

機関番号： 14301  
 領域設定期間： 2018年度～2022年度  
 領域番号： 6003  
 研究領域名（和文） ニュートリノで拓く素粒子と宇宙  
 研究領域名（英文） Exploration of Particle Physics and Cosmology with Neutrinos  
 領域代表者  
 中家 剛（NAKAYA Tsuyoshi）  
 京都大学・理学研究科・教授  
 研究者番号： 50314175  
 交付決定額（領域設定期間全体）：（直接経費）1,129,900,000円

研究成果の概要

ニュートリノ物理は、素粒子の基本的性質や質量の起源、力と物質場の統一にくわえて、宇宙の物質・反物質非対称性の起源や宇宙の構造形成など様々な現象の解明を目指している。本領域では、世界最先端のニュートリノ実験（スーパーカミオカンデ、T2K 実験、IceCube 実験）により、ニュートリノ振動、CP 対称性の破れ、ニュートリノ天文学の研究を進めてきた。さらに、素粒子の統一理論と宇宙初期を探るために、陽子崩壊の探索、宇宙背景放射の観測（Simons Array/GroundBIRD 実験）によるニュートリノ質量測定とインフレーション（原始重力波）の検証、ニュートリノのマヨラナ性の検証等、より根源的な問題にも挑戦した。その結果、素粒子、原子核、宇宙線、宇宙にわたる広い分野でニュートリノを基軸に多様な研究が進展した。

顕著な成果としては、陽子崩壊の探索が進展し、寿命下限値はこれまでの最高結果に比べ50%から10倍以上と大幅に拡張された。CP 対称性の破れに関しては、そのパラメータ  $\delta_{CP}$  を99.7%の有意度で制限することに成功し、Nature 誌に発表した。南極点ニュートリノ望遠鏡 IceCube データを用いた解析及びその系統誤差の理解を進め、 $v/c > 0.8$  のモノポールに対する世界最高感度での探査の結果を発表した。また、加速器を使った素粒子実験では到達できない6 PeVのニュートリノによるグラシヨウ共鳴事象の観測にも成功した。POLARBEAR 実験のデータ解析を進め、再構成した重力レンズマップとすばる/HSC の銀河サーベイから再構成した重力レンズマップを統合解析することで、 $3.5\sigma$  の有意性で相関を検出した。宇宙初期インフレーションに95% C.L. で  $r < 0.33$  の制限を与えた。理論において、物質反物質の非対称性の新たな起源の模型とニュートリノ実験の関係、大統一模型における陽子崩壊の再検討、新たなインフレーション模型の考案、新たな暗黒物質模型の考案、宇宙初期に現れる位相欠陥の新たな側面の研究、超弦理論の真空解の分類など新物理に関わる幅広い研究において成果を得た。ニュートリノ振動実験の詳細解析を行うことで、質量階層性の縮退、 $\theta_{23}$ 、CP 位相  $\delta$ 、非標準相互作用を決定できることを示した。バリオン数やレプトン数の対称性とその破れが新しい形で暗黒物質と結びつき、例えば、暗黒物質と陽子の寿命が関係する可能性を示した。レプトン数の破れに伴う南部ゴールドストーンボソンを活用してハッブル定数の不一致模型を解くことで、複数の標準模型を超えた物理を説明する模型を提案した。また、「沼地条件」と呼ばれる量子重力と有効場の理論の整合性を図る議論に関して、標準模型のヒッグス粒子のポテンシャルの性質を精査し、「沼地条件」の不備を指摘した。「沼地条件」はニュートリノの質量のタイプに関するものも存在し、今後の発展が大いに期待できる。また、全部で41の公募研究があり、多くの研究成果がでていいる。その中の一つで、当初予想できなかった革新的な成果として、すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam (HSC) で検出された  $z \sim 4$  の大規模超遠方銀河サンプルの Planck 衛星データを用いた CMB 重力レンズ効果測定及びライマンブレイク銀河の CMB 重力レンズ効果と空間クラスタリングを組み合わせることで、宇宙論パラメータの制限に成功した。

以上のように、本領域を中心に、“素粒子と宇宙” × “理論と実験” の革新的な融合が進んだ。最近では、量子重力と有効場の理論の整合性「沼地条件」という斬新なアイデアも発展してきており、21世紀の「新しい素粒子・宇宙像」の確立に向けて着実に前進している。

