

令和元年6月3日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03657

研究課題名(和文) ウィークボソンの散乱振幅を精密測定する：新粒子・新物理のエネルギースケールの決定

研究課題名(英文) Determine the energy scale of the new physics in the Standard-Model with precision measurements of the Weak-Boson scatterings

研究代表者

石野 雅也 (ishino, masaya)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・教授

研究者番号：30334238

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：標準模型を超える新粒子、特にウィークボソン対に崩壊するスピン1、スピン2の新粒子探索をおこなった。現在までの実験データの中に新粒子は発見されなかった。しかしながら、探索領域を1 TeV以上拡張することに成功した。この解析をおこなう際の鍵となるウィークボソンが2つのジェットに崩壊する際の同定アルゴリズムに大きな改良を加えることができた。

新粒子の探索においてミュオン粒子トリガーは重要な役割を果たす。本研究で、従来のミュオン粒子トリガーに対してカロリメータ情報を融合するハードウェアを開発した。試運転に成功した後、2018年、実際のデータ取得に用いた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2012年のヒッグス粒子の発見により、電弱エネルギースケール(100 GeV)までの物理は完全に理解することができた。これは、素粒子の「標準模型」と呼ばれるものにまとめられている。しかしながら、相互作用の統一の正体が不明、暗黒物質の正体が不明、ヒッグスの質量階層性問題を説明できないなど、各種の問題が存在しており、それらを解明するのが現在の素粒子物理学の主題である。

新粒子を発見することにより、それらの問いに答えることが可能である。粒子の探索領域をテラスケール拡張する、そのための手段をソフトウェア、ハードウェアの両面で開発するという意義を本研究は持っている。

研究成果の概要(英文)：Searches for new particles decaying to a weak-boson pair, whose spin is one or two, were held. No new particle was found in the data, however the search region in mass is extended by 1 TeV due to this research. In the same time, developments of the identification algorithm of weak-bosons were held and the performance is improved.

In general, muon trigger plays important roles in new particle searches. A new muon trigger which use the information of hadron calorimeter was developed. After completing the commissioning of the new trigger system, real data was taken with using the new trigger in 2018. The performance of the muon trigger is improved.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：ミュオン粒子トリガー カロリメータ 新粒子探索 ウィークボソン 大半径ジェット

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

2012年夏、CERN研究所のLHC加速器を使って新しいスカラー粒子を発見した。それに引き続いて新粒子の性質を実験的に決定することにより、これが「ヒッグス粒子」であることが明らかになった。この発見によって「素粒子物理学の標準模型」は完成し、人類は100GeVまでの電弱スケールにおける物理を完全に理解した。

その一方で、標準模型は100GeVのエネルギースケールまでの物理を記述する「有効理論」でしかなく、次に挙げるいくつかの本質的な問題を抱えている：

- 4つの相互作用がより高いエネルギースケールで統一される際、その相互作用が持つゲージ対称性の形は何であるか？
- ヒッグス粒子の質量が100GeV程度であるという現実が持つ不自然さ（ヒッグス質量の階層性問題）の背後にあるメカニズムは何か？
- 存在するとわかってはいるがその正体が不明である暗黒物質の正体は何か？

これらの問いに対して有効な情報を得ることがヒッグス粒子発見後の素粒子物理学における次の重要な課題になった。これらが本研究の学問的な背景である。

### 2. 研究の目的

素粒子物理学における大目標が、電弱エネルギースケールまでの素粒子物理学の理解からそれを越えた新しい物理法則の発見へと学問の焦点が移行していく中で、本研究では次の知見を得ることを目標にした。

- 「ウィークボソン散乱」を通じて新粒子を直接的に探索し、1TeVまでに新粒子が存在するか否かを実験的に明らかにする。
- ウィークボソン散乱断面積の上限値をLHC実験Run-2データを使って明らかにする。もしそこに異常が見られれば、異常をもたらすメカニズムは不明であるにせよ、それが標準模型を超える新物理によるものと考えるのは妥当であり、その機構を解明するために必要な次世代加速器の仕様について重要なインプットを与える。
- ウィークボソン対を終状態に持った物理過程の探索・精密測定において重要な役割を果たすレプトントリガー（ミュオン粒子トリガー）の性能を向上させる。特に、カロリメータとミュオン粒子検出器の情報を融合させた、新しいタイプのミュオン粒子トリガーをデザインし、LHC実験Run-2の実データ収集に応用する。

### 3. 研究の方法

CERN研究所のLHC加速器を使って重心系エネルギー13TeVで陽子同士を衝突させ、本研究期間中に $100\text{fb}^{-1}$ 以上のデータを収集する。ウィークボソン対に崩壊する物理過程に着目して、新粒子の探索をおこなう。

LHC加速器が2015年に陽子衝突エネルギーを8TeVから13TeVにあげたことと、蓄積するデータ量がLHC Run-1実験時に比べて4, 5倍に増えることで、より生成頻度が低く

