、理論から広く 100 名程度の研究者が参加して、夜遅くまで活発な議論を行っている(図中：緑の部分の大きな連携)。この研究会や議論は領域外の研究者も参加しており、本領域はエネルギーフロンティア研究の中核として、当該分野の発展に大きく寄与している。

2011 年 4 月 7 日 東京大学 (参加数 約 80 名)

2011 年 8 月 22 日 東京大学 (参加数 約 110 名)

2012 年 1 月 6,7 日 神戸大学 (参加数 120 名)

2012 年 7 月 11 日 東京大学 (参加数 137 名 下に写真を示す)

2012 年 9 月 18 日 東京大学 (参加数 102 名)

2013 年 5 月 23,24,25 日 名古屋大学 (参加者 128 名)



◎ 超弦理論研究は、top-down 型の研究を計画研究 B03 が行い、実験により近い研究を公募研究 5 のテラスケールでの超弦理論の検証で行う様にし、重複をなくしている。公募研究 5 は、計画研究 A02 と共同で、テラスケールでの弦理論研究を行い、ATLAS 実験での研究論文 (ATLAS search for new phenomena in dijet mass and angular distributions using pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV, JHEP 01 (2013) 029) として発表した。(図中緑部の縦の連携)

◎ 研究項目 B の各計画研究、公募研究は、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ノフが期待される。

3. 研究の進展状況 [設定目的に照らし、研究項目又は計画研究毎に整理する] (3 ページ程度)

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、現在どこまで研究が進展しているのか記述してください。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、どのように発展したかについて研究項目又は計画研究毎に記述してください。

(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。

現在の進行状況を対応つけて、まとめる。

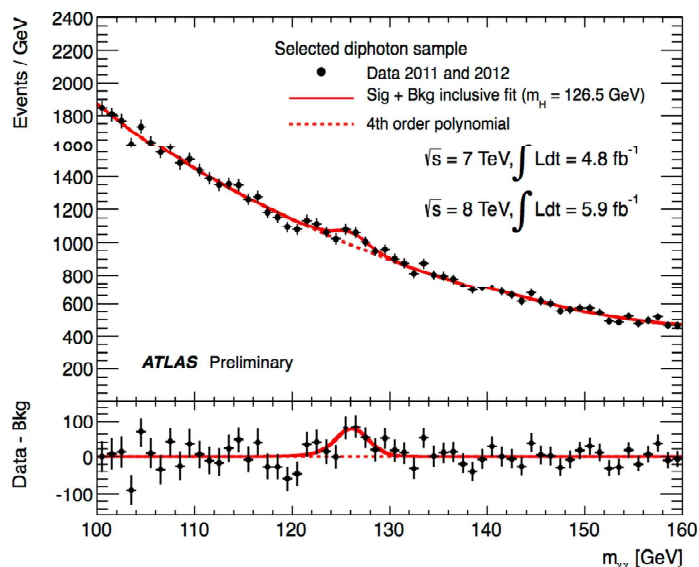
(1) ヒッグス粒子発見

◎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反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(2 σ 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。

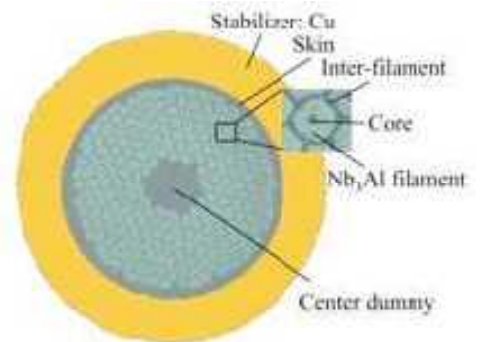
(3) ヒッグス粒子の発見は、真空が相転移しヒッグス場が凝縮した特殊な状態にあることの実験的な証拠

- ◎ 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発展している。
- ◎ 「質量起源の解明」と言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発展している。
- ◎ 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1 TeV 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 Nb₃Al 線材 (右上図：ラザフォード線断面図、右下写真：試作した Nb₃Al 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。

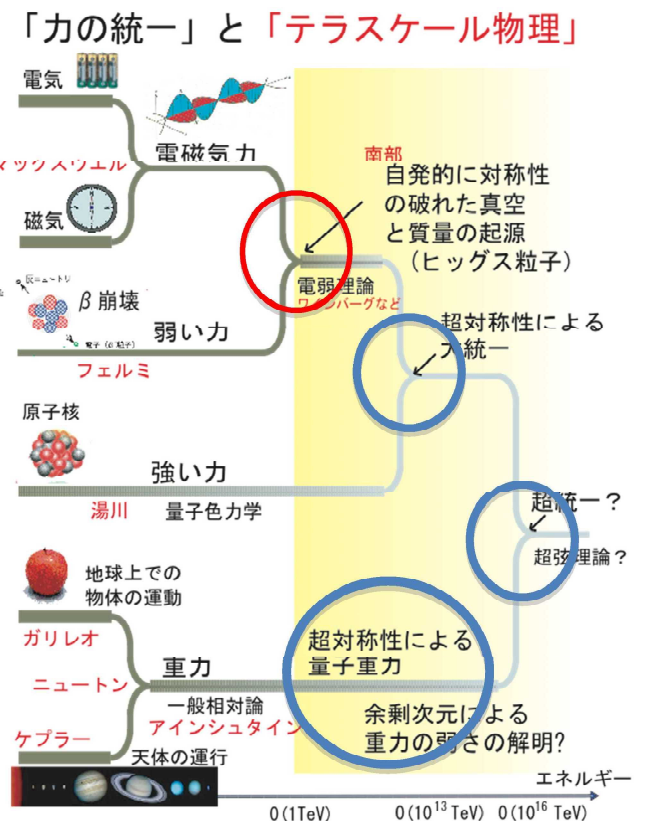
当初設定した目的：素粒子の歴史（右下図）で示すと、赤丸の部分が本研究成果である。

◎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。

まだ、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。



4. 若手研究者の育成に係る取組状況（1 ページ程度）

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。

人材育成は2つの観点で行い多くの若手研究者が育っている。

(1) 国際的に活躍する若手研究者の育成

実験が行われているCERNは、世界から最先端の研究者が集まっている。そのような環境の中で、現地に長期滞在し、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、国際的に活躍する若手研究者を育てることができる。

現地に滞在している若手研究者は、ヒッグス $H \rightarrow \gamma\gamma$ （田中純一）、 $H \rightarrow WW$ （増淵達也）、 $H \rightarrow \tau\tau$ （中村浩二、津野総司）、超対称性（金谷奈央子）の解析の責任者（コンビーナー）をつとめ、今回得られた成果で重要な役割を果たした。写真右は、2012年7月4日、「ヒッグス粒子と思われる新粒子発見」の発表後に、CERNで行われたパーティーの様子である。中央でシャンパンをあける栄誉を与えられたのは、本領域の若手研究者（中村浩二）である。このように本領域は、国際的に活躍する若手研究者を育成（注1）している。



これは、CERNに長期滞在し研究に専念すると同時に、本領域に属する多数の研究者が一丸となって組織的に研究を進めた成果である。

(2) 博士研究員の雇用や大学院生の長期派遣を通しての若手研究者の育成

本領域の展開するテラスケール物理は、最先端の研究であると同時に、領域として実験・理論が融合して研究を推進している。そのため、若手研究者には、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を行うことができる。

(2A) 本領域の計画研究で合計 14 名（現在雇用中も含む）の博士研究員を雇用し、領域の研究を推進すると同時に若手育成を行っている。これらの研究員の多くは、業績をあげて、パーマネントや学振 PD などの研究職を得ている。（注 2）

(2B) 博士研究員や、大学院院生は、研究を評価され賞を受けている。その例を示す。

佐々木(計画研究 A2 博士号取得見込) PLHC2012 Poster Awards

袁麗(計画研究 A3 2012- 研究員) FCPPL PhD Prize

奥村(計画研究 A4 2012 博士号取得) ATLAS Thesis Awards, 日本物理学会若手奨励賞

長井(計画研究 B1 2012- 研究員) 日本物理学会若手奨励賞

(2C) 本領域研究でこれまでに発表された博士論文数は、実験系 13、理論系 8 の合計 21 論文である

5. 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 ページ程度）

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。

主要な研究費は、以下の3つの項目である。

（1）次世代のエネルギーフロンティア実験にむけての基幹技術開発

ロジックアナライザー(研究計画 A3)、VME モジュールシステム(研究計画 A4)などは、他の研究計画の高速読み出し回路の製作に利用され、領域全体で有効に活用している。その他

A1:P型ピクセル半導体検出器の試作や、読み出し電子回路の製作費用

A2:超伝導線材や、プロトタイプ磁石の製作費用、

A3:マイクロメガス検出器試作、高速読み出し回路の製作費用、
放電や中性子破損箇所を調べるデジタルマイクロスコープ

A4:FTKの為に高速エレクトロニクス基板の製作費用、高速通信システム ATCAの器機購入

A6:Pixel半導体を用いた電磁カロリメータ試作

が主要な経費である。

（2）CERNでの研究に従事するための旅費

計画研究A01, 02, 03, 04で合わせて約30名のシニア研究者、若手研究者、並びに博士課程学生を、LHC実験が行われているCERNに長期滞在し研究を推進している。長期の人材派遣は、これは単にアトラス実験での研究推進にとどまらず、この分野における日本の主導権にも影響する大事な事柄である。若手の研究者を長期派遣し世界の研究者と切磋琢磨し、国際的に活躍する若手研究者の育成に大きく寄与したことは、すでに述べた。また、素粒子物理学の研究の最前線で日本の研究者がビジビリティを出すことの意義は計り知れず、当該分野のみならず、関連分野に大きな効果のあるものである。

（3）次世代の研究者を育てるためのPD雇用

計画研究 A03, 04, 05, 06 B01, 02, 03, 04 で合わせて9名の博士研究者が雇用されている。これらの研究は、実験と理論の融合するこの領域で多くの成果をあげている。（前ページ参照）

総括班の主要な活動成果を費用の大きなものをあげる。

（1）国際会議の開催

毎年、テラスケールの国際会議を行っている。

2012年11月には、伝統のある国際会議 HCP2012 (Hadron Collider Physics Symposium 2012) を京都で開催した。（写真次のページ）参加者 230名（海外から 190名 国内 40名）

