

# 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～

領域番号：2803

平成 28 年度～令和 2 年度

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）

（新学術領域研究（研究領域提案型））

研究成果報告書

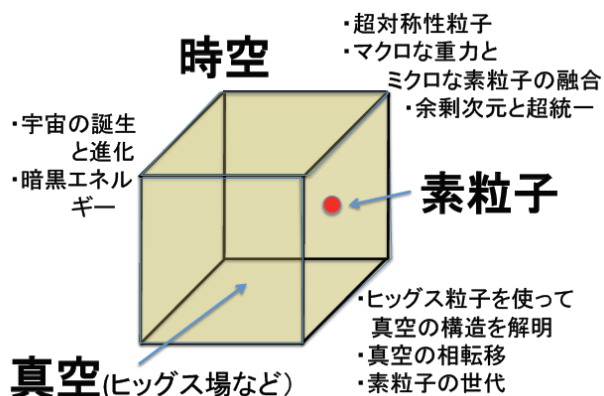
令和 6 年 5 月

領域代表者 浅井 祥仁  
東京大学・大学院理学系研究科・教授

## はしがき

2012 年のヒッグス粒子発見は、真空がヒッグス場に満ちており、その相転移で宇宙が進化したことを示唆している。本新学術領域研究「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～」の目的は、真空や場の背景にある真理を追究し、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。

右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。真空の研究では、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と研究を広げる。時空の研究では、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。最終的には、これらの研究を融合し時空-真空の関係の解明につなげることが本領域の全体構想である。時空・真空・素粒子の研究を推進するため、3つの研究項目（A・B・C）と各2班の合計6つの計画研究班を設置した。



ていく。最終的には、これらの研究を融合し時空-真空の関係の解明につなげることが本領域の全体構想である。時空・真空・素粒子の研究を推進するため、3つの研究項目（A・B・C）と各2班の合計6つの計画研究班を設置した。

A：時空班 超対称性粒子の発見を目指し、時空と素粒子を結ぶ新しい原理を追求する。

B：真空班 発見されたヒッグス粒子を用いて、真空の構造解明を推進する。

C：重粒子班 特に時空や真空と深い繋がりがあるトップクォークと W/Z ゲージ粒子を用いて、標準理論を超える新しい素粒子現象を直接・間接両面にわたって探索する。

本領域の研究において、コアとなる実験施設は、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 である。この LHC を使った研究を中心に、素粒子・時空・真空の研究と、それらと宇宙とを結ぶ計画・公募研究を結びつけることでブレークスルーを目指した。

## 研究組織

### 計画研究

領域代表者 浅井 祥仁（東京大学・大学院理学系研究科・教授）

（総括班）

研究代表者 浅井 祥仁（東京大学・大学院理学系研究科・教授）

（国際活動支援班）

研究代表者 浅井 祥仁（東京大学・大学院理学系研究科・教授）

(A01 班)

研究代表者 陣内 修 (東京工業大学・理学院・教授)  
研究分担者 中本 建志 (大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・  
超伝導低温工学センター・教授)  
研究分担者 浅井 祥仁 (東京大学・大学院理学系研究科教授)  
研究分担者 田中 純一 (東京大学・素粒子物理国際研究センター・教授)

(A02 班)

研究代表者 山口 昌弘 (東北大学・理学研究科・教授)  
研究分担者 磯 暁 (大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・  
素粒子原子核研究所・教授)  
研究分担者 諸井 健夫 (東京大学・大学院理学系研究科・教授)

(B01 班)

研究代表者 花垣 和則 (大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・  
素粒子原子核研究所・教授)  
研究分担者 受川 史彦 (筑波大学・数理物質系・教授)  
研究分担者 東城 順治 (九州大学・理学研究院・准教授)

(B02 班)

研究代表者 久野 純治 (名古屋大学・素粒子宇宙起源研究所・教授)  
研究分担者 兼村 晋哉 (大阪大学・理学研究科・教授)  
研究分担者 野尻 美保子 (大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・  
素粒子原子核研究所・教授)

(C01 班)

研究代表者 戸本 誠 (名古屋大学・理学研究科・特任教授)  
研究分担者 山崎 祐司 (神戸大学・理学研究科・教授)

(C02 班)

研究代表者 石野 雅也 (東京大学・素粒子物理国際研究センター・教授)  
研究分担者 廣瀬 穰 (大阪大学・理学研究科・助教)  
研究分担者 寄田 浩平 (早稲田大学・理工学術院・教授)  
研究分担者 隅田 土詞 (京都大学・理学研究科・助教)  
研究分担者 南條 創 (大阪大学・理学研究科・准教授)

