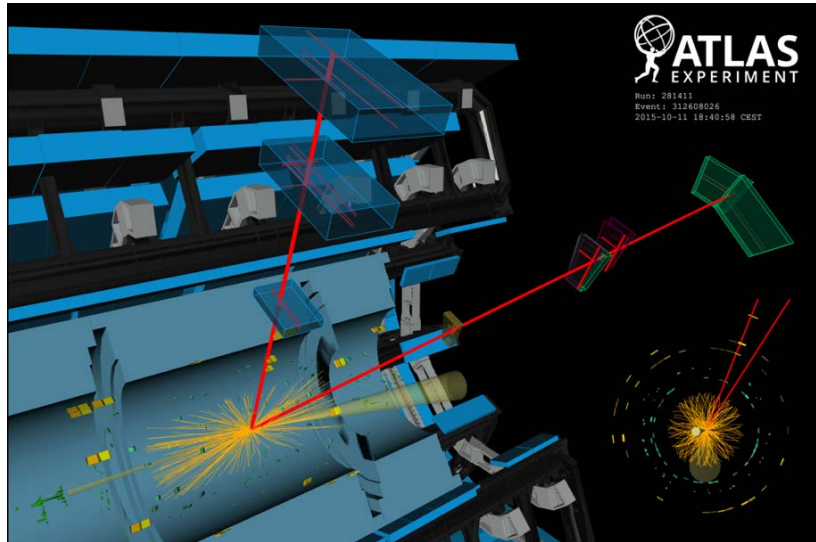




(ATLAS Collaboration/CERN)

ヒッグス粒子のミュー粒子対崩壊反応の兆候を発見

欧州合同原子核研究機構（CERN）は、8月3日、大型ハドロン衝突型加速器（LHC）で行われた ATLAS 実験^{*1} などの研究成果をプレスリリースしました。日本からは高エネルギー加速器研究機構（KEK）、東京大学、名古屋大学を主要なメンバーとする ATLAS 日本グループ^{*2} が LHC の ATLAS 実験に参加しています。本プレスリリースは、本研究に対して主要な貢献をした名古屋大学大学院理学研究科・素粒子宇宙起源研究所 戸本 誠 特任教授、同大学大学院理学研究科 堀井 泰之 講師、加納 勇也 研究員、川口 智美 博士後期課程学生らの研究グループが主体となり、情報提供するものです。

本研究は、極めて稀な素粒子^{*3} の反応である、ヒッグス粒子がミュー粒子^{*4} 対に崩壊する反応の兆候を ATLAS 実験が 2σ 、CMS 実験が 3σ の確度で観測したものです。測定結果は誤差の範囲でヒッグス機構^{*5} の予想と一致しており、ミュー粒子の質量の起源がヒッグス機構によることを示唆します。これまでの質量起源の研究は、第3世代^{*6} の素粒子であるボトムクォーク^{*7}、トップクォーク^{*8}、およびタウ粒子^{*9} に対するものが主でした。ミュー粒子は、第2世代の素粒子の一つであり、本研究は、第2世代の素粒子の質量起源、あるいは、世代の謎に初めて迫るものです。現在の統計量による測定の確度はまだ十分ではなく、今後、さらにデータを蓄積して、 5σ 以上の確度による発見を目指します。

この研究は、文部科学省の大規模学術フロンティア促進事業「大規模大型ハドロン衝突型加速器（HL-LHC）による素粒子実験」や多数の科学研究費助成事業などの支援のもとで行われたものです。

【ポイント】

- 極めて稀な素粒子の反応であるヒッグス粒子がミュー粒子対に崩壊する反応の兆候を CMS 実験が 3σ 、ATLAS 実験が 2σ の確度で観測しました。
- 崩壊が起こる確率は、統計誤差の範囲でヒッグス機構の予想と一致しており、ミュー粒子の質量がヒッグス機構で生成されていることを示唆しています。
- 第3世代の素粒子であるトップクォーク、ボトムクォーク、タウ粒子の質量起源は、これまでの研究で解明されていましたが、本研究により、第2世代の素粒子の質量起源の解明に向けた第一歩を踏み出しましたと言えます。

