

科学研究費助成事業「新学術領域研究（研究領域提案型）」 研究概要
〔令和3年度事後評価用〕

令和3年6月30日現在

機関番号：12601
 領域設定期間：平成28年度～令和2年度
 領域番号：2803
 研究領域名（和文）ヒッグス粒子発見後の素粒子物理学の新展開
 ～LHCによる真空と時空構造の解明～
 研究領域名（英文）New expansion of particle physics of post-Higgs era by LHC revealing the vacuum and space-time structure
 領域代表者
 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
 交付決定額（領域設定期間全体）：（直接経費）1,028,800,000円

研究成果の概要

- 1) 世界最高エネルギー加速器 LHC を用いてテラスケールの物理を研究した
- 2) 真空の新しい構造を発見し、新現象の示唆がえられた。これが超対称性粒子である可能性が指摘され、直接探索する準備を行った。
- 3) ヒッグス場が、ニュートリノを除く様々な素粒子の質量の起源であることが判明した。
- 4) ヒッグス場が、素粒子の世代を作っていることが判明した
- 5) 素粒子を使って、時空や真空を研究するパラダイムシフトを実現しつつある。
- 6) 次世代の素粒子実験の基幹技術の開発をすすめ、高輝度 LHC 実験に必要な実験装置のデザインを確定しテクニカルデザインレポートとしてまとめた。

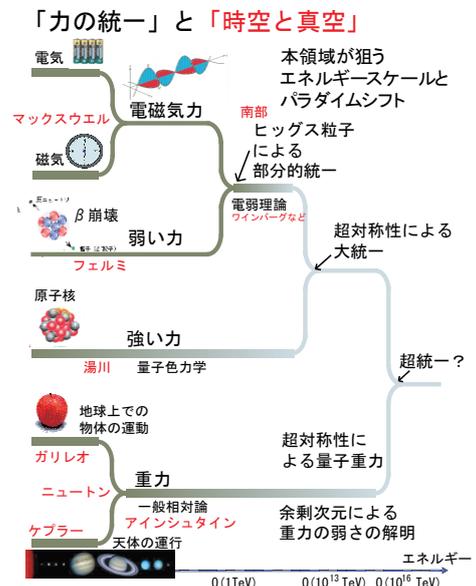
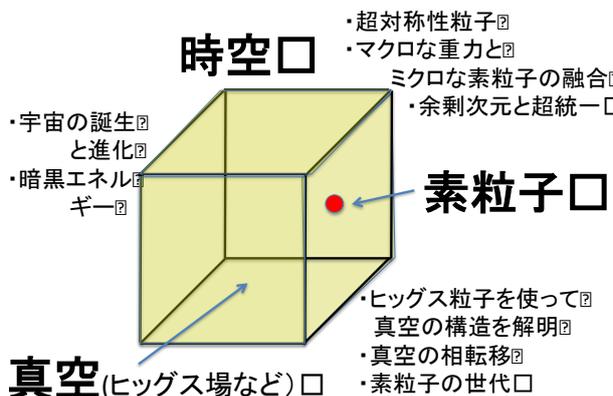
研究分野：素粒子物理学

キーワード：素粒子, LHC, ヒッグス粒子, 超対称性粒子, 暗黒物質, 大統一理論

1. 研究開始当初の背景

2012年ヒッグス粒子が LHC で発見された。真空に高いエネルギーを与えるとヒッグス粒子が励起されたことから、真空に場が潜んでいたことを発見した重要な成果ある。真空は空っぽではなく、ヒッグス場で満ちており、その変化（相転移）で宇宙が進化してきたを示す。