## 公募研究

|       |        |                                        |
|-------|--------|----------------------------------------|
| 研究代表者 | 小林 達夫  | (北海道大学・理学院・教授)                         |
| 研究代表者 | 横崎 統三  | (東北大学・理学研究科・助教)                        |
| 研究代表者 | 神谷 好郎  | (東京大学・素粒子物理国際研究センター・助教)                |
| 研究代表者 | 難波 俊雄  | (東京大学・素粒子物理国際研究センター・助教)                |
| 研究代表者 | 竹内 道久  | (東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任研究員)             |
| 研究代表者 | 柿崎 充   | (富山大学・大学院理工学研究部・准教授)                   |
| 研究代表者 | 石渡 弘治  | (金沢大学・数物科学系・助教)                        |
| 研究代表者 | 大村 雄司  | (名古屋大学・基礎理論研究センター・准教授)                 |
| 研究代表者 | 田中 実   | (大阪大学・理学研究科・助教)                        |
| 研究代表者 | 石野 宏和  | (岡山大学・自然科学研究科・教授)                      |
| 研究代表者 | 末原 大幹  | (九州大学・理学院・助教)                          |
| 研究代表者 | 進藤 哲央  | (工学院大学・教育推進機構・教授)                      |
| 研究代表者 | 小林 達夫  | (北海道大学・理学院・教授)                         |
| 研究代表者 | 石徹白 晃治 | (東北大学・ニュートリノ科学研究センター・准教授)              |
| 研究代表者 | 木内 健司  | (東京大学・大学院理学系研究科・助教)                    |
| 研究代表者 | 白井 智   | (東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任助教)              |
| 研究代表者 | 鎌田 耕平  | (東京大学・大学院理学系研究科・助教)                    |
| 研究代表者 | 難波 俊雄  | (東京大学・素粒子物理国際研究センター・助教)                |
| 研究代表者 | 濱口 幸一  | (東京大学・大学院理学系研究科・准教授)                   |
| 研究代表者 | 竹内 道久  | (名古屋大学・素粒子宇宙起源研究所・准教授)                 |
| 研究代表者 | 大村 雄司  | (近畿大学・理工学部・講師)                         |
| 研究代表者 | 阿部 智広  | (名古屋大学・高等研究院・特任助教)                     |
| 研究代表者 | 宮本 祐樹  | (岡山大学・異分野基礎科学研究所・研究准教授)                |
| 研究代表者 | 浅岡 陽一  | (早稲田大学・理工学術院総合研究所・主任研究員)               |
| 研究代表者 | 神田 聡太郎 | (大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・助教) |

## 交付決定額（配分額）

|          | 合計            | 直接経費          | 間接経費         |
|----------|---------------|---------------|--------------|
| 平成 28 年度 | 201,500,000 円 | 155,000,000 円 | 46,500,000 円 |
| 平成 29 年度 | 281,450,000 円 | 216,500,000 円 | 64,950,000 円 |
| 平成 30 年度 | 278,200,000 円 | 214,000,000 円 | 64,200,000 円 |
| 令和元年度    | 287,170,000 円 | 220,900,000 円 | 66,270,000 円 |
| 令和 2 年度  | 289,120,000 円 | 222,400,000 円 | 66,720,000 円 |

|    |                    |                    |                 |
|----|--------------------|--------------------|-----------------|
| 総計 | 1, 337, 440, 000 円 | 1, 028, 800, 000 円 | 308, 640, 000 円 |
|----|--------------------|--------------------|-----------------|

## 研究発表

### 雑誌論文

- 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)
- ATLAS Collaboration, “Search for squarks and gluinos in final states with same-sign leptons and jets using  $139 \text{ fb}^{-1}$  of data collected with the ATLAS detector,” JHEP 06 (2020) 046
- M. Sugano, T. Nakamoto, et al., “Improvement in Training Performance by Enhancing Coil Mechanical Support in the Beam Separation Dipole Model Magnet for the HL-LHC Upgrade,” IEEE Transactions on Applied Superconductivity Vol. 30, No. 4 2020 4001806
- 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) 179
- ATLAS Collaboration, “Search for chargino and neutralino production in final states with a Higgs boson and missing transverse momentum at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D 100, 012006 (2019)
- ATLAS Collaboration, “Search for long-lived, massive particles in events with displaced vertices and missing transverse momentum in  $\sqrt{s} = 13$  TeV pp collisions with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D 97, 052012 (2018)
- ATLAS Collaboration, “Search for a scalar partner of the top quark in the jets plus missing transverse momentum final state at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP 12 (2017) 085
- ATLAS Collaboration, “Search for squarks and gluinos in events with an isolated lepton, jets, and missing transverse momentum at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D 96, 112010 (2017)
- A. Idesaki, T. Nakamoto, M. Yoshida, A. Shimada, M. Iio, K. Sasaki, M. Sugano, Y. Makida, T. Ogitsu, “Development of high radiation-resistant glass fiber reinforced plastics with cyanate-based resin for superconducting magnet systems,” Fusion Engineering and Design, Vol. 112, 2016, 418-424
- S. Iso, N. Kitazawa, H. Ohta and T. Suyama, “More on Effective Potentials for Revolving D-Branes,” JHEP 08 (2020) 137
- M. Kawasaki, K. Kohri, T. Moroi, K. Murai and H. Murayama, “Big-bang nucleosynthesis with sub-GeV massive decaying particles,” JCAP 12 (2020) 048
- S. Chigusa, T. Moroi and K. Nakayama, “Detecting light boson dark matter through conversion into a magnon,” Phys. Rev. D 101, 096013 (2020)