【研究背景と内容】

○ 概要

欧州合同原子核研究機構（CERN）は、8月3日、大型ハドロン衝突型加速器（LHC）で行われた実験の成果をプレスリリースしました。日本からは高エネルギー加速器研究機構（KEK）、東京大学、名古屋大学を主要なメンバとする ATLAS 日本グループが LHC の ATLAS 測定器で実験を行う ATLAS 実験に参加しています。本プレスリリースは、本研究に対して主要な貢献をした名古屋大学が主体となり、情報提供するものです。

CERN のプレスリリースは、「ヒッグス粒子がミュー粒子対に崩壊する反応（図1参照）の兆候を発見した」という内容です。具体的には、5000個に1個程度の頻度でしか起こらないほどに稀な反応であるヒッグス粒子のミュー粒子対崩壊の兆候を、ATLAS 実験が 2σ 、CMS 実験が 3σ の統計的精度で観測しました。

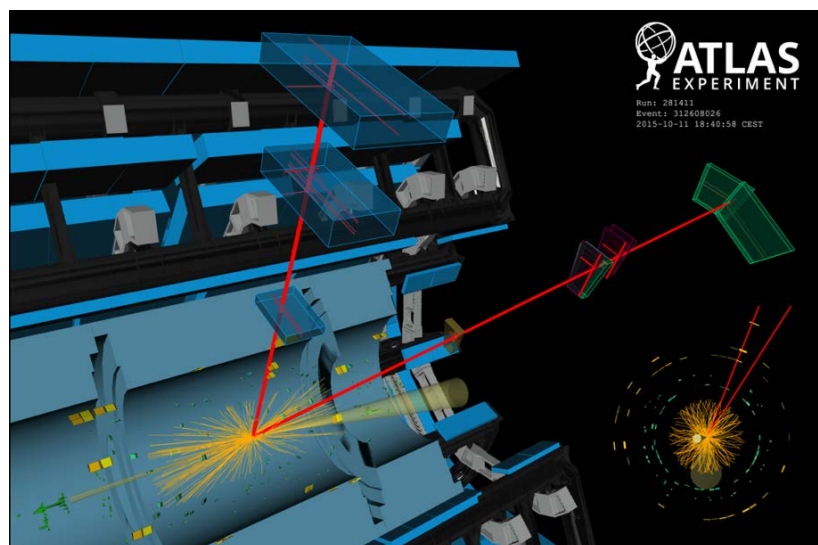


図1：ATLAS 実験が捉えたヒッグス粒子が2つのミュー粒子（赤色の線）に崩壊した反応を含む事象の候補（ATLAS Collaboration/CERN）。

2012年に、CERNで推進されているATLAS実験、CMS実験によって、ヒッグス粒子が発見されました。素粒子がヒッグス場との相互作用によって質量を獲得すると考えるヒッグス機構の実証を行うためには、ヒッグス粒子の生成や崩壊の反応を精査する必

要があります。物質を形作る素粒子（物質粒子）は 6 種類のクォークと 6 種類のレプトンから構成されますが、それらは質量の大きさに基づいた「世代」によって分類されます。これまでの研究で、第 3 世代の素粒子であるトップクォーク、ボトムクォーク、およびタウ粒子とヒッグス粒子との反応は観測されました。

ATLAS 実験では、2015 年から 2018 年に、世界最高エネルギー（13 テラ電子ボルト）の陽子衝突実験を行い、その時に取得した全てのデータを用いて、ヒッグス粒子がミュオン粒子対に崩壊する反応の兆候を 2σ の統計的精度で発見しました（図 2 参照）。この反応が起こる確率は、現在の統計量ではヒッグス機構の予想と一致しています。ミュオン粒子は第 2 世代の素粒子で、本研究は、第 2 世代の物質粒子の質量の起源もヒッグス機構にあること、さらには、素粒子の世代もヒッグス機構に起因することを示唆するものです。