この会議でヒッグス粒子の途中結果も発表され、新聞、テレビや科学雑誌などにも紹介された。

この会の主催は本総括班が行い、会議開催費用や一部の招聘した研究者の旅費を総括班が賄っている。

また「Higgs Coupling」と言うヒッグス粒子の新しい国際学会を本領域が提案し、2012年に第1回を東京で開催し、世界中からヒッグス粒子の最前線の研究者90名が参加した。大きな反響が

あり、この会議は、2013年はドイツ、2014年はイタリアで開催される重要な会議となった。

その他の国際会議 及びシンポジウムは8. 研究成果の公表状況にまとめる。



- (2) 国内のエネルギーフロンティア研究の核として、テラスケール研究会を開催し、領域全体の研究を推進（研究項目 A と B の融合）すると同時に、研究の成果を領域の外に発信している。P. 7 で既に述べたように、毎回多くの研究者が参加し議論を重ねている。この開催費用や一部の旅費補助を総括班が行っている。

(3) アウトリーチ

「ヒッグス粒子」は大きくメディアでも取り上げられ、一般の方の興味も非常に大きい。総括班が主体となって、多数のアウトリーチを行ってきた。毎回多数の参加者を得て盛会となっている。この開催費用は総括班が負担している。

毎年、東京大学の安田講堂で一般講演会を行い、500 名(2011 年), 1000 名(2012 年)の参加が得られている。

東京ばかりでなく、各計画研究が主体となって各大学の所在している都市でも、一般講演会や高校生・学部大学生にむけた理科教育などを行っている。

6. 総括班評価者による評価（2ページ程度）

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。

2名の実験研究者（飯嶋徹・名古屋大学教授、森俊則・東京大学教授）、及び1名の理論研究者（日笠健一・東北大学教授）を評価者に選定し、これまでテラスケール研究会などに参加して頂き、日頃から本領域研究全体及び各研究項目の進行状況に関して指導して頂いている。

中間評価作成にあたり、コメントを求めた。

評価委員1のコメント

1. ヒッグス粒子の確実な発見に大きな貢献をした。CERNのアトラス関係者から日本の研究者の大きな貢献の話を聞く。
2. ヒッグス粒子が「軽かった」ことのインパクトは大きい。
3. 超対称粒子など新物理が、これまで想定されていた軽い領域で見つからなかったインパクト。領域として、ちゃんとこの問題に対応している。
4. 2,3を踏まえて2015年から始まる13-14TeV実験への期待と、それに向けた準備の重要性であるが、旅費の不足が深刻そうである。
5. この領域の成果により素粒子物理研究の方向性が定まりつつあること、特にILCプロジェクトの重要性へつながり、これも見越した領域になっている。
6. HCP2012などの大きな国際会議の開催、頻繁に国内向けの研究会を開催し、国際的にも、国内的にも重要な役割を果たしている。

評価委員2のコメント

1. LHCでのアトラス実験での実験物理研究と、宇宙物理から超弦理論を含む幅広い理論研究と融合させてテラスケールの物理研究を進め、物理学の新しいパラダイムを切り開く、野心的な研究である。
2. これまでの成果でもっとも重要なのは、この研究の大きな目標であったヒッグス粒子の発見である。この粒子が標準理論通りのヒッグス粒子なのか、それとも他の要素を持ったものなのかは、これからの研究がますます重要である。
3. ヒッグスもさることながら、この研究を進めている研究者たちが、3000人規模の国際共同実験アトラスの中で、検出器の運転・改良とデータ解析において主導的な働きをしてきた点も重要である。
4. ヒッグス発見という点では計画研究A01の研究であるが、探索のバックグラウンドとなるほかの物理事象の理解や、測定精度の改善等で、他の計画研究の成果と大きく関係しており、領域全体がまとまって研究している。
5. 理論研究が中心となる研究項目Bの各研究計画も、この新発見された質量126GeVのヒッグス粒子の意味に関して多くの考察研究が始まっており、理論と実験の融合の成果ができつつある。
6. 超対称性粒子（SUSY）など標準理論を超える粒子の探索や、標準理論の精密検証も、広範囲で系統的に進んでいると判断する。ヒッグスの発見の影に隠れているようであるが、これらの探索で「新しいテラスケールの物理の兆候が見えない」という点も、実は極めて重要な成果である。これまでの探索

領域に存在しないということは、テラスケールの物理に関する今までの考え方に再考を促す結果であり、大きなインパクトとなっている。この事実と126GeVのヒッグス粒子の存在の両方をうまく説明する理論の枠組みの構築は、現在の素粒子物理学の重要課題になっており、この新領域研究はこの研究を進める良い母体となる。

7. 2015年から重心系のエネルギーを上げたLHC実験が始まるので、そちらでの新粒子発見にも期待が大きい。この領域研究をさらに活性化させて進めることが重要であると考え。そのための努力をさらに続けて欲しい。
8. ヒッグス発見は、新聞の一面で報道され、一般社会の大きな興味をかきたてた。本研究を進める研究者による、一般講演、入門書の執筆、各種学術記事、エッセイなども多数書かれ、研究活動のアウトリーチもよく進んでいる。総括班による国際会議の企画及び各計画研究による独自の国際・国内会議の企画等、研究者の交流の機会もバランスよく企画されている。若手研究者へ配慮したスクールの企画を行っていることも評価する。
9. 次世代へ向けての加速器・検出器開発も着実に進んでいる。開発のタイムスケールは個々の研究によって大きく異なり、研究期間中に導入が始まるものから、プロトタイプ確立を目指すもの、あるいは基礎開発研究にとどまるもの等多様であるが、目標に向けてはほぼ予定通りに進行していると考えられる。
10. 一つの難点は、公募研究のテーマがかなり雑多であり、中には本研究項目と関係が薄いものも見受けられる。研究自体はそれぞれ順調に進んでいると判断するが、今後の公募の選択ではよりコヒーレントな課題選択をするのがよいと思われる。公募趣旨の周知に力をいれる必要があると判断する。
11. 今後もLHCの実験データから多くの成果が得られる事は確実と考えられる。研究期間の後半においては、そのデータを基にして、当初目標として掲げたテラスケールでの新しいパラダイムの構築や、サイエンスとテクノロジーの双方での波及効果をより強く意識した研究推進に期待したい。
12. LHC実験は、素粒子分野の最重要研究課題であることはもちろん、他分野さらには一般社会からの注目度も高い。数千人の研究者が集結する国際共同実験において、本領域研究は、大学をはじめとする日本人グループが存在感を示し研究を主導的に進める基盤を与えるものとして重要である。その成功は、ビッグサイエンスにおける研究推進だけでなく、その中での人材育成や情報発信のあり方などを示す雛形ともなりうる。今後も、研究はもちろんのこと、若手研究者育成や情報発信の観点にもより留意して推進して欲しい。

評価委員3のコメント

1. LHCでは、126GeVの質量をもち標準模型のヒッグス粒子と実験誤差の範囲内で矛盾しない性質をもつ「ヒッグス粒子」が発見された。このヒッグス粒子が構造を持たない素粒子だとすると、スカラー場の凝縮した真空という新しい概念が確立していくこととなり、素粒子物理学は全く新しい時代を迎えることとなる。今後LHCはエネルギーを増大しての実験が予定されているが、ヒッグス粒子の性質のさらに詳細な研究と実験標準模型を超える物理の発見につながることに期待される。
2. ゲージ階層性の問題、暗黒物質をはじめとする宇宙の組成と進化の理解、ゲージ構造や世代構造の理解など素粒子物理学に関する重要な課題の解決には、素粒子の標準模型を超えるより基本的な物理原理が必要である。直接的な新物理に関する実験的な確証がない段階でのアプローチは限定的にならざるを得ないが、新たに見つかった126GeVのヒッグス粒子の諸性質を手掛かりに、このヒッグス粒子

の意味するところを理解し、より基本的な物理原理に迫っていくこと、その上で上記の諸課題の解決に向けた研究を目指すべきである。特に 126GeV の質量は、単純な超対称標準模型に再考を促すものであり、また実験で明らかになったヒッグス粒子の性質は、他の模型、例えばゲージヒッグス模型に修正を求めるものである。

3. 本領域の理論的研究は、このような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できる。B01 から B04 に亘る計画研究および公募研究において、互いに連携を取りながらヒッグス粒子の性質から超対称性や余剰次元に基づく基礎理論の在り方を検討し模型構築についての詳細な研究に立脚したうえで、宇宙、時空構造、世代構造そして弦理論とこれらの課題との関係などといった大きなテーマに挑んでいることは高く評価できる。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。

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

（3 ページ程度）

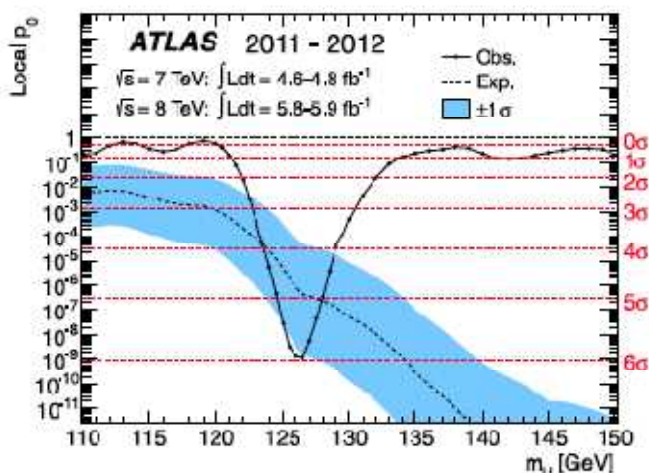
現在実施している新学術領域研究（公募研究含む）の研究課題を元に発表した研究成果（発明及び特許を含む）について、図表などを用いて研究項目毎に計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。