- S. Iso, H. Ohta and T. Suyama, “Effective Potential for Revolving D-branes,” JHEP 04 (2019), 151
- 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)
- S. Iso and K. Kawana, “RG-improvement of the effective action with multiple mass scales,” JHEP 03 (2018) 165
- K. Hamaguchi, M. Ibe and T. Moroi, “The swampland conjecture and the Higgs expectation value,” JHEP 12 (2018) 023
- M. Yamaguchi and W. Yin, “A novel approach to finely tuned supersymmetric standard models: The case of the non-universal Higgs mass model,” PTEP (2018) 023B06
- S. Chigusa, T. Moroi and Y. Shoji, “State-of-the-Art Calculation of the Decay Rate of Electroweak Vacuum in the Standard Model,” Phys. Rev. Lett. 119, 211801 (2017)
- S. Iso, P.D. Serpico and K. Shimada, “QCD-Electroweak First-Order Phase Transition in a Supercooled Universe,” Phys. Rev. Lett. 119, 141301 (2017)
- M. Endo, T. Moroi, M. M. Nojiri and Y. Shoji, “False Vacuum Decay in Gauge Theory,” JHEP 11 (2017) 074
- Y. Ema, K. Hamaguchi, T. Moroi and K. Nakayama, “Flaxion: a minimal extension to solve puzzles in the standard model,” JHEP 01 (2017) 096
- Y. Ema and T. Moroi, “Early decay of Peccei-Quinn fermion and the IceCube neutrino events,” Phys. Lett. B 762, 353 (2016)
- ATLAS Collaboration, “Combined measurements of Higgs boson production and decay using up to 80 fb<sup>-1</sup> of proton-proton collision data at  $\sqrt{s} = 13$  TeV collected with the ATLAS experiment,” Phys. Rev. D 101, 012002 (2020)
- ATLAS Collaboration, “ATLAS b-jet identification performance and efficiency measurement with tt events in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV,” Eur. Phys. J. C 79, 836 (2019)
- ATLAS Collaboration, “Observation of  $H \rightarrow b\bar{b}$  decays and VH production with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B 786, 59 (2018)
- 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)
- 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)
- ATLAS Collaboration, “Search for dark matter in association with a Higgs boson decaying to  $b\bar{b}$ -quarks in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B 765, 11 (2017)
- ATLAS Collaboration, “Search for new resonances decaying into a W or Z boson and a Higgs boson in the  $l\bar{l}b\bar{b}$ ,  $l\nu b\bar{b}$ , and  $\nu\nu b\bar{b}$  channels with pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B 765, 32 (2017)

- ATLAS Collaboration, “Measurements of the Higgs boson production and decay rates and constraints on its couplings from a combined ATLAS and CMS analysis of the LHC pp collision data at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV,” JHEP 08 (2016) 045
- Y. Unno, K. Hanagaki, K. Hara, Y. Ikegami, K. Nakamura, J. Tojo, et al., “Development of  $n^+$ -in-p planar pixel sensors for extremely high radiation environments, designed to retain high efficiency after irradiation,” Nucl. Instrum. Meth. A, 831, 122-132, 2016
- 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)
- T. Abe, M. Fujiwara, J. Hisano and K. Matsushita, “A model of electroweakly interacting non-abelian vector dark matter,” JHEP 07 (2020) 136
- Chakraborty, S. H. Lim, M. M. Nojiri and M. Takeuchi, “Neural Network-based Top Tagger with Two-Point Energy Correlations and Geometry of Soft Emissions,” JHEP 07 (2020) 111
- 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)
- A. Chakraborty, S. H. Lim and M. M. Nojiri, “Interpretable deep learning for two-prong jet classification with jet spectra,” JHEP 07 (2019) 135
- T. Abe, M. Fujiwara and J. Hisano, “Loop corrections to dark matter direct detection in a pseudoscalar mediator dark matter model,” JHEP 02 (2019) 028
- S.H.Lim and M.M.Nojiri, “Spectral Analysis of Jet Substructure with Neural Networks: Boosted Higgs Case,” JHEP 10 (2018) 181
- T. Abe, J. Hisano and R. Nagai, “Model independent evaluation of the Wilson coefficient of the Weinberg operator in QCD”, JHEP 03 (2018) 175
- B. Bhattacharjee, S. Mukhopadhyay, M. M. Nojiri, Y. Sakaki and B. R. Webber, “Quark-gluon discrimination in the search for gluino pair production at the LHC,” JHEP 01 (2017) 044
- K. Hashino, M. Kakizaki, S. Kanemura, P. Ko and T. Matsui, “Gravitational waves and Higgs boson couplings for exploring first order phase transition in the model with a singlet scalar field,” Phys. Lett. B 766, 49 (2017)
- S. Kanemura, M. Kikuchi and K. Yagyu, “One-loop corrections to the Higgs self-couplings in the singlet extension,” Nucl. Phys. B 917, 154 (2017)
- M. Aoki, S. Kanemura, K. Sakurai and H. Sugiyama, “Testing neutrino mass generation mechanisms from the lepton flavor violating decay of the Higgs boson,” Phys. Lett. B 763, 352 (2016)
- J. Hisano, Y. Muramatsu, Y. Omura and Y. Shigekami, “Flavor physics induced by light  $Z'$  from SO(10) GUT,” JHEP 11 (2016) 018
- ATLAS Collaboration, “A search for the dimuon decay of the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B 812, 135980 (2021)

- ATLAS Collaboration, “Evidence for  $t\bar{t}t\bar{t}$  production in the multilepton final state in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* 80, 1085 (2020)
- ATLAS Collaboration, “Measurement of top-quark pair spin correlations in the  $e\mu$  channel at  $\sqrt{s} = 13$  TeV using pp collisions in the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* 80, 754 (2020)
- ATLAS Collaboration, “Measurement of the top-quark mass in  $t\bar{t} \rightarrow \text{lepton} + \text{jets}$  channel from  $\sqrt{s} = 8$  TeV ATLAS data and combination with previous results,” *Eur. Phys. J. C* 79, 290 (2019)
- ATLAS Collaboration, “Measurement of  $t\bar{t}$  differential cross section of highly boosted top quarks decaying to all-hadronic final states in pp collision at  $\sqrt{s} = 13$  TeV using ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* 98, 012003 (2018)
- ATLAS Collaboration, “Measurement of lepton differential distributions and the top quark mass in  $t\bar{t}$  production in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* 77, 804 (2017)
- Y. Sano, Y. Horii, M. Ikeno, O. Sasaki, M. Tomoto, T. Uchida, “Subnanosecond time-to-digital converter implemented in a Kintex-7 FPGA,” *Nucl. Instrum. Meth. A*, 874, 50-56, 2017
- ATLAS Collaboration, “Measurement of top quark pair differential cross sections in the dilepton channel in pp collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV with ATLAS,” *Phys. Rev. D* 94, 092003 (2016)
- ATLAS Collaboration, “Measurements of the charge asymmetry in top-quark pair production in the dilepton final state at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* 94, 032006 (2016)
- ATLAS Collaboration, “The ATLAS Fast Tracker system,” *Journal of Instrumentation* accepted March 10, 2021
- ATLAS Collaboration, “Search for diboson resonances in hadronic final states in  $139 \text{ fb}^{-1}$  of pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* 06 (2020) 042
- 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)
- 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)
- ATLAS Collaboration, “Search for high-mass dilepton resonances using  $139 \text{ fb}^{-1}$  of pp collision data collected at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* 796, 88 (2019)
- ATLAS Collaboration, “Combination of searches for heavy resonances decaying into bosonic and leptonic final states using  $36 \text{ fb}^{-1}$  of proton-proton collision data at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* 98, 052008 (2018)