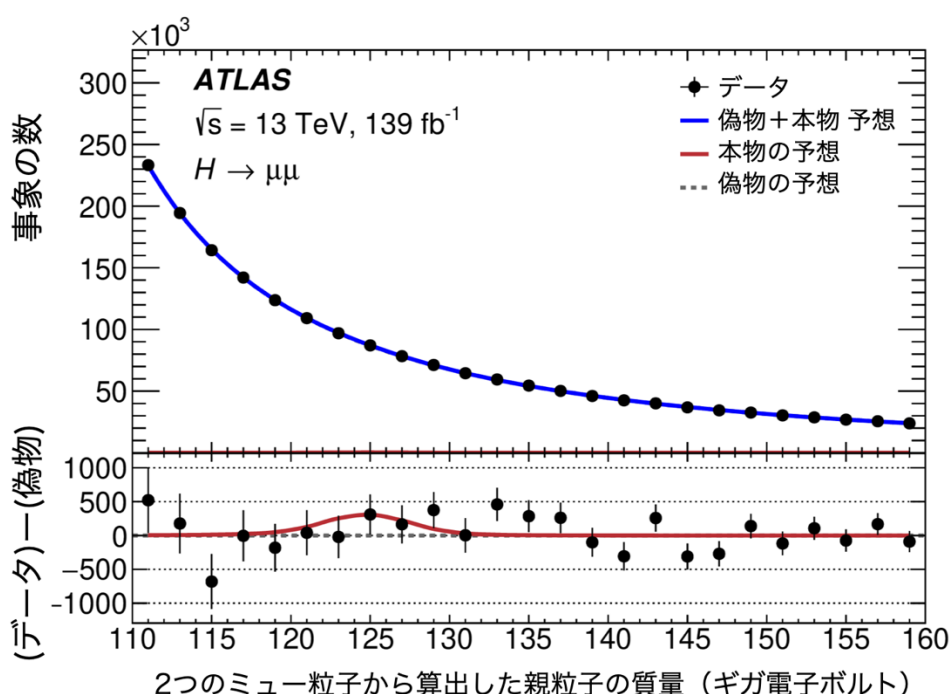


図 2：2 つのミュオン粒子候補を含む事象を集め、ミュオン粒子候補のエネルギー、運動量、放出角度の情報から算出した質量分布。2 つのミュオン粒子がヒッグス粒子の崩壊によるもの（本物）であれば、ヒッグス粒子の質量である 125 ギガ電子ボルト付近に集まる。そうでない偽物の場合は、より低い質量から右肩下がりに分布する。

（ATLAS Collaboration/CERN）

これまでに蓄積した全データを用いた測定において、ヒッグス機構の予想と一致する結果が得られていますが、その確度はまだ不十分です。これから蓄積するさらに高統計のデータを用いて、本測定の確度を高める必要があります。素粒子の研究では、一般的に統計的精度が 5σ を超えると「発見」と主張できます。ATLAS 実験と CMS 実験は、これから取得予定のさらに高統計のデータを用いることで、ヒッグス粒子のミュオン粒

子対崩壊を発見したと主張できる 5σ 以上のレベルまで確度を向上できると考えています。その時の結果から、ヒッグス機構の予想値と観測値のズレを見ることで、未発見の新しい物理による影響が明らかになるかもしれません。

ATLAS 実験は、38 カ国、3000 人の研究者が参加する大プロジェクトですが、日本からは 14 機関、約 150 人の研究者・大学院生が参加して、素粒子物理学の標準理論を超える新しい物理の発見を目指しています。今回の成果についても、ATLAS 実験に参加する国内外の研究者による共著論文として発表されています。また、本研究は、素粒子物理学分野の中で最大の国際会議である第 40 回高エネルギー物理学国際会議（ICHEP 2020）でも公表されました。