研究項目 A LHC・アトラス実験でのテラスケール物理の研究

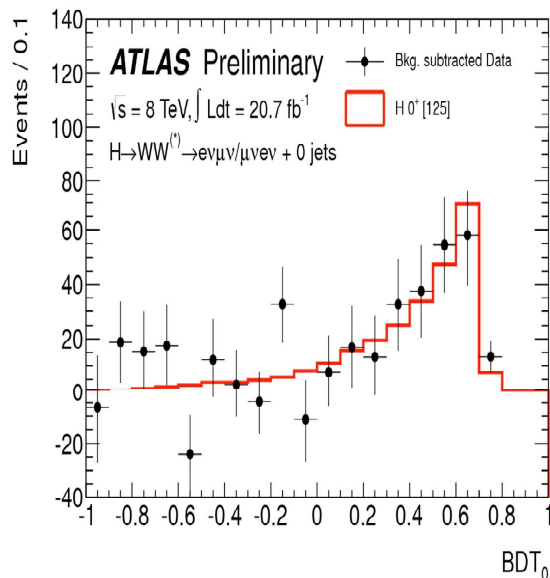
LHC 加速器の運転が順調に進んだ。陽子・陽子衝突の重心系エネルギーは 7TeV で実験を開始したが、2012 年には 8TeV に上げることができ、アトラス測定器の運転も順調に稼働し、2011, 12 の 2 年間で積算ルミノシティ 27fb^{-1} のデータが得られた。研究項目 A の計画研究 (A01-04) は互いに協力してアトラス検出器の較正やバックグラウンド研究などを共同で行った成果である。

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) ヒッグス発見 2012 年 7 月に、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：横軸は新粒子の質量、縦軸は観測された事象がバックグラウンドのふらつきである可能性）126GeV の観測されたピークは、バックグラウンドのふらつきの可能性が 10^{-9} であることを示している。その後収集したデータも合わせ、この粒子がヒッグス粒子に予想されるように 2 つのゲージ粒子（W, Z 粒子、光子）に崩壊することが確認でき、スピン・パリティも標準理論のヒッグスと同じ 0^+ であることをほ



ぼ検証できた。右下図は、ヒッグス→WW に崩壊し、W から放出されたレプトンの向きの情報を数値化したモノである。スピンが 0 の場合（図中赤のヒストグラム）二つのレプトンは同じ方向に出やすくなる。一方スピンが 2 など場合は反対の方向に出やすくなる。実験データはスピン 0 を示している。



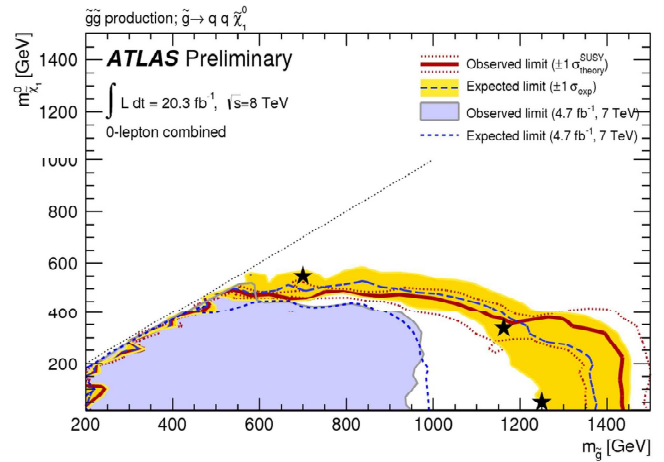
(2) 多量の中性子被爆をすると n 型シリコンが p 型に反転してしまう。放射線耐性を強くするため、従来の n 型でなく、p 型をバルクにしたセンサーの開発を行っている。バルクが p 型のピクセルで課題となるセンサーと読み出し ASIC とのあいだの放電の問題を、絶縁体の選択とセンサーの構造の最適化でほぼ解決でき、このタイプのピクセルセンサーが、高放射線下で使用できることをほぼ確立することができた。テストビームを使った詳細な試験により、ピクセルの構造による検出効率の劣化が若干見えることがわかったため、さらに改良を進めている。

研究計画 A02 超対称性の発見と大統一理論の実験的検証

(1) 超対称理論は様々なモデルがあり、パラメーターやモデルで様々な崩壊パターンが可能になる。特定のモデルに依存することないように、期待されるイベントトポロジーに分けて探索を組織的に行った。重心系エネルギー 8TeV までには、超対称性粒子などの標準理論を超える新しい兆候は残念ながら捕まえられないが、超対称性粒

子に対して厳しい制限が得られた。右下図にグルイーノの除外領域をしめす。横軸はグルイーノ、縦軸は一番軽いニュートラリーノ質量。赤い線の内側が実験で除外された領域である。一番軽いニュートラリーノが約 400GeV 以下の場合、およそ 1.4TeV より軽いグルイーノが排除された。

(2) 次世代の超伝導素材Nb₃Alケーブルを用いたサブスケール高磁場超伝導磁石の開発にむけて、RHQ-Nb₃Al超伝導線材のラザフォードケーブル化(p. 9)に成功した。また、LHC高輝度化アップグレードを目指して、ビーム分離用大口径双極超伝導磁石の開発を行っている。機械設計を行うと同時に、新しい放射線耐性の優れた絶縁体の開発を行っている。シアネートエステル、ビスマレイミドトリアジン、ビスマレイミドの3種類に絞って耐性などを調べた。



研究計画 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) ミュー粒子のトリガー検出効率の精密評価やb-tag(ボトム・クォークを含むジェットをタグする)の性能向上を行い、アトラス実験全体の研究に大きな貢献をした。また WW, ZZ, $\gamma\gamma$ 過程の精密測定を通して標準理論の検証を行った。これらの反応過程は標準模型の予言と良く一致しており、ズレは観測されていない。また、これらはヒッグス粒子探索のバックグラウンドとして極めて重要であり、ヒッグス粒子発見を確定するために、この反応の精密な測定は重要であった。

(2) LHC・アトラス実験で最も一般的に観測されるジェット事象の精密な測定を行い、陽子中のパートンの運動量分布(PDF)を精密に求めた。これらは、すべての反応過程の断面積を求める上で重要である。

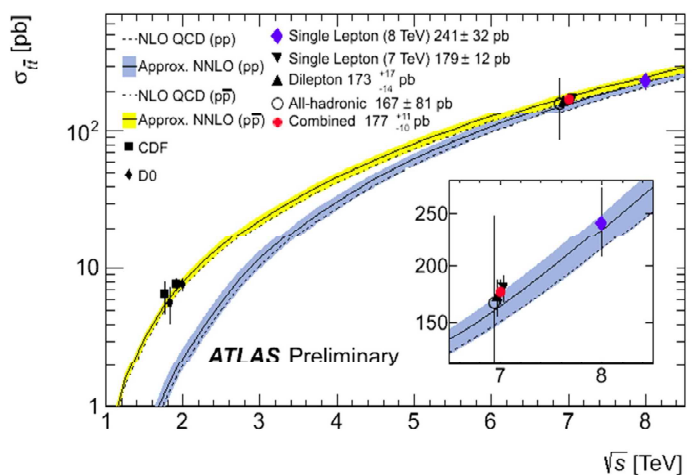
(3) 高い放射線耐性をもつミューオン検出器開発: 高抵抗電極を用いたマイクロメガス検出器が、従来のマイクロ・パターン・ガスチェンバーより3, 4桁高い中性子の放射線環境で作動することを確認(写真右: プロトタイプの実験テスト)し、これを組み込んだ新しいミューオン検出器の基本設計を行っている。この検出器は LHC の性能が向上する 2018 年に向けてアトラス検出器に導入される。



研究計画 A04 トップクォークを用いた新しい素粒子現象の探索

(1) トップクォークは、他の素粒子と比べて格段に重く、ヒッグス粒子の性質を探る別の手段としてユニークである。トップクォークの生成断面積を数%の精度で測定し(右図は断面積の重心エネルギー依存性)、偏極度などの精密測定を行った。測定精度の範囲内で標準理論の予言とよく一致している。

(2) LHC の衝突頻度が高くなっても、重要な事象を逃さずトリガーするために、トラック情報を用いる新しいトリガースystem (FTK) の開発を行っている。ATCA規格の高速通信を組み込んだ新しい回路の製作を行い、現在のデザインルミノシティに近い 7.7×



$10^{33}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ まで稼働するプロトタイプを製作した。

計画研究 A05 テラスケール物理の理論的研究

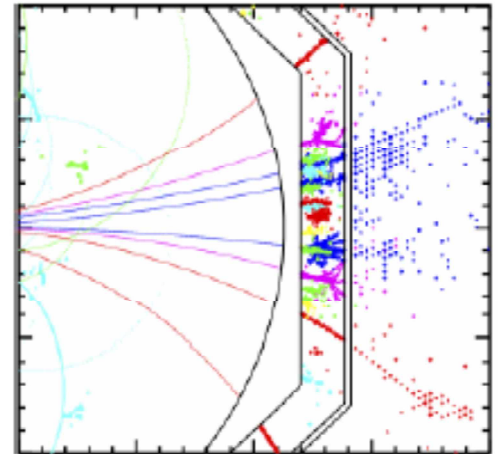
(1) ヒッグス粒子 126GeV と超対称性粒子に対する厳しい制限をうけて、階層性問題の観点から、超対称性を考え直した。(A) 最も軽い超対称粒子(LSP) ではないより一般の超対称粒子に対して LHC からの制限を検討した。(B) ベクトル的な第四世代がヒッグス粒子の質量から期待されるので、第四世代の崩壊からくるトップ、ヒッグスシグナルについて検討した (A04 と共同) (C) スカラートップ粒子に強い混合を考え、この混合をスカラートップ崩壊からくるトップの偏極から引き出す可能性について検討した。(A02 と共同)

(2) 余剰次元模型で期待されるラディオオンがヒッグスと混合した模型(A01と共同)について検討を行った。将来的に ILC (A06共同) などによってヒッグス粒子の相互作用が厳密にはかることができれば、余剰次元スケールに感度があることがわかった。

計画研究 A06 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

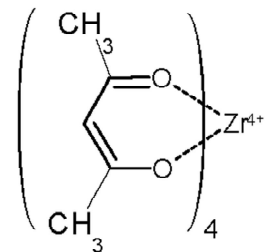
(1) LHC・アトラス実験で発見されたヒッグス粒子や、標準理論を超えるテラスケールの素粒子物理学を、LHC と国際リニアコライダー ILC で同時に推進するのが相補的に大きな効果が得られることを示した。LHC で発見された 126GeV のヒッグス粒子を大量に生成でき、トップクォーク起源のバックグラウンドが低い衝突エネルギー 250GeV において、ヒッグス粒子と他の素粒子の結合の詳細測定することで、標準理論を超える新物理の方向を定めることが出来ることが分かった。