研究分野： 物理、素粒子、原子核、宇宙線、宇宙

キーワード： ニュートリノ

素粒子の一種で、電荷を持たない電子の仲間である。3つのタイプが存在する。物質との反応

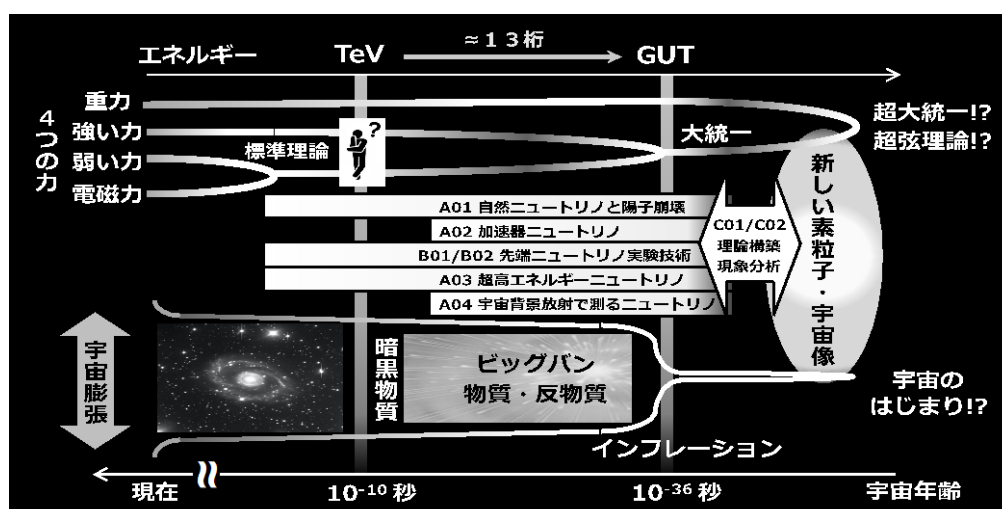
が極端に弱く、幽霊粒子と呼ばれたりもする。質量を持つことが、スーパーカミオカンデで発見された。3つのタイプ間で存在が入れ替わる現象「ニュートリノ振動」が発見されており、その性質の解明が進んでいる。

### 1. 研究開始当初の背景

今、素粒子物理学と宇宙物理学は大きな転換期にある。素粒子物理学の「標準理論」は加速器の発展により TeV のエネルギースケールまでの広い範囲で検証され、理論の予想値と実験の測定値が驚くほど良く一致している。また「標準宇宙論」は、宇宙の進化における元素合成を説明する一方で、暗黒物質・暗黒エネルギーの存在を揺るぎないものとした。しかしながら、宇宙に存在する物質・反物質非対称性の起源や暗黒物質・暗黒エネルギーの正体、インフレーションの起源、力・物質場の統一などは「標準理論」、「標準宇宙論」では説明できない。宇宙の初期から現在に至る描像を統一的に理解するには、物理学の革新となる「新しい素粒子・宇宙像」を創造する必要がある。「新しい素粒子・宇宙像」の構築には TeV のエネルギースケールを大きく超える新物理を探ることが不可避であり、この未知の領域に踏み込む研究において「ニュートリノ」が重要な鍵となる。

### 2. 研究の目的

ニュートリノを軸とし、“素粒子+宇宙” × “理論+実験” の多角的なアプローチにより、究極の素粒子・宇宙像を探っていく。ニュートリノ振動の発見（2015 年ノーベル物理学賞）によ