- ATLAS Collaboration, “Search for new high-mass phenomena in the dilepton final state using 36 fb<sup>-1</sup> of proton-proton collision data at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP 10 (2017) 182
- ATLAS Collaboration, “Performance of the ATLAS trigger system in 2015,” Eur. Phys. J. C 77, 1 (2016)
- 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)
- T. Kobayashi, and H. Otsuka, “Challenge for spontaneous CP violation in Type IIB orientifolds with fluxes”, Phys. Rev. D 102, 026004 (2020)
- 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
- 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)
- H. Fukuda, F. Luo and S. Shirai, “How Heavy can Neutralino Dark Matter be?” JHEP 04 (2019) 107
- R. Daido, F. Takahashi and N. Yokozaki, “Enhanced axionphoton coupling in GUT with hidden photon”, Phys. Lett. B 780, 538 (2018)
- D. Goncalves, K. Kong, K. Sakurai, M. Takeuchi, “Monotop signature from a fermionic top partner”, Phys. Rev D 97, 015002 (2018)
- T. Suehara, I. Sekiya, S. Callier, V. Balagura, V. Boudry, J-C. Brient, C. de la Taille, K. Kawagoe, A. Irles, F. Magniette, J. Nanni, R. Poeschl, T. Yoshioka [ILD SiW-ECAL group], “Performance study of SKIROC2/A ASIC for ILD Si-W ECAL”, JINST, 13, C03015, 2018
- X. Fan, S. Kamioka, T. Inada, T. Yamazaki, T. Namba, S. Asai, J. Omachi, K. Yoshioka, M. Kuwata-Gonokami, A. Matsuo, K. Kawaguchi, K. Kindo and H. Nojiri, “The OVAL experiment: a new experiment to measure vacuum magnetic birefringence using high repetition pulsed magnets”, EPJD, 71, 308, 2017
- K. Ishiwata and Y. Yonekura, “Longitudinal W boson scattering in a light scalar top scenario”, Phys. Rev. D 96, 015009 (2017)
- K. Mikami, M. Tanaka, Y. Yamamoto, “Probing new intra-atomic force with isotope shifts”, Eur. Phys. J. C 77, 896 (2017)

#### アウトリーチ活動発表

- プラネタリウム映画を用いた講演会「Phantom of the Universe」 花垣和則, 戸本誠, 山崎裕司, 江成祐二, 南條創 多摩六都科学館 2021年3月6日 2019年10月19

日，名古屋市科学館 2020 年 2 月 18 日，大阪市立科学館 2019 年 11 月 24 日，つくばエキスポセンター 2018 年 11 月 24 日

- NHK 文化センター横浜ランドマーク教室オンライン講座「素粒子の世界 -宇宙の成り立ちとヒッグス粒子-」 兼村晋哉 2021 年 2 月 6 日
- 第 4 回サイエンスコミュニケーション「宇宙暗黒物質は未知の素粒子か？」 久野純治 半田高等学校 2020 年 12 月 18 日
- ひらめき☆ときめきサイエンス（高校生対象ワークショップ）「君も新粒子を発見!? 小型素粒子実験にチャレンジ」 陣内修 東京工業大学 2019 年 8 月 2, 3 日，2018 年 8 月 2, 3 日
- 高校生対象の講演会「素粒子物理学と国際共同研究」 寄田浩平 筑波大学附属高校 2018 年 2 月 24 日
- テレビ放送 NHK-BS プレミアム「コズミック フロントネクスト 宇宙が真空崩壊!? 宇宙の未来をパパに習ってみた」 寺師弘二 2017 年 10 月 5 日
- 一般公開講演会 東京大学特別講座「宇宙誕生の非常識ーヒッグス粒子を通して宇宙誕生に迫るー」 浅井祥仁 取手ウェルネスプラザ 2017 年 8 月 27 日
- 一般公開講演会 名古屋大学・憲章記念日講演会「”物理学とは何だろうか” 朝永、南部からこれからの若い世代へ向けて」 磯暁 名古屋大学 2017 年 6 月 13 日
- 一般公開講演会 東京大学オープンキャンパス「最高エネルギー加速器で解き明かす素粒子、宇宙の謎 ～パワーアップした LHC が始動！～」 石野雅也 東京大学 2016 年 8 月 3-4 日
- 一般公開講演会 Science Conference in Hyogo 2016 - Learning Science through English 「Higgs and mass」 山崎祐司 ポートアイランドコンベンショナルホール(神戸大学) 2016 年 7 月 16 日

## 図書

- グリフィス 素粒子物理学，花垣和則 波場 直之，丸善出版，2019 年，ISBN-978-4-621-30392-4
- LHC の物理 -ヒッグス粒子発見とその後の展開-，浅井祥仁，共立出版，2016 年，ISBN-978-320-03527-0