(2) 測定器の開発に関しては、ILC や LHC アトラス検出器(A02 と共同で)の電磁カロリメータの開発研究を行い、ILC の性能を最大限に引き出す様、シリコン検出器を用いた電磁カロリメータ開発を行っている。右図にシミュレーション結果を示す。細かなセグメントが必要な様子が分かる。電磁カロリメータの基本的な動作の試験を行った。稠密なセグメント設計(公募研究 4 と共同で)やカロリメータ・コンポーネントの量産時にその性能評価を行うために系統的な測定を行うシステムを開発した。



公募研究 1: ジルコニウム 96 を用いた 2 重ベータ崩壊事探索

液体シンチレータに多量のジルコニウム(Zr)を溶かして2重崩壊を探る。(A) ジルコニウム β ケトエステル錯体 (右図: アセトイソプロピル酢酸ジルコニウム錯体とアセトエチル酢酸ジルコニウム錯体) の合成に成功し、アニソールに10w. t. %以上の溶解度があることを確認した。(B) ジルコニウムアセチルアセトン錯体の吸収ピーク275nmに比べて、ジルコニウム β ケトエステル錯体の吸収ピークは245nmと短波長側にシフトできた。これで再吸収を防ぐことが可能になると期待できる。



公募研究2: 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

2015年以降のLHC加速器は、バンチ間隔を50ナノ秒から25ナノ秒に変更して実験を行う予定であり、これに伴ってトリガー、エレクトロニクスの変更が急務である。計画研究A03と共同で、ミューオンに対する効率を現在と同等に保ちながら、不要に取り込んでいるバックグラウンドイベントを約30%削減するトリガーアルゴリズム

を開発した。また、2011, 12年の実験データを用いて再びWZ過程の断面積の算出を行い、過去最高精度でのゲージボソンの3点結合を測定した。

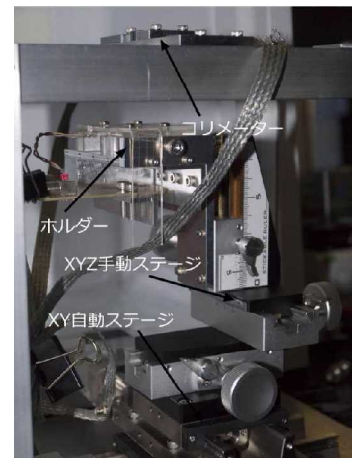
公募研究 3: 精密測定実験に基づくテラスケール素粒子模型の研究

(1) 電弱ゲージボソンの性質をLHC・LEPや低エネルギーでの精密測定結果まで含めて評価し、超対称粒子（スカラークォーク、スカラーレプトン）の寄与の許容パラメーター領域を評価した。一種類の超対称粒子のみが軽い質量領域に存在する場合、数百GeV程度のスカラークォークもしくはスカラーレプトンの存在は電弱精密データと矛盾しないことを示した。

(2) 湾曲した余剰次元を持つ模型では、グルーオンのカルーツァ・クライン励起状態（KKグルーオン）が第3世代クォークと強く相互作用する可能性がある。LHC実験でのKKグルーオン生成及びボトム・クォーク対への崩壊チャンネルによる検証可能性について調べた。

公募研究 4: LHC後に必須な超微細分割カロリメータ開発

計画研究A06のシリコンを使う高価な電磁カロリメータの対案として、プラスチックシンチレータストリップ(典型的には $45 \times 5 \times 2 \text{ mm}^3$) と PPD (ピクセル化光子検出器) で微細分割カロリメータの設計を行う。XYムービングステージを使い、0.1 mm 以下の精度で入射位置をコントロールする自動測定システム(光量2%, 位置の不確かさ0.3 mmの精度)を構築した。(写真右) 現在シンチレータの種類や形状, 反射材などの条件をかえてILCで必要とされる性能が出るような設計を行っている。



研究項目 B 拓かれたパラダイムを核に、宇宙物理、真空の構造、時空の解明、超弦理論へ展開

ヒッグス粒子の発見やその質量から様々な新しい知見が得られ、宇宙物理や、時空の概念などに新しい広がりが見え始めている。また、超対称性粒子などの厳しい制限とヒッグス粒子の質量から、標準理論を超えた新しい素粒子現象の方向に厳しい制限が加わり、これまでよりスッキリとした描像が得られている。

計画研究 B01 LHC時代の新しい初期宇宙像

- (1) ヒッグス粒子の質量126GeVを説明するため、シングレットを入れ、発生する問題点をPeccei-Quinn対称性を用いてこれらの問題を解決する模型を提唱した。
- (2) 超対称粒子の質量が重いケースを説明するアノマリー伝搬機構 (あるいは純重力伝搬機構) のヒッグス粒子の質量や宇宙論、暗黒物質への影響を調べ、十分可能性のあることを示した。その場合のLHCでの検出方法をA02と共同で開発した。
- (3) 重い超対称粒子スペクトルの場合の軽いヒッグシーノ暗黒物質の可能性を指摘し、 Boltzmann方程式からの定式化や具体的なnon-thermal production 機構を提唱した。

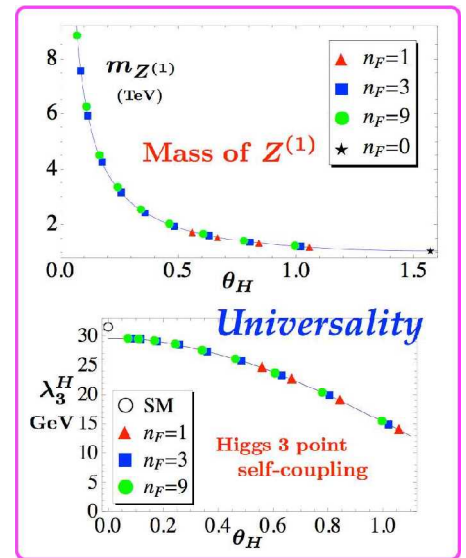
宇宙論と研究項目Aの成果をあわせてこれまでより、絞った宇宙像が得られてきた。

計画研究 B02 テラスケール物理がもたらす新しい時空像

従来の超対称性から時空を探る手法ではなく、ヒッグスから直接時空を探り、余剰次元の効果を研究する 研究計画である。

(1) 余剰次元が湾曲した (RS) モデルの中で、質量 126GeV の不安定なヒッグスボゾンが出現するゲージヒッグス統合モデルを構成した。右図に示すように、余剰次元のカルツァ・クライン (KK) 質量スケールやヒッグスボゾンの自己相互作用結合定数の間に、理論の詳細に依存しない普遍的な関係 (Universality) があることを発見し、安定的な理論が構築できる可能性がある。LHC のエネルギーが 14TeV に増強されたとき、右図上に示す Z' 粒子の発見が期待されることが分かった。

(2) 別の余剰次元模型として UED 理論 (普遍余剰次元理論) を考え、ヒッグスボゾン崩壊パターンや標準理論の精密測定への余剰次元粒子 (KK 粒子) の寄与を評価した。紫外切断スケール (カットオフ) は、今まで考えられてきたものより遥かに小さく、KK 質量スケールの 5 倍程度でなければならないことを示した。



計画研究 B03 テラスケールの物理から超弦理論への展開

(1) ゲージ理論と世代構造を統一的に超弦理論で説明することを目的にしている。この時、物質場のケーラーポテンシャルの重力による輻射補正の計算が必要になる。ケーラーポテンシャルを計算する表式で、内部空間全体に対する積分が、一部の局在化した積分で表せることが分かった。計算可能性への大きな前進である。

(2) 重力・ゲージ理論対応によって、ハドロン散乱の非摂動的な部分 (Underlying とよばれるソフトなハドロン・ハドロン衝突) の理解を、予言可能なゲージ理論から行う。超弦理論の性質を使って、この非摂動的な部分の理解が出来ることを示した。これは、研究項目 A での研究の基礎となる成果である。この成果を逆に発展させると、テラスケールでハドロンの非摂動的な領域の実験結果から、超弦理論の技術開発を行うことができ、弦理論の検証が一部可能になってくる。

これまで、実験と結びつくことが無かった超弦理論がテラスケール物理と関係を持ち始めている。

計画研究 B04 テラスケール物理における世代構造の研究

(1) LHC でのヒッグス粒子や超対称性の研究成果から、現在期待される大統一理論を構築し、陽子崩壊の寿命を評価した。この結果、LHC での直接探索と並んで、陽子崩壊を探る研究が重要であることが分かった。また超対称性導入に伴う、新たな CP 対称性の破れを評価し、レプトンフレーバーの破れ、電気双極子能率探索実験など、非加速器精密測定実験との評価を行った。現在の結果との矛盾はないが、近い将来の実験で、観測される可能性を指摘した。この様に LHC でのテラスケールの成果と、他の低エネルギー実験との成果を結びつけるものであり、領域の広がりを示めす成果である。

(2) 3 世代の構造を理解する上で、世代構造をもつ E6 ゲージ群が有望である。最近のニュートリノ振動の混合角やレプトン質量の階層性などを説明するものである。これを弦理論から導出し、これまで 1 つあった解をさらに二つ発見することが出来た。

公募研究 5 テラスケール弦模型の定式化と加速器実験での検証

テラスケール弦模型の LHC 実験に対する予言を計算機によるモンテカルロシミュレーションを行うことによって、LHC 実験で直接に探索可能な弦の張力のエネルギースケールの上限を求めた。これに関連して、LHC 実験の ATLAS 実験グループと共同で研究を進め、テラスケール弦模型が実現している場合の信号事象の生成を計算機によるモンテカルロ・シミュレーションによって行った。

8. 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 ページ程度）

現在実施している新学術領域研究（公募研究含む）の研究課題を元に発表した研究成果（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。論文の場合、計画研究・公募研究毎に順に記載し、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。また、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

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

The ATLAS collaboration, S. Asai, C. Fukunaga, K. Hanagaki, K. Hara, Y. Ikegami, M. Ishino, H. Iwasaki, O. Jinnouchi, N. Kanaya, K. Kawagoe, H. Kurashige, T. Masubuchi, K. Nagano, Y. Nagasaka, K. Nakamura, H. Sakamoto, O. Sasaki, M. Shimojima, R. Takashima, J. Tanaka, K. Tokushuku, M. Tomoto, S. Tsuno, F. Ukegawa, Y. Unno, S. Yamamoto, Y. Yamasaki, K. Yorita et al.