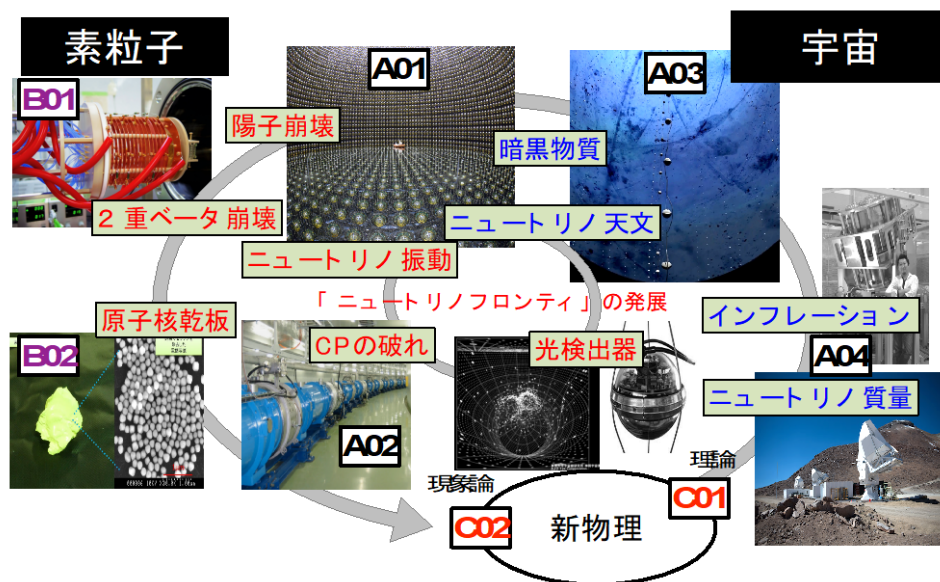
り、ニュートリノが極端に小さい質量を持ち、クォークと異なり世代間で大きく混合していることが明らかになっている。ニュートリノの性質は他の素粒子と比べて特異なものであり、標準理論を超えた枠組みと密接に関わっていると考えられる。たとえば、ニュートリノ質量起源の有力な理論と考えられている「シーソー機構」ではニュートリノの質量の小ささが大統一理論のエネルギースケールによって説明されると同時に、宇宙の物質・反物質非対称性の起源も説明が可能である。ニュートリノの研究を通して、宇宙の進化、素粒子物理学における力の統一、等の未解決問題に挑戦する。本領域の研究課題と目指す物理を上図で紹介する。

### 3. 研究の方法

本領域では、世界最先端のニュートリノ実験：スーパーカミオカンデ実験（A01 班）、T2K 実験（A02 班）、IceCube 実験（A03 班）を進め、ニュートリノ振動を研究し、粒子と反粒子の対称性の破れを探り、ニュートリノ天文学を進めていく。さらに、素粒子の統一理論と宇宙初期を調べるために、スーパーカミオカンデ実験で陽子崩壊を探索し、宇宙背景放射の観測（Simons Array / GroundBIRD 実験）（A04 班）からニュートリノ質量を測定し、インフレーション（原始重力波）の検証に挑戦する。他にも、ニュートリノのマヨラナ性の検証（B01 班）、超高解像度を持つ原子核乾板を応用した研究（B02 班）等、より根源的な問題や応用研究も展開する。さらに次世代ニュートリノ実験であるハイパーカミオカンデ実験や IceCube Gen2 実験の基幹実験技術の開発を行う。

最新の結果をもとに新しい素粒子・宇宙像を構築していく理論研究は、指導原理を使ったトップダウンで素粒子と宇宙を研究する C01 班と、実験データを吟味しボトムアップで超高エネルギー・初期宇宙の物理を探る C02 班からなる。C01 班では、ニュートリノ物理を軸に標準理論を超える物理および宇宙論の考察を進め、これまでにある力・物質の統一理論を超えた暗黒物質インフレーションまでも含む新たな究極の統一理論を目指す。C02 班では、実験グループと協力し、最新の実験データが示唆する素粒子像をボトムアップなアプローチから研究し、近年報告されている標準理論で説明されない異常事象をも説明する多様な新ニュートリノ理論を構築する。

ニュートリノを基軸にした、素粒子、原子核、宇宙線、宇宙にわたる分野を融合した研究内容であり、各研究班のイメージ図と目指す物理を次の図で紹介する。



#### 4. 研究の成果

本領域では、素粒子、原子核、宇宙線、宇宙にわたる広い分野でニュートリノを基軸に多様な研究成果が出ている。特に、素粒子と宇宙の問題を統一的に扱う多くの研究結果が出たことは、領域として期待以上の成果が挙げられていると言える。以下に研究計画班毎に、研究計画班を跨ぐ成果も含めて紹介する。