LHC は、ほぼ光速まで加速した陽子同士を衝突させる、世界最高エネルギーの円形加速器です。2009 年に運転を開始し、2010 年 3 月から 7 テラ電子ボルトの衝突エネルギーで本格的な実験をスタートしました。2012 年 4 月には衝突エネルギーを 8 テラ電子ボルトに増強し、同年 7 月 4 日のヒッグス粒子発見につながりました。現在は衝突エネルギー 13 テラ電子ボルトでデータを蓄積し、素粒子とヒッグス粒子との相互作用を精密に測定することによる質量起源の研究や、新物理現象を示唆する新粒子の探索を行っています。LHC は 2025 年頃まで運転を続け、その後、加速器の高輝度化と検出器のアップグレードを行い、2027 年頃から高輝度 LHC を開始する予定です。

○ 研究内容と成果

2015 年から 2018 年までに収集したデータ中に、ヒッグス粒子がミュオン粒子対に崩壊する極めて稀にしか起きない反応の兆候を観測しました。ヒッグス粒子は陽子同士の衝突により生成された直後に様々な粒子対に崩壊しますが、それらを分類、解析し、まとめたところ、CMS 実験は 3σ 、ATLAS 実験は 2σ の統計的精度で兆候を観測したことがわかりました（図 2 参照）。現在の測定精度において、反応が起こる確率はヒッグス機構の予想と一致しており、ミュオン粒子の質量がヒッグス場の動的な性質によって生成されていること、つまり、ヒッグス機構によることを示唆しています。

名古屋大学は、2006 年より ATLAS 実験に参画し、ミュオン粒子検出器（図 3 参照）の建設、運転を、ATLAS 日本グループの研究機関とともに率いてきました。このミュオン粒子検出器は、高さ 25 メートルの大型の検出器であり、32 万の検出部から成ります。この検出器を用いることで、高効率でヒッグス粒子の崩壊で生成されたミュオン粒子対を捉えることができます。

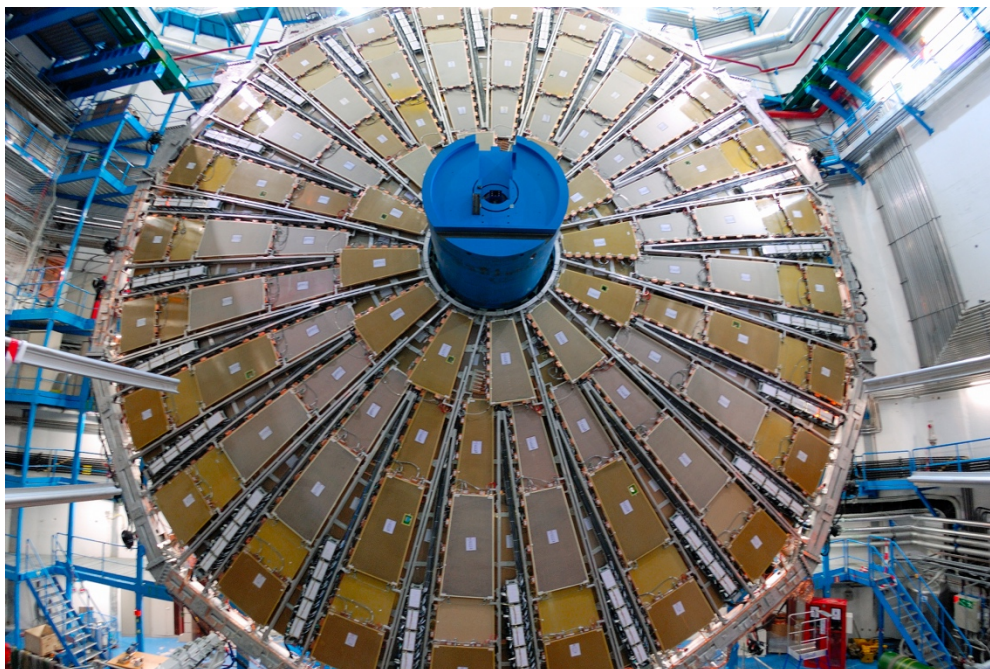


図 3 : ATLAS 実験のミュオン粒子検出器の外観 (ATLAS Collaboration/CERN) 。直径約 25 メートルの巨大な円盤型の検出器である。

