


ヒッグス粒子稀反応の測定から探る標準模型を超える物理

| | | |
|--|--------|--|
|  | 研究代表者 | 高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授 戸本 誠 (ともと まこと) 研究者番号:80432235 |
| | 研究課題情報 | 課題番号: 22H04944 研究期間: 2022年度~2026年度 キーワード: ヒッグス粒子、ヒッグスポテンシャル、質量の起源、世代構造の起源 |

なぜこの研究を行おうと思ったのか (研究の背景・目的)

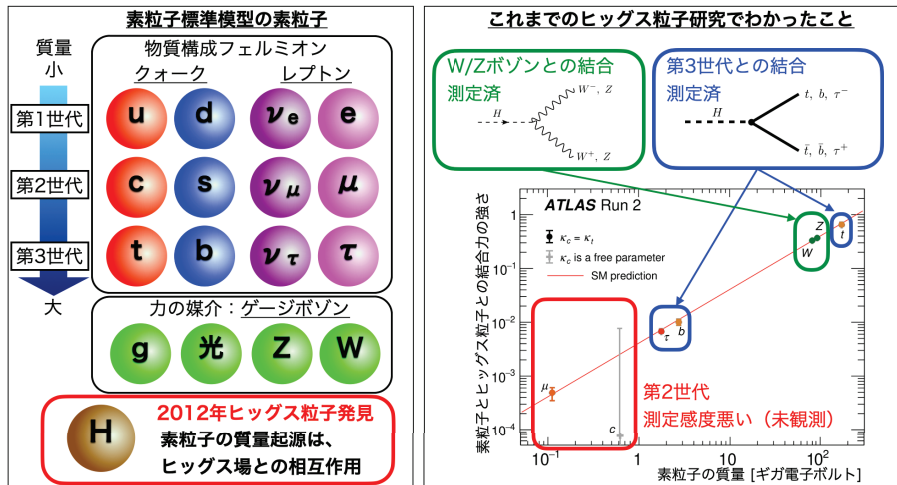
● 研究の全体像

2012年に、スイス ジュネーブ近郊のCERNにある陽子陽子衝突型加速器LHCを用いた実験でヒッグス粒子が発見され、宇宙の真空は無ではなくヒッグス場で満たされ、宇宙が冷える過程で相転移によってヒッグス場の性質が変わり、有限なヒッグス場との相互作用によって素粒子は質量を獲得したことが明らかになった。

これまで10年間のLHC実験によるヒッグス研究によって、WボゾンとZボゾン、第3世代の荷電素粒子であるトップ(t)クォーク、ボトム(b)クォーク、タウ(τ)粒子の質量とヒッグス粒子との結合力の強さに相関関係があることが明らかになり、これらの素粒子の質量の起源がヒッグス場との相互作用によることが明らかになった。

一方で、ヒッグス場を導入すれば素粒子の質量起源を説明できることがわかっただけで、宇宙に満たされたヒッグス場に関してはなんら指導原理はなく、ヒッグス場により形成されるヒッグスポテンシャルの形が標準模型の仮定通りかどうかは定かではない。さらには、第3世代のtクォークとそれぞれ6桁、3桁の質量差がある第1世代の電子、第2世代の μ 粒子の質量の起源も同じヒッグス場によるものかは自明でない (世代構造の起源)。

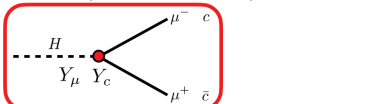
LHC実験で生成される多量のヒッグス粒子から、これまで未観測の2種類の稀反応を精査することでこれらのヒッグス場の謎に挑み、ヒッグス粒子の精密測定のためにある新物理を探るの目的である。



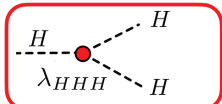
本研究の目的: 未観測の2種類のヒッグス粒子稀反応を測定して標準模型を超える物理を探る

(i) 第2世代素粒子(μ 粒子、cクォーク)との結合過程

(ii) ヒッグス粒子の自己結合過程



→ 第2世代の質量、世代構造の起源



→ ヒッグスポテンシャルの形の測定

図1: 本研究の学術的背景と目的の全体像。素粒子標準模型(左上)、これまでのヒッグス粒子研究で明らかになったこと(右上)、本研究において新しく測定したいヒッグス粒子稀反応(下)とそこから明らかにしようとする事柄。