(1) A01 班： スーパーカミオカンデの性能を向上し、大気ニュートリノの観測と陽子崩壊の探索を行った。スーパーカミオカンデの性能向上に関して、ガドリニウム導入に成功、中性子検出能力を従来の 25% から倍以上に改善した。大気ニュートリノのデータと A02 班が進める T2K 実験の結果を併用することで、質量階層性は 98% の確率で逆階層を棄却した。陽子崩壊について寿命下限値を過去の結果に比べ 50% から 10 倍以上と大幅に拡張することに成功した。

さらに、ハイパーカミオカンデ計画が 2020 年に承認されたことは大きなニュースである。本研究班では、ハイパーカミオカンデ用光センサーについてガラス中の放射性物質を大幅に減らすことでダークノイズを 4k Hz 程度と半分以下とし、その性能向上に成功した。また、エレクトロニクスの性能向上も実現、ハイパーカミオカンデ検出器性能の向上に必要な開発を完了した。

(2) A02 班： T2K 実験でニュートリノ振動を測定し、粒子と反粒子の間の対称性 (CP 対称性) が破れている兆候を観測した。この結果を Nature 誌に発表し、CP 対称性の破れのパラメータを 99.7% の有意度で制限し、CP が破れていない仮説を  $2\sigma$  (95%) の有意度で排除した。さらに、ニュートリノ振動パラメータ  $\sin^2 \theta_{23} = 0.53^{+0.03}_{-0.04}$  と世界最高の精度で測定した。2022 年には、さらにデータを追加し、ニュートリノ国際会議で結果を更新している。T2K 実験と独立に新たにニュートリノと原子核反応を精密に測定するために NINJA 実験を立ち上げた。NINJA 実験でニュートリノ反応における生成粒子の多重度を測定し、後方に放出される低エネルギーの  $\pi$  中間子に理論予想との違いが見えて興味深い結果を示した。

(3) A03 班： 南極点ニュートリノ望遠鏡 IceCube 及びスーパーカミオカンデ実験による標準理論を超える物理信号探索の感度向上を目指し系統誤差の削減を目標としてきた。南極氷河中光伝搬起因の系統誤差削減に向け、次世代南極点ニュートリノ望遠鏡 IceCube-Gen2 の Phase-1 計画 (IceCube-Upgrade) に用いられる新型光検出器 D-Egg 100 台の製作、その実験室での較正を進めた。IceCube データを用いた解析及びその系統誤差の理解を進め、 $v/c > 0.8$  のモノポールに対する世界最高感度での探索の結果を論文とした。また、加速器では難しい標準理論の検証となる 6 PeV のグラシヨウ共鳴事象の観測にも成功した。スーパーカミオカンデ実験での暗黒物質間接探索として、銀河中心方向からの暗黒物質対消滅ニュートリノの探索し、10 GeV/c<sup>2</sup> 以下の領域では最もよい対消滅断面積への制限を得た。

(4) A04 班： 宇宙背景放射 CMB を使って初期宇宙観測という他計画研究と大きく異なる切り口で、本領域の目標「ニュートリノを軸とした新しい素粒子・宇宙像の創造」に貢献した。Simons Array のデータ解析準備の一環として、前身実験である POLARBEAR 実験のデータ解析を進め、再構成した重力レンズマップとすばる/HSC の銀河サーベイから再構成した重力レンズマップを統合解析することで、 $3.5\sigma$  の有意性で相関を検出できた。この領域では相関の大きさが理論予測と無矛盾だがやや大きいことが見いだされた。また、POLARBEAR 実験データの再解析により、宇宙初期インフレーションに 95% C. L. で  $r < 0.33$  の制限を与えることに成功した。

(5) B01 班： 未発見の「ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊」を、その頻度を決めるニュートリノ有効質量領域 100 meV/c<sup>2</sup> を超えて探索することができるような希ガス検出器による新

しい測定原理・技術を確立してきた。二重ベータ崩壊探索用の高圧 Xe TPC を開発し、半値全幅で 0.72% という世界最高レベルの高いエネルギー分解能を達成し、また飛跡の形状から背景事象を 1/100 に抑えられることを示した。これらにより、目標の性能を達成することに成功した