また、名古屋大学は、取得したデータの解析において重要な貢献をしました。ミュオン粒子対に崩壊するヒッグス粒子が 1 つ生成される間に、何千ものミュオン粒子対が別の物理過程を通じて生成されます。ヒッグス粒子がミュオン粒子対に崩壊する反応の特徴は、ミュオン粒子対の情報から算出した質量がヒッグス粒子の質量である 125 ギガ電子ボルト程度になることです。そのためには、ミュオン粒子のエネルギー、運動量、放出角度を正確に測定しなければなりません。名古屋大学では、ミュオン粒子から放射された光を捉え、その光のエネルギーをミュオン粒子のエネルギーに還元する新しい手法を導入するなどして、高い感度を実現するために不可欠な貢献をしました。

【成果の意義】

2012 年のヒッグス粒子の発見により、私たちの住む宇宙は無ではなく、ヒッグス場で満ちていて、素粒子の質量はヒッグス場の動的な性質で生成されていること (ヒッグス機構) を突き止めました。同時に、力を媒介する粒子である W 粒子や Z 粒子の質量がヒッグス機構により生成されていることを検証しました。その後、3 つの世代がある物質を構成する素粒子のうち、第 3 世代のトップクォーク、ボトムクォーク、タウ粒子については、その質量がヒッグス機構により生成されることを検証しました。

ミュオン粒子は第 2 世代に属する物質粒子です。ヒッグス機構では、ヒッグス粒子との相互作用が強い素粒子ほど、その質量が大きいと考えます。ミュオン粒子は、トップクォーク、ボトムクォーク、タウ粒子よりもはるかに軽く、ヒッグス粒子との相互作用は弱くなります。したがって、ヒッグス粒子のミュオン粒子対への崩壊は、これまでの LHC 実験では測定できませんでした。今回の結果を踏まえると、5000 個程度のヒッグス粒

子の中からひとつだけしか崩壊しない極めて稀なヒッグス粒子のミュー粒子対への崩壊の確率の測定から、第3世代だけでなく第2世代の物質粒子についても、質量が生成される仕組みがヒッグス機構であることを示唆し始めたと言えます（図4参照）。素粒子の質量の起源、および世代の謎の全貌解明に向けて前進しました。