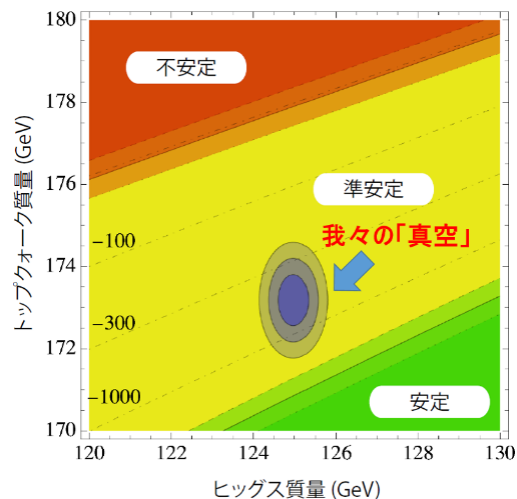
## 研究成果

### (1) 研究目標と達成度

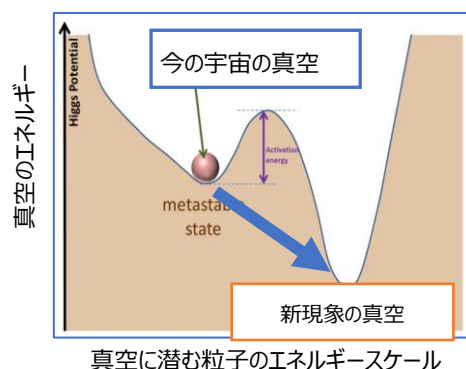
主要な研究テーマは、3つの研究項目（A：時空班、B：真空班、C：重粒子班）で共同して進めた。

- 本領域の研究主目的は、発見したヒッグス粒子などを用いて、時空・真空を探り、新しい素粒子現象を発見することにある。その成果を、初期宇宙や重力波などへひろげていくことにあり3つの研究項目で共同して進めた。

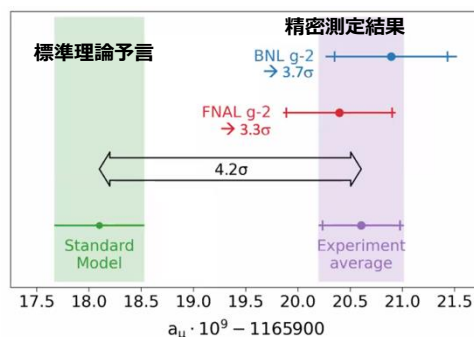
A) ヒッグス粒子（研究項目 B）とトップクォーク（研究項目 C）の性質を詳細に調べることで我々の宇宙の「真空」が安定で無く、準安定であることが判明した（右上図）。実験と理論が共同で研究をすすめた成果である。真空を探ることが出来た初めての成果である。準安定であることの意味は、何か新現象に対応した、より安定状態の存在を意味しており、新しい真空の構造の発見、標準理論を超えた新現象の存在の実験的な証拠である。（右中図）



B) この新現象は、時空と関係した超対称性か、あるいは別の現象かは真空の研究からだけでは不明である。領域全体で 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、テラスケール研究会でサブジェクトに分けて行った。米国での実験で報告（2021 年 4 月に別の実験でズレが再確認された。右下図）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り、公募研究と時空（研究項目 A）研究で、LHC 実験での信号が詳細に研究された。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。



C) この期待されている新現象は、LHC で発見が可能であり、この新現象を直接発見するために、LHC 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ることなどを行い、素粒子と機械学習の新しい領域を広げることに成功した。



D) A)B)で述べた新現象を直接発見する為、2020年に第3期実験を行う計画であった。しかし新型コロナウイルス感染症によるパンデミックで、研究者の国際的な往来ができなくなり、LHCがある欧州の研究所も長期にわたり閉鎖され、実験が延期されてしまった。領域全体で国際的な展開を進めている中で、COVID19の影響は甚大であった。国際会議も軒並みキャンセルされ例年50を超える国際会議での講演を行っていたが、これも大きな影響を受けた。

一方 COVID19 で実験ができない状況下で

も、オンラインによる物理解析やテラスケール研究会で研究を進めた。特に理論と公募研究で、この新しい真空や真空場の相転移が与えた影響、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、B)で期待されている新現象に関係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。領域として、広範な研究を進めたことによる大きな成果である。また with COVID19 時代に対応して、日本から実験装置を調整、運用する遠隔ラボ（写真右）を立ち上げ、数名の現地滞在の研究者と多数の国内研究者が、共同で実験準備を推進するようにした。

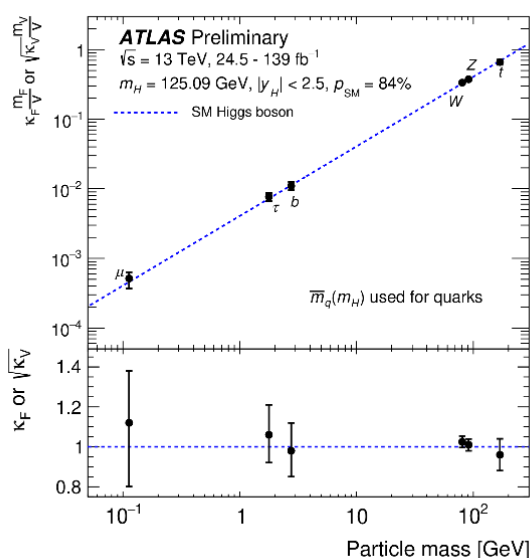
- ヒッグス粒子を用いて真空の構造を解明し質量の起源や世代の起源を探る研究を行った。右図に示す様に、ヒッグス粒子と様々な素粒子の結合の強さを測定することに成功した。