2. 研究の目的

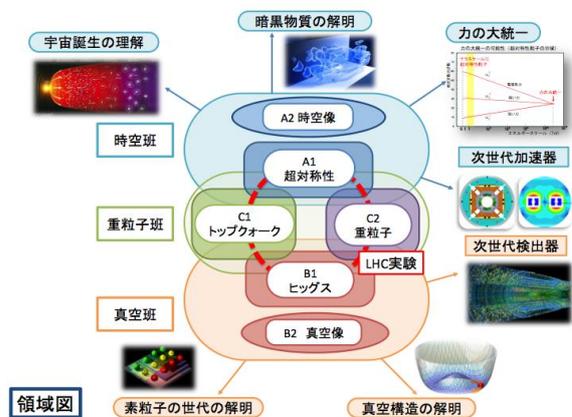


真空の重要性を更に推し進め、従来の素粒子研究から、素粒子をプローブとして、その背景にある「真空」や「時空」の研究へとパラダイムシフトすることである。左上図に示したように 従来の素粒子研究を拡張し、時空、真空、素粒子を融合する新しい領域を創成するものである。真空の研究で、真空の構造解明や素粒子の世代を解明し、真空の相転移の研究を宇宙の進化などへ研究を広げる。時空の研究は、超対称性粒子など新しい素粒子現象の発見を核に、素粒子と時空を結びつけ、新しい時空像に迫っていく。本領域がめざす、テラスケール ($\text{TeV}=10^{12}$ 電子ボルトのエネルギースケール) の素粒子現象は、時空や真空をさぐる重要なツールであるばかりでなく、力の大統一や超統一(右上図)に向かう重要な研究であり、素粒子のメインストリームの研究である。



3. 研究の方法

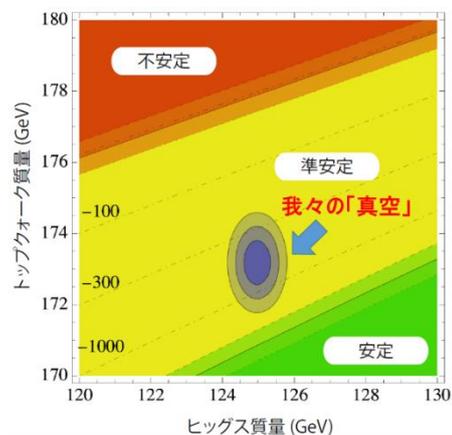
世界で唯一、テラスケール ($\text{TeV}=10^{12}$ 電子ボルトのエネルギースケール) の研究が可能である 世界最高エネルギー加速器 LHC (右上図) を研究の中心にすえる。中心となる4つの実験グループ(A1:超対称性, B1:ヒッグス, C1:トップクォーク, C2重粒子)と、その成果を時空へ展開するA2時空像とB2真空像から計画研究は構成されている。この6つの計画研究を核に、公募研究と共に、宇宙誕生の解明、暗黒物質の解明、真空構造の解明や世代の解明へとつなげていく。また、次世代素粒子の基幹技術開発もすすめていく。



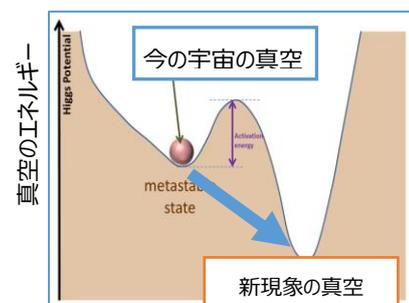
4. 研究の成果

1) 新しい真空の構造の発見と新現象の示唆

①ヒッグス粒子とトップクォークの性質を詳細に調べることで真空を探ることが出来、我々の宇宙の「真空」が安定で無く、準安定であることが判明した(右図)。準安定であることの意味は、何か新現象に対応した、より安定状態の存在を意味しており、新しい真空の構造の発見、標準理論を超えた新現象の存在の実験的な証拠である。(右下図)



② LHCでの実験成果を吟味し、更に様々な実験で報告されているアノマリーについての検証を行い、米国での実験で報告されているミューオン異常磁気能率(muon g-2)の標準理論からのズレが、この新現象に対応している可能性があることが分かった。LHC実験でのゲージノ・スカラーレプトンの発見が強く示唆されている。