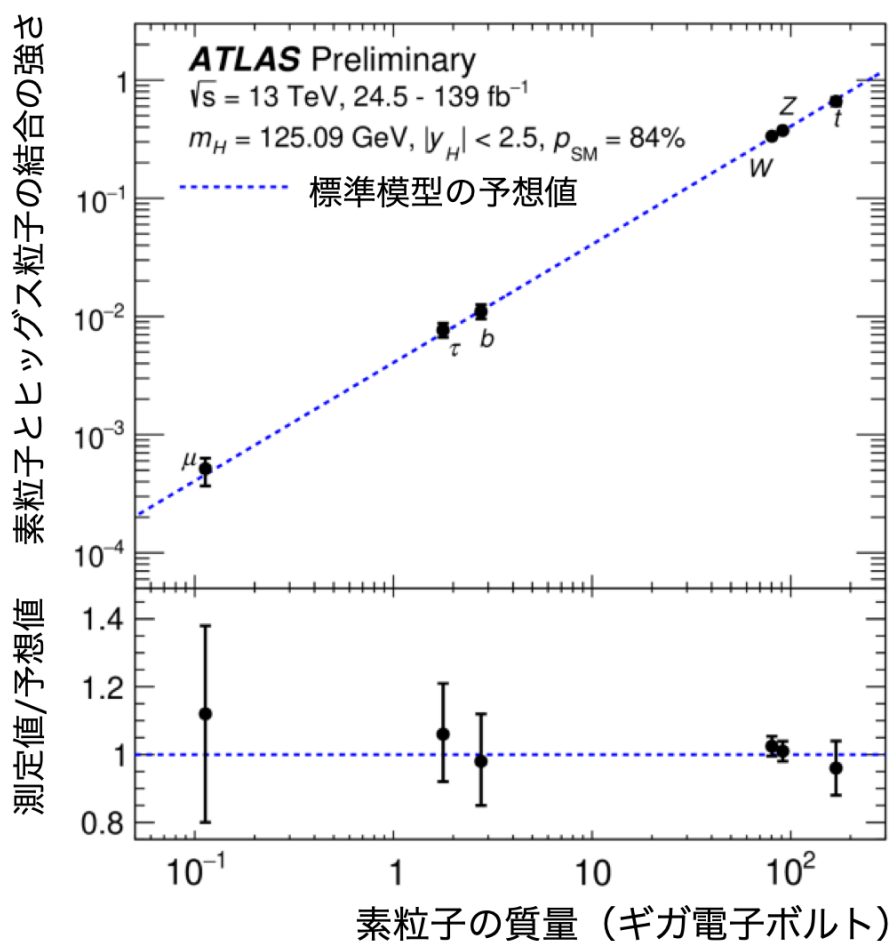


図4：これまでに観測されたいろいろな素粒子とヒッグス粒子との結合の強さ（縦軸）とそれぞれの素粒子の質量（横軸）。（ATLAS Collaboration/CERN）

今後のLHCや高輝度LHCで取得予定のさらなるデータを用いることで、ATLAS実験とCMS実験は、ヒッグス粒子のミュー粒子対への崩壊を発見したと主張できるレベルまで確度を向上させることができると考えています。その結果から、ヒッグス機構の予想値と観測値のズレを見ることで、未発見の新しい物理の影響がわかってきます。

【CERN プレスリリース情報】

タイトル：CERN experiments announce first indications of a rare Higgs boson process

ウェブページ：<https://home.cern/news/press-release/physics/cern-experiments-announce-first-indications-rare-higgs-boson-process>

【論文情報】

国際会議名称 : 40th International Conference on High Energy Physics

国際会議トップページ : <https://ic hep2020.org/>

国際会議資料 : <https://indico.cern.ch/event/868940/contributions/3813477/>

雑誌名 : Physics Letters B (投稿済み)

プレプリント : arXiv:2007.07830 [hep-ex], <https://arxiv.org/abs/2007.07830>

論文タイトル : A search for the dimuon decay of the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector

著者 : M. Tomoto, Y. Horii, Y. Kano, T. Kawaguchi et al. (ATLAS Collaboration)

【用語説明】

※ 1. ATLAS実験

フランスとスイスの国境にあるCERNのLHCに設置されたATLAS測定器で行われている実験のことです。13から14テラ電子ボルトという高い衝突エネルギーによって新粒子を作り出し、原始宇宙の謎に迫るのが目的です。本プロジェクトはCERN加盟国による共同事業ですが、LHCとその検出器の初期投資だけで約5000億円の費用がかかり、日本はオブザーバー国ながらも、建設費用の一部負担だけでなく、加速器、実験装置の製造、データ解析、研究など様々な協力をしてきました。とくに、日本が協力したATLAS測定器は、衝突で生じた新粒子の崩壊をとらえる巨大な測定器で、2012年夏、同じLHCのCMS測定器の結果と合わせ、ヒッグス粒子と考えられる信号を見つけたと発表し、世界中で大きなニュースとなりました。

※ 2. ATLAS日本グループ

高エネルギー加速器研究機構、筑波大学、東京大学、お茶の水女子大学、早稲田大学、東京工業大学、首都大学東京、信州大学、名古屋大学、京都大学、京都教育大学、大阪大学、神戸大学、九州大学、以上の14大学、約150人の研究者（大学院生を含む）からなります。