計画研究 A01 班 [ヒッグス粒子関係論文及び半導体検出器関係論文を記載]

- [1] “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. 1576-1582
- [2] “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
- [3] “Combined search for the Standard Model Higgs boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, Phys. Rev. D86 (2012) 032003
- [4] “Search for the Standard Model Higgs boson produced in association with a vector boson and decaying to a b-quark pair with the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, Phys. Lett. B 718 (2012) 369-390
- [5] “Search for the Standard Model Higgs boson in the H to tau+ tau- decay mode in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with ATLAS”, The ATLAS collaboration, JHEP09(2012)070
- [6] “Search for the Higgs boson in the H->WW->lnujj decay channel at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, Phys. Lett. B 718 (2012) 391-410
- [7] “Search for a Standard Model Higgs in the mass range 200-600 GeV in the channel H -> ZZ -> llqq with with the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, Phys.Lett. B 717 (2012) 70-88
- [8] “Search for the Standard Model Higgs boson in the H -> WW -> lvlv decay mode with 4.7 fb⁻¹ of ATLAS data at $\sqrt{s} = 7$ TeV”, The ATLAS collaboration, Phys. Lett. B 716 (2012) 62-81
- [9] “Search for a Standard Model Higgs boson in the H -> ZZ -> llnuunu decay channel using 4.7 fb⁻¹ of $\sqrt{s} = 7$ TeV data with the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, Phys. Lett. B 717 (2012) 29-48
- [10] “Search for the Standard Model Higgs boson in the diphoton decay channel with 4.9 fb⁻¹ of pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with ATLAS”, The ATLAS collaboration, Phys. Rev. Lett. 108, 111803 (2012)
- [11] “Search for the Standard Model Higgs boson in the decay channel H->ZZ(*)->4l with 4.8 fb⁻¹ of pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with ATLAS”, The ATLAS collaboration, Phys.Lett. B710 (2012) 383-402
- [12] “Combined search for the Standard Model Higgs boson using up to 4.9 fb⁻¹ of pp collision data at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector at the LHC”, The ATLAS collaboration, Phys.Lett. B710 (2012) 49-66
- [13] “TCAD simulations of silicon strip and pixel sensor optimization”, Y. Unno et al., Proceedings of Science, Vertex2011 (2011) 024.
- [14] “Development of n-in-p silicon planar pixel sensors and flip-chip modules for very high radiation environments”, Y. Unno et al., Nucl. Inst. Meth. A650 (2011) 129-135.
- [15] “Planar Pixel Sensors for the ATLAS Upgrade: Beam Tests results”, J. Weingarten et al., Journal of Instrumentation 7_P10028(2012)0-21.
- [16] “Design of Punch-Through Protection of Silicon Microstrip Detector against Accelerator Beam Splash”, K. Hara et al., Physics Procedia 37 (2012) 838-843.
- [17] “Development of novel n+in-p Silicon Planar Pixel Sensors for HL-LHC”, Y. Unno et al., Nucl. Instr. Meth. A699 (2013) 72-77.

計画研究 A02 班 [超対称性探索関係論文を記載]

- [1] “Multi-channel search for squarks and gluinos in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with the ATLAS detector at the LHC”, The ATLAS collaboration, Eur . Phys . J . C (2013) 73
- [2] “Search for a heavy narrow resonance decaying to e-mu, e-tau or mu-tau with the ATLAS detector in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions at the LHC”, The ATLAS collaboration, Phys. Lett. B 723 (2013) 15-32
- [3] “Searches for heavy long-lived sleptons and R-hadrons with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV”, The ATLAS collaboration, Phys. Lett. B 720 (2013) 277-308
- [4] “Search for supersymmetry in events with photons, bottom quarks, and missing transverse momentum in proton-proton collisions at a centre-of-mass energy of 7 TeV with the ATLAS detector”, The ATLAS

- collaboration, Phys. Lett. B 719 (2013) 261-279
- [5] “Search for pair-produced massive coloured scalars in four-jet final states with the ATLAS detector in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV”, The ATLAS collaboration, Eur. Phys. J. C (2013) 73: 2263
 - [6] “Search for Supersymmetry in Events with Large Missing Transverse Momentum, Jets, and at Least One Tau Lepton in 7 TeV Proton-Proton Collision Data with the ATLAS Detector”, The ATLAS collaboration, Eur. Phys. J. C (2012) 72: 2215
 - [7] “Search for light top squark pair production in final states with leptons and b-jets with the ATLAS detector in $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton collisions”, The ATLAS collaboration, Phys. Lett. B 720 (2013) 13-31
 - [8] “Search for Diphoton Events with Large Missing Transverse Momentum in 5 fb⁻¹ of 7 TeV Proton-Proton Collision Data with the ATLAS Detector”, The ATLAS collaboration, Phys. Lett. B 718 (2012) 411-430
 - [9] “Further search for supersymmetry at $\sqrt{s} = 7$ TeV in final states with jets, missing transverse momentum and isolated leptons with the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, Phys. Rev. D 86, 092002 (2012)
 - [10] “Search for light scalar top quark pair production in final states with two leptons with the ATLAS detector in $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton collisions”, The ATLAS collaboration, Eur. Phys. J. C (2012) 72: 2237
 - [11] “Search for direct production of charginos and neutralinos in events with three leptons and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, Phys. Lett. B 718 (2013) 841-859
 - [12] “Search for direct slepton and gaugino production in final states with two leptons and missing transverse momentum with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV”, The ATLAS collaboration, Phys. Lett. B 718 (2013) 879-901
 - [13] “Search for squarks and gluinos with the ATLAS detector in final states with jets and missing transverse momentum using 4.7 fb⁻¹ of $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton collision data”, The ATLAS collaboration, Phys. Rev. D 87, 012008 (2013)
 - [14] “Search for top and bottom squarks from gluino pair production in final states with missing transverse energy and at least three b-jets with the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, Eur. Phys. J. C (2012) 72:2174
 - [15] “Search for supersymmetry in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV in final states with missing transverse momentum and b-jets with the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, Phys. Rev. D 85, 112006 (2012)
 - [16] “Search for supersymmetry in final states with jets, missing transverse momentum and one isolated lepton in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions using 1 fb⁻¹ of ATLAS data”, The ATLAS collaboration, Phys.Rev. D85 (2012) 012006
 - [17] “Search for supersymmetry using final states with one lepton, jets, and missing transverse momentum with the ATLAS detector in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp”, The ATLAS collaboration, Phys.Rev.Lett. 106 (2011) 131802
- Exotic Phenomenon 関係論文は計画研究 A06 班に揭示

計画研究 A03 班[標準模型関係論文を記載]

- [1] “Measurement of ZZ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV and limits on anomalous ZZZ and ZZgamma couplings with the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, JHEP03(2013)128
- [2] “Measurement of WZ Production in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector”, The ATLAS collaboration, Eur. Phys. J. C (2012) 72:2173
- [3] “Underlying event characteristics and their dependence on jet size of charged-particle jet events in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, Phys. Rev. D 86 (2012) 072004
- [4] “ATLAS measurements of the properties of jets for boosted particle searches”, The ATLAS collaboration, Phys. Rev. D 86 (2012) 072006
- [5] “Measurement of W gamma and Z gamma production cross sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV and limits on anomalous triple gauge couplings with the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, Phys. Lett. B 717 (2012) 49-69
- [6] “Measurement of tau polarization in $W \rightarrow \tau \nu$ decays with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV”, The ATLAS collaboration, Eur.Phys.J. C72 (2012) 2062
- [7] “Measurement of the WW cross section in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions at ATLAS and limits on anomalous gauge couplings”, The ATLAS collaboration, Physics Letters B 712 (2012) 289-308
- [8] “Measurement of the production cross section of an isolated photon associated with jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, Phys. Rev. D 85, 092014 (2012)
- [9] “Measurement of the azimuthal ordering of charged hadrons with the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, Phys.Rev. D86 (2012) 052005
- [10] “Study of jets produced in association with a W boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, Phys. Rev. D85 (2012) 092002
- [11] “Measurement of the production cross section for Z/gamma* in association with jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector”, The ATLAS collaboration, Phys. Rev. D85 (2012) 032009
- [12] “Kshort and Lambda production in pp interactions at $\sqrt{s} = 0.9$ and 7 TeV measured with the ATLAS detector

- at the LHC”, The ATLAS collaboration, Phys.Rev. D85 (2012) 012001
- [13] “Measurement of the inclusive and dijet cross-sections of b-jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, Eur.Phys.J.C 71 (2011) 1846
 - [14] “Measurement of the inclusive W^{+-} and Z/γ cross sections in the electron and muon decay channels in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, Phys. Rev. D85 (2012) 072004
 - [15] “Measurement of the transverse momentum distribution of W bosons in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, Phys.Rev. D85 (2012) 012005
 - [16] “Measurement of the Inelastic Proton-Proton Cross-Section at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector”, The ATLAS collaboration, Nature Commun. 2 (2011) 463
 - [17] “Charged-particle multiplicities in pp interactions at $\sqrt{s} = 900$ GeV measured with the ATLAS detector at the LHC”, The ATLAS collaboration, Phys.Lett. B688 (2010) 21-42

計画研究 A04 班[トピックオーク関係論文及び飛跡トリガー関係論文を記載]