大きな質量（1TeVを超える）を持つ新粒子が探索範囲に入ってきた。この時ウィークボソン対に崩壊する際のQ値が大きくなり、ボソンは強くブーストされ、結果としてその崩壊して生成された2つのクォークジェットも強くブーストされて近接する傾向を持つ。結果として、1つの大きな半径をもったジェットとして検出されるが、その中に2つの小さな半径を持ったクォークジェットの核が認識できるという新しいタイプの終状態が出現することになった。このような特徴を持ったジェットをウィークボソン由来のものであると同定することは初の試みであり、かつ、このボソン同定のステップは物理解析の全体の流れの中で最重要ステップのひとつである。このアルゴリズムの性能は新粒子探索の到達点の伸びを大きく左右するため、このアルゴリズムの開発と最適化をおこない、最高の性能を引き出す様にする。

ウィークボソンの崩壊モードには、レプトンを含んだものも存在する。このようなイベントを確実にトリガーして記録するため、またLHC加速器の高輝度化にそなえるため、ミュオン粒子トリガーの性能を向上させる。具体的には、ミュオン粒子測定器の情報を使った従来型のトリガーに加えてカロリメータ情報を融合し、両者が共にミュオン粒子由来の信号を捉えたことをトリガー判定アルゴリズムに要求する。通常のジェットは奥行き方向に3層に区切られたカロリメータの2層目までで止まり、ミュオン粒子だけが3層目を通過する。ミュオン粒子が3層目を通過した時に残すと想定される大きさの信号を捉え、その後方にミュオン粒子トリガーの信号が同時にあらわれたならば、それらの信号は高いエネルギーを持ったミュオン粒子が残したと判断することが可能である。この論理を実現させるハードウェアを設計、製作し、実際のデータ取得をおこなう。

#### 4. 研究成果

- 1) 本研究の開始時にすでに取得済みであった、重心系エネルギー 8 TeV での陽子衝突データを用いて WW, WZ, ZZ に崩壊する新粒子の探索をおこなった。新粒子のスピンの場合、2 の場合、それぞれに最適化した解析をおこなった。スピン 1 の新粒子 ( $W'$ ) については 1.81 TeV の質量下限、スピン 2 の新粒子については 810 GeV の質量下限を設定し、その様な新粒子が存在するならば、それらの下限値よりも高い質量を持つことを明らかにした。(論文4) 7) 8) )
- 2) 本研究の期間中に、LHC 加速器の陽子衝突エネルギーが 13 TeV に上昇し、より高い質量をもった新粒子探索を探索出来るようになった。最初の  $3.2\text{fb}^{-1}$  のデータを使ってウィークボソン対 (WW, WZ, ZZ) に崩壊する新粒子探索をおこなった。新粒子のスピンの場合、2 の場合、それぞれに最適化した解析の結果、2.6 TeV 以下の質量領域には新粒子が存在しないことを明らかにした。また、新粒子のスピンの場合、2 の場合、それぞれに最適化した解析結果については、1.1 TeV 以下の質量領域に新粒子が存在しないことを明らかにした。加速器をアップグレードしたことにより、少ないデータ量であっても探索可能な質量領域を拡張することができた(論文1) 5) )
- 3) 先の成果に引き続き、データ量を  $36\text{fb}^{-1}$  まで増やして新粒子探索をおこなった結果を公表した。探索した新粒子がウィークボソン対 ZZ, WW, WZ に崩壊するモードに関して探索をした。新粒子の持つスピンの場合、2 の場合、それぞれに最適化した探索では、2.9 TeV 以下の質量領域に新粒子が存在しないことを明らかにした。新粒子のスピンの場合、2 の場合、それぞれに最適化した探索では、1.3 TeV 以下の質量領域に新粒子が存在しないことを示した。(論文2) )
- 4) 上記8) の結果を出すにあたり、新粒子探索の質量領域が高くなってきたことを受けて、ボソンの同定方法の改良をおこなった。項目 3 の研究方法に述べた通り、ウィークボソンが 2 つのジェットに崩壊した時に、1 つの大きな半径をもったジェットとしてあらわれる傾向に対応するため、その特徴を表すいくつかの新しい変数を開発して、大きな半径を持ったジェットの親粒子のウィークボソンらしさを定量化し、判断材料として用いる方法を開発した。(論文 2) )
- 5) カロリメーター情報を融合したミュー粒子トリガーの開発に成功し、実際のデータ取得をおこなった。通常ジェットエネルギーを測定するためにハドロンカロリメーターはもちいられるが、その最終段(奥行方向 3 段目)の情報を 40MHz でサンプリングしてエネルギーを 25 ナノ秒ごとに算出し、従来のミュー粒子トリガーボードに送る電子回路を開発した。また、その結果と従来のミュー粒子トリガーとの間でコインシデンスをとるために、ファームウェアを開発した。2017 年までに、それらの新システムのコミッシュニングをおこない、2018 年に実際の LHC での陽子衝突データの取得で新しいトリガーを利用した。ミュー粒子に対する効率の減少を 1% 程度に保ったまま、その領域にとびこんでくる不要なトリガー数を 80% 以上削減することに成功した。ミュー粒子トリガーのしきい値を 20 GeV に保つことに成功し、加速器の輝度が上昇しても取得データの物理アクセプタンスを広く保つことに大いに貢献した。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件) すべて査読あり