● 研究拠点: LHC/ATLAS実験

本研究目的を達成できるのは、多量のヒッグス粒子を生成することができるLHC実験だけである。私たちは、LHCの陽子陽子衝突点のひとつに設置されたATLAS検出器を用いた実験において、検出器の建設・運転から物理解析まで活躍してきた。約2京回の陽子陽子衝突の中から生成した約1千万のヒッグス粒子事象を解析し、ヒッグス粒子とW/Zボゾン、第3世代フェルミオンとの結合を測定した。2022年夏から第3期実験 (Run 3) が始まり、2025年末までに、これまでの約2倍のヒッグス粒子事象の生成が見込まれている。本研究では、これまで稼働してきた検出器の効率的な運用とRun 3から新規導入される検出器の既存システムへの統合を進め、多量のヒッグス粒子事象の精査から、ヒッグス粒子の μ 粒子対の発見、cクォーク対崩壊事象の探索、ヒッグス粒子対生成事象の探索に挑戦する。

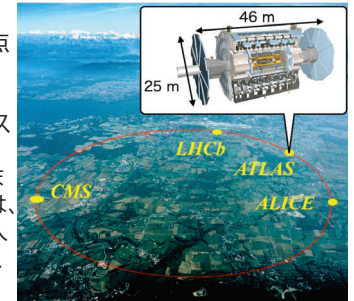


図2 LHC加速器とATLAS検出器

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

本研究目的は、LHC/ATLAS実験がRun 3で取得する全データを用いて、**研究1: ヒッグス粒子の μ 粒子対崩壊とcクォーク対崩壊の観測による第2世代素粒子との結合の測定**と、**研究2: ヒッグス粒子自己結合の測定に向けたヒッグス粒子対生成の観測**を行う。LHC実験では、40 MHzの頻度で2つの陽子陽子衝突反応が発生する(パイルアップ事象)。一方、ヒッグス粒子の生成頻度は1 Hzに満たない上に、この貴重な事象は多量のパイルアップ事象に埋もれる。そこで、1 Hzに満たないヒッグス粒子生成に関係する信号事象のデータは高効率で収集しつつ、40 MHzの陽子衝突頻度を4桁落とすトリガー・データ読み出しシステムと、パイルアップ事象に埋もれたヒッグス粒子反応に起因する荷電粒子を確実に捉えるシリコン内部飛跡検出器の運転を追求する。具体的には、

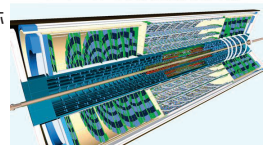
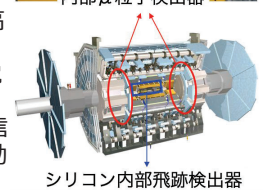
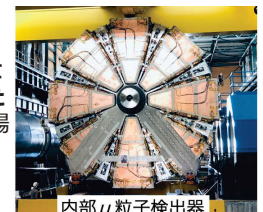


図3 本研究の物理研究を進める上で重要な検出器

- Run 3から新しく導入する内部 μ 粒子検出器の早期立ち上げを行い、この信号と既存のシステムとを統合し、ヒッグス粒子由来の μ 粒子を含む事象を高効率で選別する新しいトリガーを構築する。
- すでに多量の放射線を受けてきたシリコン内部飛跡検出器の荷電粒子飛跡再構成能力を最大限に発揮させるためにバイアス電圧を常時監視などの運転の最適化をはかる。

これらの検出器性能の向上の追求は本研究の独自性の一つであり、これにより研究1と研究2の物理測定が可能になる。また、研究1と研究2の重要度は、2029年から開始予定の10倍の統計量の向上が見込まれる高輝度LHC実験において一層重要になる。そこで、**研究3: 高輝度LHCにおけるヒッグス研究に向けた検出器アップグレード**を加え将来性を担保する。本研究の研究1、研究2、研究3において、以下にあげる学術的な成果を達成したい。

● 研究1: 第2世代素粒子との結合の測定

Run 3の全データを用いた解析により、ヒッグス粒子の μ 粒子対崩壊を発見する。本研究に第3世代フェルミオンの測定を更新を合わせ、10%以下の精度でcクォーク、bクォーク、タウ粒子、 μ 粒子の結合を測定し、さらには、cクォーク結合の上限値も入れて、質量と世代構造の起源の謎に迫る。

● 研究2: ヒッグス粒子自己結合の測定に向けたヒッグス粒子対生成事象の観測

標準模型の計算によると、Run 3の全データ量ではヒッグス粒子対生成の観測は困難である。逆に、本研究期間中に統計的有意な観測がなされた場合は、ヒッグス粒子対に崩壊する新物理の兆候を捉えることになる。本研究では、ヒッグス粒子対を終状態とする新物理を探索し、ヒッグスポテンシャルに関する知見を得る。

● 研究3: 高輝度LHCにおけるヒッグス研究に向けた検出器アップグレード

Run 3よりも1桁上の細分化、高速化、放射線耐性強化を実現した検出器開発を行う。具体的には、機械学習を取り入れた新しいトリガーアルゴリズムの開発、超高放射線耐性を持つ大面積シリコンピクセル検出器建設の新しい工程手法の開発を行う。これらは、社会インフラ検証、医療、工学への波及効果も見込める。