- [1] “Measurement of the $t\bar{t}$ production cross section in the tau+jets channel using the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, Eur. Phys. J. C, 73 3 (2013) 2328
- [2] “Search for top-jet resonances in the lepton+jets channel of $t\bar{t}$ + jets events with the ATLAS detector in 4.7 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV”, The ATLAS collaboration, Phys. Rev. D 86, 091103 (2012)
- [3] “Measurements of top quark pair relative differential cross-sections with ATLAS in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV”, The ATLAS collaboration, Eur. Phys. J. C (2013) 73: 2261
- [4] “Measurement of the t-channel single top-quark production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, Phys. Lett. B 717 (2012) 330-350
- [5] “Measurement of W boson polarization in top quark decays with the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, JHEP 1206 (2012) 088
- [6] “Measurement of the top quark pair cross section with ATLAS in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using final states with an electron or a muon and a hadronically decaying tau lepton”, The ATLAS collaboration, Phys. Lett. B 717 (2012) 89-108
- [7] “Search for $t\bar{b}$ resonances in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, Phys.Rev.Lett. 109 (2012) 081801
- [8] “Measurement of the Top Quark Mass with the Template Method in the $t\bar{t}\bar{b}$ \rightarrow lepton+jets Channel using ATLAS Data”, The ATLAS collaboration, Eur.Phys.J. C72 (2012) 2046
- [9] “Observation of spin correlation in $t\bar{t}\bar{b}$ events from pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, Phys. Rev. Lett. 108, 212001 (2012)
- [10] “Measurement of the charge asymmetry in top quark pair production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, Eur.Phys.J. C72 (2012) 2039
- [11] “Measurement of the top quark pair production cross-section with ATLAS in the single lepton channel”, The ATLAS collaboration, Phys.Lett. B711 (2012) 244-263
- [12] “Measurement of the top quark pair production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV in dilepton final states with ATLAS”, The ATLAS collaboration, Phys.Lett. B707 (2012) 459-477
- [13] “Measurement of Upsilon production in 7 TeV pp collisions at ATLAS”, The ATLAS collaboration, Phys. Rev. D 87, 052004 (2013)
- [14] “Measurement of the Λ_b lifetime and mass in the ATLAS experiment”, The ATLAS collaboration, Phys. Rev. D 87, 032002 (2013)
- [15] “K. Yorita, S. Amerio, et al. “ATLAS Fast track trigger”, Proceedings of Science VERTEX2011, 2011, 40
- [16] K. Yorita, J. Anderson, et al. “FTK: A fast track trigger at ATLAS, JINST 7(2011)C10002 doi:10.1088/1748-0221/7/10/C10002
- [17] K. Yorita, A Andreani, et al. “The Fast Traker real time processor and its impact on muon isolation, tau and b-jet online selections at ATLAS”, IEEE Trans. Nucl. Sci. 55 (2012) 348-357, doi:10.1109/TNS.2011.2179670

計画研究 A05 班

- [1] Improved discovery of a nearly degenerate model: MUED using MT2 at the LHC,” Hitoshi Murayama, Mihoko M. Nojiri, and Kohsaku Tobioka, Physical Review D84 (2011) 094015(1-11).
- [2] Testing Little Higgs Mechanism at Future Colliders,” Keisuke Harigaya, Shigeki Matsumoto, Mihoko M. Nojiri and Kohsaku Tobioka, Physical Review D86 (2011) 015005 (1-14).
- [3] Light Charged Higgs bosons at the LHC in 2HDMs,” Mayumi Aoki, Renato Guedes, Shinya Kanemura, Stefano Moretti, Rui Santos and Kei Yagyu, Physical Review D84 (2011)055028(1-16)
- [4] Decoupling property of the supersymmetric Higgs sector with four doublets,” Mayumi Aoki, Shinya Kanemura, Tetsuo Shindou, Kei Yagyu, Journal of High Energy Physics 2222(2012) 038(1-30).
- [5] Indirect bounds on heavy scalar masses of the two-Higgs-doublet model in light of recent Higgs boson searches”, Shinya Kanemura, Yasuhiro Okada, Hiroyuki Taniguchi, Koji Tsumura, Physics Letters B704

(2011) 303-307.

- [6] 野尻美保子, Reconstructing SUSY, Supersymmetry 2011, (招待講演) 2011年08月28日~2011年09月02日
フェルミ国立研究所(米国)
- [7] “Model Independent Analysis of Interactions between Dark Matter and Various Quarks”, Biplob Bhattacharjee, Debajyoti Choudhury, Keisuke Harigaya, Shigeki Matsumoto, Mihoko Nojiri, Journal of High Energy Physics 1304 (2013) 031(1-19).
- [8] “Top Polarization and Stop Mixing from Boosted Jet Substructure”, Biplob Bhattacharjee, Sourav K. Mandal, Mihoko Nojiri, Journal of High Energy Physics 1303 (2013) 105(1-19).
- [9] “Reconstruction of Higgs bosons in the di-tau channel via 3-prong decay”, Ben Gripaios, Keiko Nagao, Mihoko Nojiri, Kazuki Sakurai, Bryan Webber, Journal of High Energy Physics 1303 (2013) 106(1-17).
- [10] “Radion-Higgs mixing state at the LHC with the KK contributions to the production and decay”, Hirohisa Kubota, Mihoko Nojiri, Physical Review D 87 (2012) 076011(1-12).
- [11] “Radiative corrections to the Higgs boson couplings in the triplet model”, Mayumi Aoki, Shinya Kanemura, Mariko Kikuchi, Kei Yagyu, Physical Review D 87 (2013) 01512(1-39).
- [12] “Radiative type-I seesaw model with dark matter via U(1)B-L gauge symmetry breaking at future linear colliders”, Shinya Kanemura, Takehiro Nabeshima, Hiroaki Sugiyama, Physical Review D 87(2013) 015009(1-7).
- [13] “A light Higgs scenario based on the TeV-scale supersymmetric strong dynamics”, Shinya Kanemura, Tetsuo Shindou, Toshifumi Yamada, Physical Review D 86 (2012) 055023(1-11).
- [14] “Multi-tau-lepton signatures at the LHC in the two Higgs doublet model”, Shinya Kanemura, Koji Tsumura, Hiroshi Yokoya, Phys.Review D 85 (2012) 095001(1-21).

計画研究 A06 班[ILC 関係論文及び LHC での Exotic 関係論文を記載]

- [1] “GARLIC: Gamma Reconstruction at a Linear Collider experiment,” D, Jeans, J. C. Brient, N. Reinhard, JINST 7 (2012) P06003.
- [2] “Hadronic Energy Resolution of Highly Granular Scintillator-Steel Hadron Calorimeter Using Software Compensation Techniques,” C.Adloff et al., JINST 7 (2012) P09017.
- [3] “Search for extra dimensions in diphoton events using proton-proton collisions recorded at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector at the LHC”, The ATLAS collaboration, New J. Phys. 15 (2013) 043007
- [4] “Search for WH production with a light Higgs boson decaying to prompt electron-jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, New J. Phys. 15 (2013) 043009
- [5] “Search for long-lived, multi-charged particles in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, Phys. Lett. B 722 (2013) 305-323
- [6] “A Search for Prompt Lepton-Jets in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector”, The ATLAS collaboration, Phys. Lett. B 719 (2013) 299-317
- [7] “Search for new phenomena in events with three charged leptons at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, Phys. Rev. D 87, 052002 (2013)
- [8] “Search for contact interactions and large extra dimensions in dilepton events from pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, Phys. Rev. D 87, 015010 (2013)
- [9] “Search for doubly-charged Higgs bosons in like-sign dilepton final states at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, Eur.Phys.J. C 72 (2012) 2244
- [10] “Search for dark matter and large extra dimensions in events with a jet and missing transverse momentum with the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, JHEP04(2013)075
- [11] “ATLAS search for a heavy gauge boson decaying to a charged lepton and a neutrino in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV”, The ATLAS collaboration, Eur. Phys. J. C (2012) 72: 2241
- [12] “Search for magnetic monopoles in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, Phys. Rev. Lett 109, 261803 (2012)
- [13] “Search for resonant WZ production in the WZ to $l\nu l'$ channel in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, Phys.Rev. D 85 (2012) 112012
- [14] “Search for new particles decaying to ZZ using final states with leptons and jets with the ATLAS detector in $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton collisions”, The ATLAS collaboration, Physics Letters B 712 (2012) 331-350
- [15] “Search for pair-produced heavy quarks decaying to Wq in the two-lepton channel at ATLAS at $\sqrt{s} = 7$ TeV”, The ATLAS collaboration, Phys.Rev. D 86 (2012) 012007
- [16] “Search for anomalous production of prompt like-sign muon pairs and constraints on physics beyond the Standard Model with the ATLAS detector”, The ATLAS collaboration, Phys. Rev. D 85, 032004 (2012)
- [17] “Search for pair production of first or second generation leptoquarks in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector at the LHC”, The ATLAS collaboration, Phys.Rev. D 83 (2011) 112006
- [18] “Search for New Particles in Two-Jet Final States in 7 TeV Proton-Proton Collisions with the ATLAS Detector at the LHC”, The ATLAS collaboration, Phys.Rev.Lett. 105 (2010) 161801