A) 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,  $\tau$ ）の質量の起源でもあったことが分かった。

B) 第2世代の  $\mu$  粒子（右図  $\mu$ ）の結合強度も観測され、ヒッグス粒子との結合の強さの違いが素粒子の世代を作っていることが判明した。領域は計画研究

A02, B02 と公募研究などで、超

弦理論のオービフォールド空間のモジュライ対称性などの研究を行い、ヒッグスと世代の理論的な解明を進めている。弦理論を実験と比較できるようになったことも領域としての成果である。



- ・ **次世代実験の基幹技術開発** これらの研究開発は計画研究 A01, B01, C01, C02 で共同して行った。**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シ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）

完成した7mのD1磁石実証機



## （2）本領域により得られた各研究項目の成果

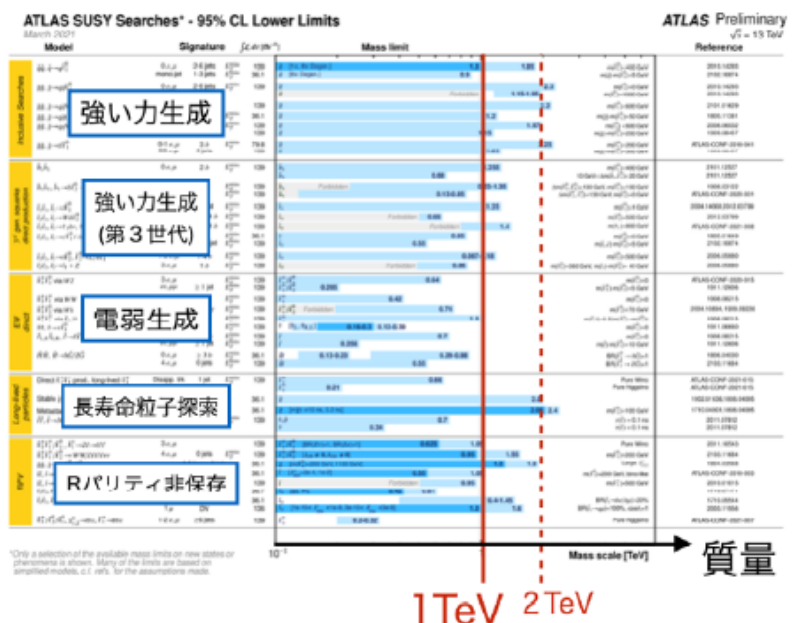
### 研究項目 A：時空班

#### 計画研究 A01

- A) ヒッグス粒子の「自然さ」から要求される超対称性粒子の存在を詳しく調べ、種々の超対称性模型が预言する数多くの崩壊モードのデータ解析を組織的に網羅して実施した（右図）。強い相

相互作用をする超対称性粒子は、1～2 TeV の制限が得られ、**「自然さ」を見直すきっかけとなった**。物理学の至る所にあらわれる「自然さ」を基にした議論に影響を与える成果であった。暗黒物質の有力な候補を、長寿命粒子を用いて探索するアイデアは、本領域研究で実験と理論の研究者が共同で考え提案をおこなった。超対称性研究

### 超対称性粒子質量に課された制限のまとめ



における日本のビジビリティは著しく高く、多くの結果に日本の研究者が中心となって貢献した。

- B) 次世代用加速器開発においては、次世代の高輝度実験で必要となる最終収束部ビーム分離双極磁石の試作機の作成・試験を重ね、機械特性、励磁能力の仕様を満たす超伝導磁石の開発に成功（前ページ写真）した。さらに新しい超伝導線材の開発を進めており、臨界電流密度について従来の性能を大幅に越えることに成功した。

#### 計画研究 A02

- A) (1) で述べた「真空の準安定が示す新現象の示唆」について、この宇宙の真空の崩壊率の1ループ補正まで含めた計算に世界で初めて成功した。更に、muon g-2 の標準理論からのズレより期待される新現象の LHC での信号の研究などを公募研究などと共同で行った。
- B) 超弦理論の定常解を考察することでプランクスケールから電弱スケールを導出した。特に、Dブレーン系が回転する定常解を考察し、**超対称性が弱く破れ、結果として電弱スケールとプランクスケールの大きな階層性**を説明する可能性を考え、D-ブレーンに働くポテンシャルの正確な計算に成功した。真空と時空を結ぶトップダウンのアプローチである。

**公募研究：**A02 班と共同で muon g-2 の理論的な研究を進め、どのような新現象が観測データから示唆されるかの研究を行った。A01 班と協力して、ミクロな時空の解明で重要になる素粒子レベルの等価原理検証や、領域として、新現象を包括的に研究していく目的で、この新しい暗黒物質を探索する新しい方法の開発研究を公募研究で進めた。