真空に潜む粒子のエネルギースケール

③LHCの第3期実験の準備を領域全体で行った。発見が難しい領域(電荷をもったゲージノ、スカラーレプトンと暗黒物質である一番軽い超対称性粒子との質量差が小さい)を研究するために、衝突頻度の増強などの実験準備を完了した。また発見能力を著しく高めるため、機械学習を取り入れ、感度を向上した。

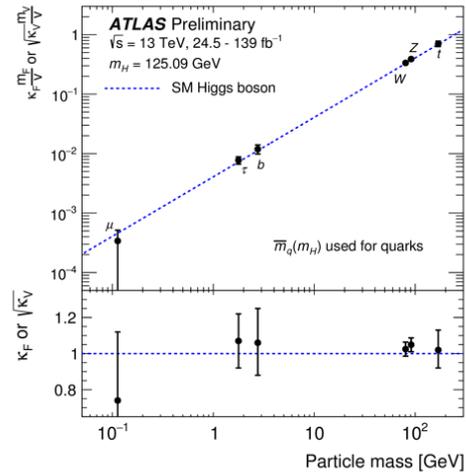
④真空場の相転移が与えた影響や、ヒッグス場がインフレーションを担った場合の重力波

を用いた検証の可能性、②で期待されている新現象に関して暗黒物質の新しい可能性を検証した。エネルギーフロンティア素粒子研究から、重力波や宇宙の真空の相転移やインフレーションを探ることが可能になりつつある。暗黒物質と真空の相転移を結びつけたり、真空の構造を弦理論などから、モデルを限定するなどの成果が得られた。

2) 質量の起源の解明や世代の起源

右図に示す様に、ヒッグス粒子と様々な素粒子の結合の強さを測定することに成功した。

- ① 発見したヒッグス場が、力を伝える素粒子(右図 W, Z)ばかりでなく、ニュートリノ以外の物質を形成する素粒子(実験的に観測されたのは第3世代: 右図 t, b, τ)の質量の起源でもあることが分かった。ボトムクォークへの崩壊は、バックグラウンドが多く従来は発見が難しいと考えられていたが、**機械学習を取り入れて感度**を向上させて発見に至った。
- ② 第2世代の μ 粒子(右図 μ)の結合強度も観測され、**ヒッグス粒子との結合の違いが素粒子の世代**を作っていることが判明した。超弦理論などを使って、真空の状態と世代の解明などを進めている。トップダウン型の研究が、実験成果と比較検討が出来る時代になった。



3) 次世代実験の基幹技術開発

現在行われている LHC ATLAS 実験が行われている現地 CERN に長期滞在し実験を推進した。現場の実験の最高責任者を本領域の研究者が行うなど、日本の大きな貢献があり、大きなビジビリティを出すことができた。



そこでの経験を基盤に次世代実験の高輝度 LHC に向けて、検出器の基幹技術を開発した。高い放射線耐性を持った半導体検出器、高位置分解能・高エネルギー分解能を持った液体アルゴン電磁カロリメータ、高速エレクトロニクスによるトリガーステムなど技術開発に成功し、テクニカルデザインレポート4冊(上図)にまとめた。また次世代実験の基幹技術となる超伝導線材及び磁石の開発にも成功した。(写真右)



5. 主な発表論文等(受賞等を含む)

1. ATLAS Collaboration, “Search for chargino-neutralino production with mass splittings near the electroweak scale in three-lepton final states in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D 101, 072001 (2020)
2. ATLAS Collaboration, “Search for squarks and gluinos in final states with same-sign leptons and jets using 139 fb⁻¹ of data collected with the ATLAS detector,” JHEP 06 (2020) 046
3. S. Asai, *S. Chigusa, T. Kaji, T. Moroi, M. Saito, R. Sawada, J. Tanaka, K. Terashi, K. Uno, “Studying gaugino masses in supersymmetric model at future 100 TeV pp collider,” JHEP 05 (2019)