計画研究 B01 班

- [1] “Higgs mixing and diphoton rate enhancement in NMSSM models,” K. Choi, S.H. Im, *K.S. Jeong, and M. Yamaguchi, JHEP 1302 (2013) 090
- [2] “Singlet-Doublet Higgs Mixing and its Implications on the Higgs Mass in the PQ-NMSSM,” *K. S. Jeong, Y. Shoji, and M. Yamaguchi, JHEP 1209 (2012) 007
- [3] “Light Higgsino in Heavy Gravitino Scenario with Successful Electroweak Symmetry Breaking,” *K. S. Jeong, M. Shimosuka, and M. Yamaguchi, JHEP 1209 (2012) 050
- [4] “Peccei-Quinn invariant extension of the NMSSM,” *K. S. Jeong, Y. Shoji, and M. Yamaguchi, JHEP 1204 (2012) 022
- [5] “Probing Supersymmetric Model with Heavy Sfermions Using Leptonic Flavor and CP Violations,” *T. Moroi, and M. Nagai, Phys. Lett. B723 (2013) 107-112
- [6] “Enhanced Higgs Mass in a Gaugino Mediation Model without the Polonyi Problem,” *T. Moroi, T.T. Yanagida, and N. Yokozaki, Phys. Lett. B719 (2013) 148-153
- [7] “Probing dark radiation with inflationary gravitational waves,” R. Jinno, *T. Moroi, and K. Nakayama, Phys. Rev. D86 (2012) 123502
- [8] “Thermal Effects on Saxion in Supersymmetric Model with Peccei-Quinn Symmetry,” *T. Moroi, and M. Takimoto (Tokyo U.), Phys. Lett. B718 (2012) 105-112
- [9] “Wino LSP detection in the light of recent Higgs searches at the LHC,” *T. Moroi, and K. Nakayama, Phys. Lett. B710 (2012) 159-163
- [10] “Extra Matters Decree the Relatively Heavy Higgs of Mass about 125 GeV in the Supersymmetric Model,” *T. Moroi, R. Sato, and T.T. Yanagida, Phys. Lett. B709 (2012) 218-221
- [11] “Imprints of Cosmic Phase Transition in Inflationary Gravitational Waves,” R. Jinno, *T. Moroi, and K. Nakayama, Phys. Lett. B713 (2012) 129-132
- [12] “Boltzmann equation for non-equilibrium particles and its application to non-thermal dark matter production,” K. Hamaguchi, *T. Moroi, and K. Mukaida, JHEP 1201 (2012) 083
- [13] “Exploring Supersymmetric Model with Very Light Gravitino at the LHC,” M. Asano, T. Ito, S. Matsumoto, and *T. Moroi, JHEP 1203 (2012) 011
- [14] “Focus Point Assisted by Right-Handed Neutrinos,” M. Asano, *T. Moroi, R. Sato, and T.T. Yanagida, Phys. Lett. B708 (2012) 107-111

計画研究 B02 班

- [1] “Novel universality and Higgs decay $H \rightarrow \dots$, gg in the $SO(5) \times U(1)$ gauge-Higgs unification”, S. Funatsu, H. Hatanaka, Y. Hosotani, Y. Orikasa, *T. Shimotani, Phys. Lett. B722 (2013) 94-99.
- [2] “SUSY breaking scales in the gauge-Higgs unification”, *H. Hatanaka, Y. Hosotani, Phys. Lett. B713 (2012) 481-484.
- [3] “Anomalous Higgs Interactions in Gauge-Higgs Unification”, K. Hasegawa, N. Kurahashi, *C.S. Lim, K. Tanabe, Phys. Rev. D87 (2013) 016011.
- [4] “Bare Higgs mass at Planck scale”, *Y. Hamada, H. Kawai, K. Oda, Phys. Rev. D 87 (2013) 053009.
- [5] “Minimal Dilaton Model”, *T. Abe, R. Kitano, Y. Konishi, K. Oda, J. Sato, S. Sugiyama, Phys. Rev. D86 (2012) 115016.
- [6] “Heavy Higgs at Tevatron and LHC in Universal Extra Dimension Models”, *K. Nishiwaki, K. Oda, N. Okuda, R. Watanabe, Phys. Rev. D85 (2012) 035026.
- [7] “A Bound on Universal Extra Dimension Models from up to 2fb^{-1} of LHC Data at 7TeV ”, *K. Nishiwaki, K. Oda, N. Okuda, R. Watanabe, Phys. Lett. B707 (2012) 506-511.

計画研究 B03 班

- [1] “Constraints on GUT 7-brane topology in F-theory”, H. Hayashi, T. Kawano, T. Watari, Phys. Lett. B708 (2012) 191-194
- [2] “A Note on Kahler Potential of Charged Matter in F-theory”, T. Kawano, Y. Tsuchiya, T. Watari, Phys. Lett. B709 (2012) 254-259
- [3] “Naïve Dimensional Analysis in Holography”, R. Nishio, T. Watari, T. Yanagida, K. Yonekura, Phys. Rev. D86 (2012) 016010
- [4] “Review of Particle Physics”, J. Beringer et.al. = 194 authors (incl. T. Watari), Phys. Rev. D86 (2012) 010001
- [5] “Brane Realization of Nambu Monopoles and Electroweak Strings”, M. Eto, K. Konishi, M. Nitta, Y. Ookouchi, Phys. Rev. D87 (2013) 045006
- [6] “Cosmological Constraints on Spontaneous R-symmetry Breaking Models”, Y. Hamada, K. Kamada, T. Kobayashi, Y. Ookouchi, JCAP 1304 (2013) 043
- [7] “Cosmic R-string, R-tube and Vacuum Instability”, M. Eto, Y. Hamada, K. Kamada, T. Kobayashi, K. Ohashi, Y. Ookouchi, JCAP 1304 (2013) 043

- [8] “Entanglement Entropy from a Holographic Viewpoint”, T. Takayanagi, Class. Quant. Grav. 29 (2012) 153001
- [9] “Holographic Geometry of Entanglement Renormalization in Quantum Field Theories”, M. Nozaki, S. Ryu, T. Takayanagi, JHEP 1210 (2012) 193
- [10] “Thermodynamical Property of Entanglement Entropy for Excited States”, J. Bhattacharya, M. Nozaki, T. Takayanagi, T. Ugajin, Phys. Rev. Lett. 110, 091602 (2013)

計画研究 B04 班

- [1] “QCD Corrections to Neutron Electric Dipole Moment from Dimension-six Four-Quark Operators,” J. Hisano, K. Tsumura, M.J.S. Yang, Phys.Lett. B713 (2012) 473-480
- [2] “Enhancement of Proton Decay Rates in Supersymmetric SU(5) Grand Unified Models,” J. Hisano, D. Kobayashi, N. Nagata, Phys.Lett. B716 (2012) 406-412
- [3] “Enhancement of Proton Decay Rates in Supersymmetric SU(5) Grand Unified Models,” J. Hisano, D. Kobayashi, N. Nagata, Phys. Lett. B716 (2012) 406-412
- [4] “Reevaluation of Neutron Electric Dipole Moment with QCD Sum Rules,” J. Hisano, J. Lee, N. Nagata, Y. Shimizu, Phys. Rev. D85 (2012) 114044
- [5] “Updating the neutron electric dipole moment in a fourth generation standard model,” J. Hisano, W.-S. Hou, F. Xu, Phys. Rev. D84 (2011) 093005
- [6] “Heterotic E6 GUTs and Partition Functions,” M. Ito, S. Kuwakino, N. Maekawa, S. Moriyama, K. Takahashi, K. Takei, S. Teraguchi, T. Yamashita, JHEP 1112 (2011) 100
- [7] “Baryogenesis by B-L generation due to superheavy particle decay,” S. Enomoto, N. Maekawa, Phys. Rev. D84 (2011) 096007
- [8] “Neutrino properties in E6 x SU(2)_F SUSY GUT with spontaneous CP violation,” N. Maekawa, K. Takayama, Phys. Rev. D85 (2012) 095015
- [9] “Decoupling property of the supersymmetric Higgs sector with four doublets,” M. Aoki, S. Kanemura, T. Shindou, K. Yagyu, JHEP 1111 (2011) 038
- [10] “First-order electroweak phase transition powered by additional F-term loop effects in an extended supersymmetric Higgs sector,” S. Kanemura, E. Senaha, T. Shindou, Phys. Lett. B706 (2011) 40-45
- [11] “A light Higgs scenario based on the TeV-scale supersymmetric strong dynamics,” S. Kanemura, T. Shindou, T. Yamada, Phys. Rev. D86 (2012) 055023
- [12] “Electroweak phase transition and Higgs boson couplings in the model based on supersymmetric strong dynamics,” S. Kanemura, E. Senaha, T. Shindou, T. Yamada, Phys. Lett. B706 (2011) 40-45
- [13] “The Flavor Structure of the Three-Site Higgsless Model,” T. Abe, R. S. Chivukula, E. H. Simmons, M. Tanabashi, Phys. Rev. D85 (2012) 035015
- [14] “New physics for muon anomalous magnetic moment and its electroweak precision analysis,” S. Kanemitsu, K. Tobe, Phys. Rev. D86 (2012) 095025

公募研究

- [1] “Development of InP solid state detector and liquid scintillator containing indium complexes for a measurement of pp/7Be solar neutrinos,” Y. Fukuda, Nuclear Physics B (Proc. Suppl.), 513 (2012) 229-232
- [2] “Development of Liquid Scintillator containing Zirconium Complex for Neutrinoless Double Beta Decay Experiment,” Y. Fukuda, Nucl. Instr. Meth. A (2013) to be published.
- [3] “Recent physics results from LHC experiments”, M. Ishino, Kyoto University GCOE Symposium , Development of emergent new fields, Feb.12, 2013
- [4] “LHC sensitivity to Kalzua-Klein gluon in two b-jets decay channel,” M. Arai, G.-C. Cho, K. Smolek and K. Yoneyama, Phys. Rev. D87 016010 (2013) [arXiv:1211.7006 [hep-ph]].
- [5] “Detectability of the second resonance of low-scale string models at the LHC,” M. Hashi and N. Kitazawa, JHEP 03 (2013) 127.
- [6] “Spontaneous Gauge Symmetry Breaking in a Non-Supersymmetric D-brane Model,” N. Kitazawa and S. Kobayashi, Physics Letters B720 (2013) 373-378.
- [7] “ATLAS search for new phenomena in dijet mass and angular distributions using pp collisions at sqrt(s)=7 TeV,” The ATLAS collaboration, JHEP 01 (2013) 029. (Kitazawa's contributions of generating signal event samples of string resonances are included.)

書籍

- [1] “ヒッグス粒子の見つけ方 質量の起源を追う”, 戸本 誠, 花垣 和則, 山崎 祐司, 丸善出版, 2012年 ISBN-10: 4621086170
- [2] “ヒッグス粒子の謎”, 浅井祥仁, 祥伝社新書, 2012年 ISBN 9784396112905

ホームページ

- [1] 新学術領域研究「テラスケール物理」ホームページ：<http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/terascale/>

主催シンポジウム

[国際シンポジウム]

- [1] “Hadron Collider Physics Symposium 2012 (HCP2012),” Nov. 12th~16th 2012, Kyoto University, 230 名参加 ホームページは <http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/hep2012/>
- [2] “Higgs Coupling 2012 (HC2012),” Nov. 18th~20th, 2012, The University of Tokyo, 90 名参加。ホームページは <http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/hc2012/>
- [3] “International Workshop: Extra Dimensions in the Era of the LHC”, 12-14 December 2011, Osaka University.
- [4] “International Workshop: Toward Extra Dimensions on the Lattice”, 13-15 March 2013, Osaka University.