(6) B02 班： 既存の装置の 10 倍規模の新しい乳剤製造装置群を新規導入し、製造工程の作成し、運転をしながら改善を行い、製造装置群の長期稼働体制を構築した。新しい製造装置で供給する原子核乾板のユーザーが進めるニュートリノ実験 DsTau、FASER  $\nu$  と  $\gamma$  線望遠鏡 GRAINE 実験に 2021 年度に原子核乾板の供給を実現した。これらの実験は、ビーム照射を完了し、解析に入っており、プリリミナリーな結果が学会・国際会議で報告されている。また 2022 年度も、引き続き、DsTau 実験、FASER 実験、NINJA 実験に供給する原子核乾板の作成を行った。当初の計画通り、大量の原子核乾板を供給することに成功した。

(7) C01 班： 素粒子現象論、宇宙論、および弦理論を含む基礎理論をニュートリノ物理に現れる様々な対称性を通して結びつけることで既存の分野に囚われない新たな理論仮説を提案し、ニュートリノ物理で探ることの出来る新物理の範囲を広げていった。本研究期間内では、物質反物質の非対称性の新たな起源のモデルとニュートリノ実験の関係、大統一モデルにおける陽子崩壊の再検討、新たなインフレーションモデルの考案、新たな暗黒物質モデルの考案、宇宙初期に現れる位相欠陥の新たな側面の研究、超弦理論の真空解の分類など新物理に関わる幅広い研究において成果を得た。更に、量子重力と有効場の理論の整合性を図る「沼地条件」と呼ばれる議論に関して、標準モデルのヒッグス粒子のポテンシャルの性質を精査し、その不備を指摘した。「沼地条件」はニュートリノの質量のタイプに関するものも存在し、今後の発展が大いに期待できる。

(8) C02 班： 標準理論では説明できない新現象とニュートリノ物理(とその間の関係)を手がかりに、素粒子の標準理論を拡張・修正するボトムアップ型の理論研究を行い、実験からのインプットを積極活用して新しい素粒子像を切り拓いてきた。ニュートリノ振動実験の詳細解析を行うことで、質量階層性の縮退、 $\theta_{23}$ 、CP 位相  $\delta$ 、非標準相互作用を決定できることを示した。バリオン数やレプトン数の対称性とその破れが新しい形で暗黒物質と結びつき、例えば、暗黒物質と陽子の寿命が関係する可能性が示された。レプトン数の破れに伴う南部ゴールドストーンボソンを活用してハッブル定数の不一致モデルを解くことで、複数の標準モデルを超えた物理を説明するモデルを提案した。

(9) 公募研究： 「超伝導技術を利用したニュートリノ研究の新展開」、「超新星残骸における宇宙線加速限界の直接測定」、「初期宇宙のニュートリノ振動の宇宙論的研究」を含め、全部で 41 の公募研究が行われ、多くの研究成果がでている。その中の一つで、当初予想できなかった革新的な成果を紹介する。宇宙観測において、最新の多波長データを用い、高赤方偏移領域における宇宙の大規模構造からニュートリノ質量和を始めとする宇宙論パラメータに制限を付けることを進めた。すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam (HSC) で検出された  $z \sim 4$  の大規模超遠方銀河サンプル(ライマンブレイク銀河)の Planck 衛星データを用いた CMB 重力レンズ効果測定及びライマンブレイク銀河の CMB 重力レンズ効果と空間クラスタリングを組み合わせた宇宙論パラメータを制限することに成功した。結果は Physical Review Letters (PRL) 誌に発表し、Editor's suggestion や Physics Magazine の Viewpoint に選出されるなど非常に高い注目を集めた。