- 1) M. Ishino, T. Sumida et al. The ATLAS Collaboration, Search for WW / WZ resonance production in  $l\nu qq$  final states in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector, Journal of High Energy Physics (2018) 2018:42, 1-44 [https://doi.org/10.1007/JHEP03\(2018\)042](https://doi.org/10.1007/JHEP03(2018)042)
- 2) M. Ishino, T. Sumida et al. The ATLAS Collaboration, Searches for heavy ZZ and ZW resonances in the  $llqq$  and  $\nu\nu qq$  final states in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector, Journal of High Energy Physics (2018) 2018:009, 1-52, [https://doi.org/10.1007/JHEP03\(2018\)009](https://doi.org/10.1007/JHEP03(2018)009)
- 3) M. Ishino, T. Sumida et al. The ATLAS Collaboration, Search for heavy resonances decaying to a W or Z boson and a Higgs boson in the  $qqbb$  final state in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector, Physics Letters B (2017) 774 494-515, <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2017.09.066>
- 4) M. Ishino, T. Sumida et al. The ATLAS Collaboration, Search for triboson WWW production in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector, The European Physical Journal C 77 (2017) 141 1-28

- 5) M. Ishino, T. Sumida et al. The ATLAS Collaboration, Search for anomalous electroweak production of WW/WZ in association with a high-mass dijet system in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector, Physical Review D 95 32001 1-25 (2017), <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-017-4692-1>
- 6) M. Ishino, T. Sumida et al. The ATLAS Collaboration, Measurement of the ZZ production cross section at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector, Physical Review Letters, 116 (2016) 1-19, 10.1103/PhysRevLett.116.101801
- 7) M. Ishino, T. Sumida et al. The ATLAS Collaboration, Combination of searches for WW, WZ, and ZZ resonances in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector, Physics Letters B, 755 (2016) 285-305, <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2016.02.015>
- 8) M. Ishino, T. Sumida et al. The ATLAS Collaboration, Measurements of WZ production cross sections in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector and limits of anomalous gauge boson self-couplings, Physical Review D, 93 (2016) 92004 1-36, 10.1103/PhysRevD.93.092004

[学会発表] (計 8 件)

- 1) 救仁郷 拓人、LHC-ATLAS実験Run2における大半径ジェット較正手法の改善と弱ボソン共鳴探索への適用、日本物理学会（秋季大会）2017年9月12日、宇都宮大学
- 2) 石野 雅也、ATLAS detector performance in Run2 and upgrade plans, High-Energy Physics International Conference in QCD (Invited Talk), 2017年7月3日、フランス・Montpellier
- 3) 石野 雅也、ATLAS Muon and Calorimeter Trigger Primitives, High Luminosity LHC Experiments Workshop 2016 (Invited Talk), 2016年10月3日、フランス・Aix-Les-Bains
- 4) 隅田 士詞、Neutrinos at LHC, LHC Days 2016 (Invited Talk), 2016年9月19日、クロアチア・Split
- 5) 救仁郷拓人、Jet performance in Run2 at ATLAS, BOOST 2016 (Invited Talk), 2016年7月18日、スイス・Zurich
- 6) 石野 雅也、ATLAS Trigger and Data Acquisition Upgrades for High Luminosity LHC, International Conference on New Frontiers in Physics (Invited Talk), 2016年7月6日、ギリシャ・Kolympari
- 7) 田代 拓也、Search for  $t$   $t$ -bar resonances and vector-like quarks with the ATLAS detector, PHENO 2016 (Invited Talk), 2016年5月9日、アメリカ・Pittsburgh
- 8) 石野 雅也、LHC 13 TeV実験はじまる ~実験全体像~ 日本物理学会（招待講演）、2015年9月26日、大阪市立大学

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

名称：  
 発明者：  
 権利者：  
 種類：  
 番号：  
 出願年：  
 国内外の別：

○取得状況 (計 件)

名称：  
 発明者：  
 権利者：  
 種類：  
 番号：  
 取得年：  
 国内外の別：

[その他]  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：隅田 土詞

ローマ字氏名：Sumida Toshi

所属研究機関名：京都大学

部局名：理学研究科

職名：助教

研究者番号（8桁）：80624543

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：田代 拓也

ローマ字氏名：Tashiro Takuya

研究協力者氏名：救仁郷 拓人

ローマ字氏名：Kunigo Takuto

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。