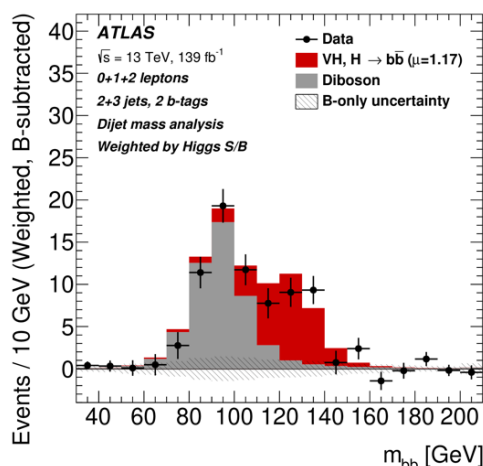
- 公募研究（濱口）：muon g-2 の実験値と標準模型予言値とのズレを説明できる超対称標準模型に関して、LHC Run 2 からの最新の結果を取り入れた現象論的研究を行ない、軽いスカラーレプトンの LHC での探索を指摘した。
- 公募研究（小林）：超弦理論のコンパクト化の幾何学を起源として現れるクォーク・レプトンのフレーバー構造の世代の解明に取り組んだ。トーラスやオービフォールド空間がもつモジュラー対称性の解析を行い、ゼロモードの変換性を解析し、その対称性の有限部分群がフレーバー対称性であることを発見した。
- 公募研究（石徹白）：超伝導を用いた新しい暗黒物質探索の最初の試作機を製作し、軽い暗黒物質の探索を行った。この新しい検出装置に必要な低放射能希釈冷凍機の開発と極低エネルギーキャリブレーション装置の開発に成功した。
- 公募研究（神谷）：ミクロな時空を見るとスピンの違いの影響をうけることが期待され、スピンの違いによる等価原理の検証実験を進めている。探索感度向上が期待されるピクセルセンサーを基にした中性子検出器を開発した。
- 公募研究（石野）：宇宙初期の重力波をとらえる CMB 観測の感度を上げる偏光変調器の作製とその評価システムの構築を行った。

## 研究項目 B : 真空班

### 計画研究 B01

ヒッグス粒子の精密研究を通して、背後の真空の構造に迫った。

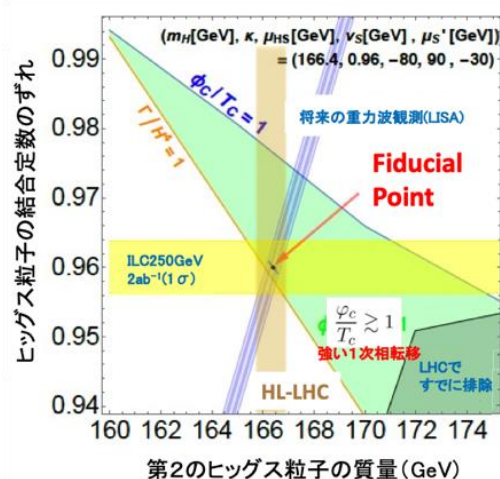
- A) ヒッグス粒子の質量を 0.2%の精度で測定し、真空が準安定であることの発見に大きな役割を果たした。
- B) ヒッグス粒子とボトムクォークが結合することを発見（右図: 赤色部分はヒッグス粒子がボトムクォーク対に崩壊した事象をシミュレートしたもの）し、その結合定数を 13%の精度で測定した。ボトムクォークへの崩壊はバックグラウンドが多く、観測が難しいと従来考えられていたが、深層学習を用いて、バックグラウンドとの分別を行うことに成功した。理論グループとの共同で深層学習を進化させてきた成果である。
- C) トップクォークとヒッグスが同時に生成される現象を発見し、これからトップクォークとヒッグス粒子が結合する強さを 9%の精度で決定した。これらの成果により、力を伝える素粒子の質量の起源同様に、物質を形作る素粒子の質量の起源もヒッグス場であることが分かった。
- D) ヒッグス粒子の第 2 世代の素粒子であるミューオンへ崩壊の徴候を掴んだ（まだ  $5\sigma$  の発見のレベルには達していない）。ヒッグス粒子との結合の強さの違いが素粒子の世代を作っていることが分かった。
- E) 次世代シリコン飛跡検出器開発；シリコンピクセルモジュールとシリコンストリップセンサーの開発を行った。50 ミクロン・ボンディング技術でセンサー開発を行うことに成功した。また、高い放射線耐性 ( $10^{16}\text{MeVn. q/cm}^2$ ) が得られた。これらの成果をもとに、ATLAS アップグレード用シリコン検出器の技術仕様書を完成させた。（P. 12 中央参照）



### 計画研究 B02

ヒッグス場の正体とその対称性の破れの起源の解明を行うとともに、世代の解明を行う研究を行ってきた。

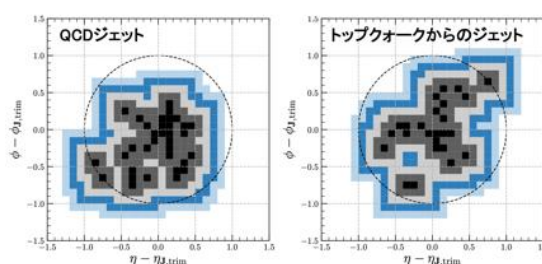
- A) ニュートリノ質量や宇宙バリオン数生成などの未解決現象を説明すべくヒッグスセクターを拡張した時、LHC および各種の将来実験を組み合わせるための研究を実施した。HL-LHC で第 2 のヒッグス粒子が発見された時、B01 班などからのヒッグス粒子の結合定数のずれ（統計不足でまだ観測されていない）と、将来の重力波観測が



ら、相転移のメカニズムなどが決定できることが分かった（前ページ下図）。真空の相転移と宇宙を関係つける成果である。

- B) B 中間子崩壊で測定された標準模型の予言とのずれが未知のレプトクォークで説明される場合、LHC 探索を含めた将来実験で可能となる検証の方法を公募研究と共同で示した。
- C) A02 班と相補的な研究で、暗黒物質が超対称性粒子でなく、真空のヒッグス場や、電弱理論と密接な関係のある場合の研究を行っている。擬スカラー場やスピン 1 の暗黒物質の場合、どのように LHC や暗黒物質探索で探することができるかを示した。

- D) 深層学習で、クォークから生成されたジェット（右図左）や重い粒子から生成されたジェット（右図右）かを区別することができるようになった。これは従来の CNN (Convolutional Neural Network) な どでも可能であったが、ソフト粒子の分布をミンコフスキー汎関数で定量化することで 1/10 の計算コストでの評価が可能になった。