[国内研究会]

- [1] 高エネルギー物理 春の学校（大学院学生向けのスクール、本研究を宣伝するとともに若手育成を目指す）2011年5月13-14日 <http://osksn2.hep.sci.osaka-u.ac.jp/spring2011/school/Welcome.html> 2012年5月17-19日 <http://ppwww.phys.sci.kobe-u.ac.jp/~yamazaki/events/spring2012/index.html>
- [2] 研究会「先端加速器LHCが切り拓くテラスケールの素粒子物理学」～ LHC・ATLAS実験の最新成果とテラスケール物理の夜明け～, 2012年1月6日～7日、神戸大学百年記念館六甲ホール
- [3] 新学術領域研究会～真空と時空への新たな挑戦～, 2013年5月23日～25日,名古屋大学野依記念学術交流館他

アウトリーチ活動

- [1] 一般公開講演会「ヒッグス粒子の謎」2012年3月31日東京大学安田講堂, 北野龍一郎, 浅井祥仁, 約500名が参加。
- [2] 一般公開講演会「ヒッグス粒子に迫る」2012年9月1日東京大学安田講堂, 北野龍一郎, 浅井祥仁, 約1,000名が参加。
- [3] 特別講演会「LHCにおけるヒッグス粒子探索-素粒子標準模型と質量の起源-」, 2012年7月13日(神戸大学理学部)7月4日の新粒子発見の記者会見をうけて、藏重が神戸大学の学生及び教職員に向けた講演会を行った。(出席者 約120名) <http://www.sci.kobe-u.ac.jp/news/2012/120706.htm>
- [4] 一般向け解説会 「LHC 実験にて新粒子(ヒッグス粒子?)発見」新粒子発見について一般講演会を行った <http://osksn2.hep.sci.osaka-u.ac.jp/atlas/outreach/summer2012/Welcome.html>, (講師 戸本、花垣、山崎、浜口幸一(東京大学))
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), 2012年8月26日(大阪大学中之島センター), 2012年9月22日(神戸大学 百年記念館), 2012年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/>, 新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)、それぞれ200~300名の参加者があった。
- [5] 一般向け解説会「ヒッグス粒子を探せ」 2012年3月17日(電気文化会館、名古屋)講師:戸本、花垣、山崎、司会:川越 http://www.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/LHC_Nagoya_2012/youkoso.html
- [6] 高校生対象の一般講演会「素粒子物理学の最前線」 早稲田大学 2012年5月21日 講師: 寄田
- [7] 未来エネルギーシンポジウム(先端加速器の開発と応用) 「ATLAS 実験の最新結果」 2012年7月2日 講師: 寄田, <http://www.nuclear.sci.waseda.ac.jp/files/2012sympo-program.pdf>
- [8] 一般向け解説会「LHC 実験にて新粒子(ヒッグス粒子?)発見」 2012年7月21日講師: 戸本、花垣、山崎、浜口幸一(東京大学)、司会: 小森真里奈(KEK), 新粒子発見に関する座談会を行った。会場で行われていることをニコニコ動画で中継した。 <http://osksn2.hep.sci.osaka-u.ac.jp/atlas/outreach/summer2012/Welcome.html>
- [9] 高校生対象の一般講演会「グローバル社会と最先端素粒子研究」筑波大学附属高等学校 2012年9月8、9日 講師: 寄田
- [10] 第26回 名大カフェ Science and Me「ヒッグス粒子を捕まえる。」2012年9月5日 講師:戸本
- [11] 高エネルギー加速器科学研究奨励会講演会 2012年10月5日 講師:戸本 <http://www.heas.jp/lecture/koen.html>
- [12] KEK 公開講座 2012「質量の起源に迫る」2012年12月15日 講師: 長野「ATLAS 実験: ヒッグス粒子らしき新粒子の発見とこれから」
- [13] 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

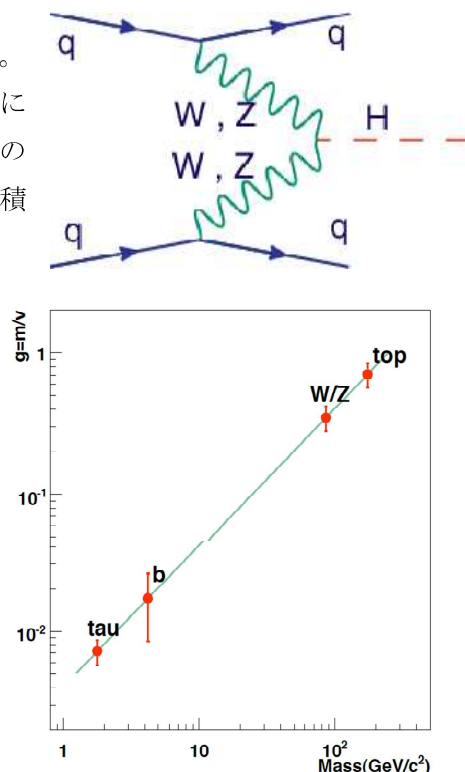
9. 今後の研究領域の推進方策（2 ページ程度）

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班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。

◎ 本領域の実験成果の一つ目であるヒッグスの詳細な研究を進める。

LHC の衝突エネルギーが 8 TeV から 14TeV に引き上げられる。これにより、ベクターボソンから直接ヒッグスが生成する過程(VBF: 右図)の断面積が飛躍的の大きくなる。(終状態 3 体なので、8 TeV では反応断面積が小さかった)

これにより、ヒッグスとフェルミ粒子 (b, τ) との結合の測定精度が高くなる。これにより、ゲージ粒子ばかりでなく、フェルミ粒子まで含めて質量の起源が解明される (右図)。これは、研究計画 A01 が主体に行うが、 τ の再構成には A02 の消失エネルギー測定や、A03 の b-tag, A04 のトップバックグラウンド研究など連携を密にして進める。



◎ 超対称性粒子などの標準理論を超えた新現象の確実な発見

LHC の衝突エネルギーが 8 TeV から 14TeV に引き上げられる。

これにより新物理の発見の可能性が大きくなる。研究項目 A で、直接・間接両方から確実に信号を捉えるようにする。8TeV までの経験と実績が大きく役に立つが、エネルギーが上がることで、トップクォークの生成断面積が飛躍的に増える、衝突頻度を高まるため、パイルアップが増えるなど環境も大きく変わっていく。ますます、各計画研究の協力が重要になる。

また、これまでの領域の成果として、ナイーブな超対称性ではなく複雑な機構を伴ったものであると思われる。これまで以上に、研究項目 A と B が連携して研究を進めていく。

2015 年の実験再開に合わせて速やかな発見を可能にするため、8TeV のデータを用いて準備研究を進めていく。

◎ エネルギーフロンティア素粒子研究や宇宙から、「真空」を掘り下げて研究を現在進めている。これらの方法とは別の実験手法で、「真空」や「時空」を探ることで、領域に更なる飛躍が期待出来る。例えば、昨今発展が著しい、レーザーなどの新しい光源を用いた実験、ブラックホール研究などを、積極的に公募研究として広げていきたい。前回の公募研究募集の反省点として、実験を行うには額が少ないので、実験の応募が少ない（基盤 C や若手と額が同じで重複申請が禁止されている）点がある。この新しい実験を推進するため、公募研究を

実験系 年間上限値 700万円 3件

理論系 年間上限値 200万円 3件

に変更する。(内定交付額は不変)

◎ 本領域は、エネルギーフロンティアの中核として当該分野の日本の中心として役割をこれまで果たしてきた。LHC の衝突エネルギーが増強され、これまで以上の成果が期待できるようになり、ますますその役割が期待される。これに応えるよう、研究会などを総括班が中心となって、連携を進めるとともに、領域外への発信を積極的に行う。

また、近隣分野や異分野への波及効果を大きくする為、それらの分野の研究交流を盛んにする。これまで本領域が単独で開催することがほとんどだった研究会を異分野や近隣分野の領域と共催しながら広げることを推進する。

◎ 次世代のエネルギーフロンティア実験の基幹技術の開発は、まずは LHC の高輝度化(2018 より徐々にアップグレードを行う)に対する準備、エネルギーを高くする為の基礎研究 (磁場強度を約 3 倍にする)、ILC のカロリメータデザインの決定の 3 つを当面の目的として開発を行い、それを領域として、スピンオフや、近隣分野への応用を進めていく。

◎ これまで「ヒッグス粒子と真空」で積極的にアウトリーチを行い、素粒子研究の国民の理解に大きく貢献してきた。これからは、「時空や超対称性粒子、暗黒物質」と本領域のもう一つの軸を中心に、アウトリーチを行う。

◎ 「超対称性粒子など標準理論を超える新しい新現象が発見されなかった場合」について

(1) テラスケールに新しい物理がない場合：これまでの枠組みに問題があることになり、それ自体が何かの新しい兆候である。領域全体としてこの兆候の意味をとらえ、研究を推進する。特にヒッグスの性質 (項目 A) と広がった理論的な研究 (項目 B) の両方が必要であり、本領域の重要な役割が期待される。

(2) 衝突頻度をあげることが、実質的な衝突エネルギーをあげることになる。LHC の高輝度実験が重要になり、研究項目 A でその準備を行っており、対応が可能である。

(3) 超対称性以外に時空を探る手段として本領域は、計画研究 B02 や B03 が準備されている。これらの研究を軸に、発見されたヒッグス粒子から時空を直接探る。

(4) ヒッグス粒子の精密な検証や、色をもたない電弱相互作用をする新粒子 (これは LHC での発見が難しくなる) の研究にむけて次世代実験(ILC)が重要な役割を果たすようになり、A06 がその中心となる。

(5) $O(1)$ TeV スケールになく、 $O(10)$ TeV スケールには新現象がないと、ヒッグス粒子の質量が説明できなくなる。それを探る次世代ハドロンコライダー実験の可能性 (A02 の超伝導技術) や、ヒッグス粒子の高いエネルギーでの振る舞いを精密に調べる (研究項目 A) ことでこれらを探ることができる。

この様に領域として、何が起こっても大丈夫な様に構成されている。