※ 3. 素粒子

この世を構成する分割不可能な最小単位。物質を構成する最小粒子、力を媒介する粒子、ヒッグス粒子の三つに分類できる（図5）。物質粒子には性質の良く似た三世代のパターンが存在します。質量は素粒子によって大きく異なり、例えば電子とトップクォークの質量比は約30万倍です。

※ 4. ミュー粒子

電子と同じ性質を持つ素粒子ですが、電子よりも200倍重く、第2世代に属します。地上まで降り注ぐ宇宙線の主な成分はミュー粒子です。

※ 5. ヒッグス機構

もともと質量を持たないとされる素粒子が、ヒッグス場との相互作用によって質量を獲得する仕組みのことです。ヒッグス場は私たちの住む宇宙全体に存在していることがわかっています。これは、真空が無ではないことを意味しています。宇宙の誕生直後にヒッグス場の性質が劇的に変わり、その動的な変化によって素粒子に質量が生じています。

※ 6. 素粒子の世代

図5のように、物質を構成する素粒子は、電子、eニュートリノ、アップクォーク、ダウンクォークの4つの素粒子がセットを構成しています。このセットを世代と呼び、実験的に3つの世代があることがわかっています。3世代目の存在を预言したことで、小林・益川の両氏は2008年にノーベル物理学賞を受賞しました。世代が異なる素粒子は質量以外の性質が同であり、なぜ世代があるのか、なぜ3世代なのか、の疑問は素粒子の大きな謎のひとつとなっています。

※ 7. ボトムクォーク

トップクォークと対をなす素粒子で、物質を形作り素粒子の中ではトップクォークについて重い素粒子です。現在、SuperKEKB加速器のBelle II実験でこの粒子の持つ性質の詳細を調べています。

※ 8. トップクォーク

現在までに発見されている素粒子の中で最も重く、ヒッグス粒子より重いことが知られています。

※ 9. タウ粒子

トップクォーク、ボトムクォークと同じ第3世代に属する重い素粒子です。電子、ミュー粒子と同じ性質を持ちます。

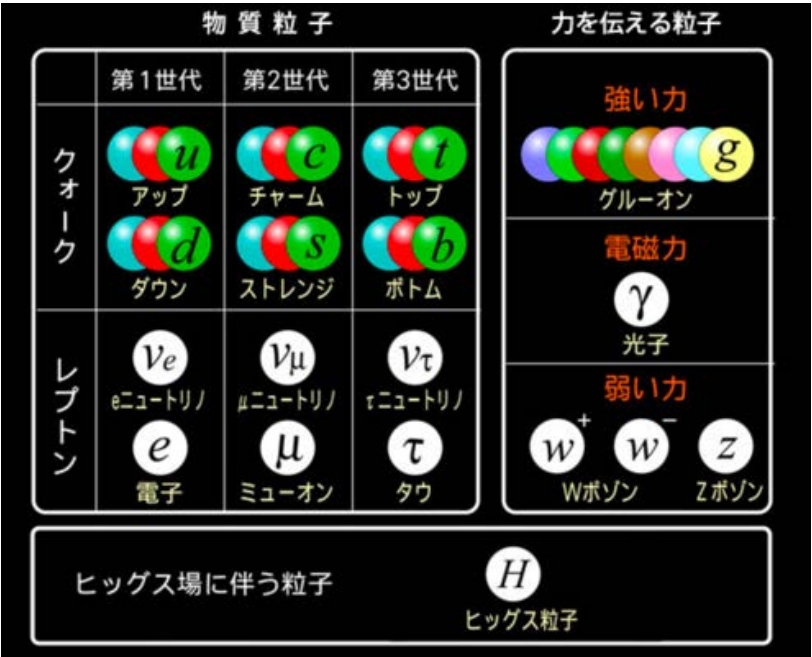


図 5：素粒子の紹介図。