1. [S. Iso](#), N. Kitazawa, *H. Ohta and T. Suyama, “More on Effective Potentials for Revolving D-Branes,” JHEP 08 (2020) 137
2. M. Kawasaki, K. Kohri, [T. Moroi](#), K. Murai and H. Murayama, “Big-bang nucleosynthesis with sub-GeV massive decaying particles,” JCAP 12 (2020) 048
3. S. Chigusa, [T. Moroi](#) and K. Nakayama, “Detecting light boson dark matter through conversion into a magnon,” Phys. Rev. D 101, 096013 (2020)
4. [S. Iso](#), H. Ohta and *T. Suyama, “Effective Potential for Revolving D-branes,” JHEP 04 (2019), 151
5. T. Abe, S. Chigusa, Y. Ema and [T. Moroi](#), “Indirect studies of electroweakly interacting particles at 100 TeV hadron colliders,” Phys. Rev. D 100, 055018 (2019)
6. M. Endo, *[T. Moroi](#), [M. M. Nojiri](#) and Y. Shoji, “False Vacuum Decay in Gauge Theory,” JHEP 11 (2017) 074
7. ATLAS Collaboration, “Combined measurements of Higgs boson production and decay using up to 80 fb⁻¹ of proton-proton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV collected with the ATLAS experiment,” Phys. Rev. D 101, 012002 (2020)
8. ATLAS Collaboration, “Observation of H \rightarrow bb decays and VH production with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B 786, 59 (2018) (内容についてはプレスリリース(KEK, 東京大学)された.)
9. ATLAS Collaboration, “Measurement of the Higgs boson mass in the H \rightarrow ZZ^{*} \rightarrow 4l and H \rightarrow $\gamma\gamma$ channels with $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions using the ATLAS detector,” Phys. Lett. B 784, 345 (2018) (ヒッグス粒子の質量測定)
10. ATLAS Collaboration, “Observation of Higgs boson production in association with a top quark pair at the LHC with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B 784, 173 (2018) (内容についてはプレスリリース(KEK, 東京大学)された.)
11. M. Aiko, [S. Kanemura](#), M. Kikuchi, K. Mawatari, K. Sakurai and K. Yagyu, “Probing extended Higgs sectors by the synergy between direct searches at LHC and precision tests at future lepton colliders,” Nucl. Phys. B 966, 115375 (2021)
12. K. Hashino, R. Jinno, M. Kakizaki, [S. Kanemura](#) and T. Takahashi, “Selecting models of first order phase transitions using the synergy between collider and gravitational wave experiments,” Phys. Rev. D 99, 075011 (2019)
13. ATLAS Collaboration, “Search for diboson resonances in hadronic final states in 139 fb⁻¹ of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP 06 (2020) 042
14. ATLAS Collaboration, “Search for heavy diboson resonances in semileptonic final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C 80, 1165 (2020)
15. ATLAS Collaboration, “Search for heavy particles decaying into a top-quark pair in the fully hadronic final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D 99, 092004 (2019)
16. ATLAS Collaboration, “Search for high-mass dilepton resonances using 139 fb⁻¹ of pp collision data collected at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B 796, 88 (2019)
17. ATLAS Collaboration, “Search for high-mass new phenomena in the dilepton final state using proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B 761, 372 (2016)
18. [T. Kobayashi](#), and H. Otsuka, “Challenge for spontaneous CP violation in Type IIB orientifolds with fluxes”, Phys. Rev. D 102, 026004 (2020)

19. S. Iguro, Y. Omura and M. Takeuchi, "Probing mu tau flavor-violating solutions for the muon $g-2$ anomaly at Belle II", JHEP 09 (2020) 144
20. H. Motz, H. Okada, Y. Asaoka, K. Kohri, "Cosmic-ray signatures of dark matter from a flavor dependent gauge symmetry model with neutrino mass mechanism", Phys. Rev. D 102, 083019 (2020)

ホームページ等

本新学術領域研究「真空と時空」ホームページ: <http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/vacuum-space-time/>