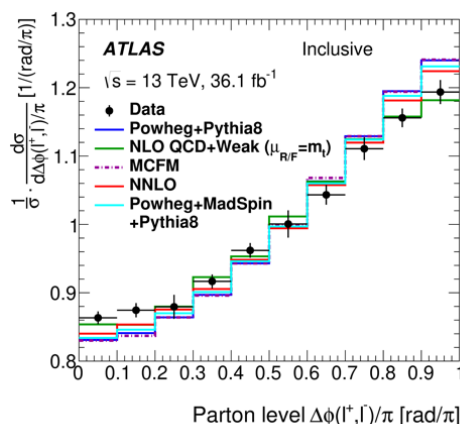
**公募研究**：B02 班と共同で、ヒッグス場の相転移の機構を、宇宙観測と結びつける研究を進め、また超対称性以外の新現象の可能性を調べている。また B01 班と協力してヒッグス場以外の新しい真空の場を、光子・光子コライダーを用いて作る計画が提案された。光格子時計の高感度化へ向けた研究に成功し、新しい場の効果を、精密な時間観測で行うなど、広い研究が展開された。

- 公募研究（鎌田）：発見されたヒッグス場と重力との非自明な結合により、インフレーションを起こすことができることを示した。宇宙背景放射の観測からヒッグス場がインフレーションのタネか否かが分かることを明らかにした。
- 公募研究（難波）：X 線自由電子レーザー施設、SACLA で利用できる硬 X 線ビームラインである BL3 と軟 X 線ビームラインである BL1 とを正面から衝突させる光子・光子コライダーを設計し、ビームラインへの提案を行った。
- 公募研究（大村）：B 中間子崩壊で測定された標準模型の予言とのずれが新物理で説明可能かを明らかにし、LHC やより高統計の B 中間子の実験（Belle2 及び LHCb）で検証可能かを明らかにした。
- 公募研究（宮本）：軽い暗黒物質アクシオン探索に原子分子のコヒーレント遷移を用いる新たな手法を開発した。極低温に冷却したオルトケイ酸イットリウム結晶中のエルビウムイオンからの近赤外超放射観測に成功し、コヒーレント現象を用いた高感度探索が可能になった。
- 公募研究（田中）：単一イオン光時計の技術を用いて、精密分光により原子内の未知の力を探索する手法を確立した。カルシウムイオン等について、実験からの制限、将来の実験で期待される感度を明確にした。

## 研究項目 C：重粒子班

### 計画研究 C01 トップクォーク

- A) トップクォークは、その特異な質量から、ヒッグス場と密接な関係がある。その質量の精密測定(精度 0.4GeV)を行い、真空の準安定性の発見に寄与した。また、トップクォークとヒッグス粒子が同時生成される現象を捉え、トップクォークとヒッグス粒子の結合の強さを9%の精度で測定した。
- B) トップクォークの生成断面積の精密測定を行い、右図の様なズレが観測された。新現象の可能性も含めて、実験・理論共同でこの原因をさぐり、電弱相互作用の高次補正が必要なが分かった。理論と共同で高次補正の研究を進めた。実験と理論が共同で研究する領域の重要性を示す。
- C) トップクォークのフレーバーを破る稀崩壊探索をおこなった。現在  $10^{-3}$  から  $10^{-4}$  の分岐比の上限が得られ、B02 とフレーバー構造の研究を行い、モデルの制限が得られた。
- D) 高輝度 LHC 実験の過酷な背景事象環境下で新物理探索を行うために不可欠な  $\mu$  粒子トリガーエレクトロニクスを開発を行い、試作機器を完成させ、2 種類の技術仕様設計書（前述）を執筆した。



### 計画研究 C02 未知重粒子

- A) 日本が製作したミュオン検出器のオペレーションを行い、高い質のデータをグループ全体に提供した。ATLAS 実験の初段トリガーは、解析対象とすべき事象を毎秒 100,000 イベントずつ選択するが、それらに含まれる 1GeV/c より大きな運動量をもつすべての飛跡をリアルタイムで再構築する「飛跡トリガーシステム」の開発（写真右）と実データを使った試運転に成功した。構築したシステムの詳細と性能を網羅した論文を発表し、2020 年 3 月にアクセプトされた。
- B) この計画研究の一つの目的では、ヒッグス粒子が真空場ではなく何らかの複合粒子である場合や高エネルギーでヒッグス場が強い結合を持つなどの特異ケースを想定している。この場合ゲージボソンの散乱 WW が重要なシグナルとなる。高エネルギー領域での WW 散乱の観測に成功し、未知の粒子が WW に崩壊する制限 5TeV が得られた。
- C) 新しいゲージボソン  $Z'$  がレプトン対に崩壊する場合の  $Z'$  の質量を最大 5TeV まで制限した。



**公募研究:**従来の暗黒物質探索と異なる手法で超対称性以外の暗黒物質を探る新しい方法の R&D を進めた。

- 公募研究（浅岡）：国際宇宙ステーション搭載 CALET の全電子スペクトルの微細構造に着目して、暗黒物質探索に新たな光を当てた。全電子スペクトルの微細構造を暗黒物質起源として説明することができるモデルを構築し Physical Review D にて出版した。
- 公募研究（神田）：未知のゲージボソン  $Z'$  が引き起こすミュオン原子におけるパリティ非保存効果の観測を目指して装置開発と原理実証に取り組んだ。LYSO 無機シンチレータと SiPM を組み合わせたカロリメータを開発し、英国 RAL におけるビーム試験でグラフィイト標的からのミュオン X 線を背景事象の電子と分離して測定することに成功した。