#### 5. 主な発表論文等 (受賞等を含む)

- 第 40 回猿橋賞：市川 温子 (京都大学 准教授・B01 研究代表者) 「加速器をもちいた長基線ニュートリノ実験によるニュートリノの性質の解明」
- 2019 年度 仁科記念賞：石原安野 (千葉大学 教授・A03 研究代表者) 「超高エネルギー宇宙ニュートリノの発見」
- "First Gadolinium Loading to Super-Kamiokande", Y. Hayato *et al.* (Super-Kamiokande Collaboration), Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1027, 166248 (2022)
- "Measurements of protons and charged pions emitted from numu charged-current interactions on iron at a mean neutrino energy of 1.49 GeV using a nuclear emulsion detector", T. Nakaya, O. Sato *et al.* (NINJA Collaboration), Phys. Rev. D 106, 032016 (2022)
- "Search for Quantum Gravity Using Astrophysical Neutrino Flavour with IceCube", A. Ishihara *et al.* (IceCube Collaboration), Nature Physics 18 1287-1292 (2022)
- "Search for Relativistic Magnetic Monopoles with Eight Years of IceCube Data", A. Ishihara *et al.* (IceCube Collaboration), Phys Rev Lett 1280, 51101 (2022)
- "Improved Upper Limit on Degree-scale CMB B-mode Polarization Power from the 670 Square-degree POLARBEAR Survey", A. Kusaka *et al.* (The POLARBEAR Collaboration), *ApJ* 931, 101 (2022)
- "First Identification of a CMB Lensing Signal Produced by 1.5 Million Galaxies at  $z \sim 4$ : Constraints on Matter Density Fluctuations at High Redshift", H. Miyatake *et al.*, Phys. Rev. Lett. 129, 061301 (2022)
- "Detection of a Particle Shower at the Glashow Resonance with IceCube", A.

- Ishihara *et al.* (IceCube Collaboration), Nature 591 220-224 (2021)
- “First neutrino interaction candidates at the LHC” , O.Sato et al. (FASER Collaboration), Phys. Rev. D 104, L091101 (2021)
  - “Resolving the Hubble tension in a  $U(1)_{L\mu - L\tau}$  model with Majoron” , J. Sato, T. Shimomura, et al., PTEP 2021, 103B05 (2021)
  - “Search for proton decay via  $p \rightarrow e + \pi^0$  and  $p \rightarrow \mu + \pi^0$  with an enlarged fiducial volume in Super-Kamiokande I-IV” , Y. Hayato *et al.* (Super-Kamiokande Collaboration), Phys. Rev. D 102, 112011 (2020)
  - “Design and performance of a high-pressure xenon gas TPC as a prototype for a large-scale neutrinoless double-beta decay search.” , A.K. Ichikawa, T. Nakaya *et al.*, Progr. of Theor. Exp. Phys. 2020, Issue 3, 033H01 (2020)
  - “Proton Decay: Flipped vs Unflipped  $SU(5)$ ” , N. Nagata *et al.*, JHEP 2005 021 (2020)
  - “Probing heavy dark matter decays with multi-messenger astrophysical data” , Koji Ishiwata *et al.*, JCAP 2001 no.01, 003 (2020)
  - “Constraint on the Matter-Antimatter Symmetry-Violating Phase in Neutrino Oscillations” , T. Nakaya *et al.* (T2K Collaboration), Nature 580 (2020) 7803, 339-344
  - “Atmospheric Neutrino Oscillation Analysis with Improved Event Reconstruction in Super-Kamiokande IV” , Y. Hayato *et al.* (SK Collaboration), Prog. Theor. Exp. Phys. 2019, 053F01
  - “Cross-correlation of CMB Polarization Lensing with High- $z$  Submillimeter Herschel-ATLAS Galaxies” , A. Kusaka *et al.* (POLARBEAR Collaboration), *Astrophys. J.* **886** 38 (2019).
  - “Minimal Gauged  $U(1)_{L\alpha - L\beta}$  Models Driven into a Corner.” , K. Tsumura et al., Phys.Rev. D99 (2019) no. 5, 055029.
  - “Evidence for the Cross-correlation between Cosmic Microwave Background Polarization Lensing from Polarbear and Cosmic Shear from Subaru Hyper Suprime-Cam” , Akito Kusaka et al., *ApJ* 882 62 (2019)
  - “Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A ” , A. Ishihara *et al.* (IceCube Collaborations), Science 361, eaat1378 (2018)
  - “Leptogenesis via Neutrino Oscillation Magic.” , R. Kitano et al, JHEP 1810 (2018) 178.
  - “Throwing away antimatter via neutrino oscillations during the reheating era” , Shintaro Eijima, Ryuichiro Kitano, Wen Yin. JCAP 03 (2020) 048
  - “The swampland conjecture and the Higgs expectation value” , Koichi Hamaguchi, Masahiro Ibe , Takeo Moroi. JHEP 1812 (2018) 023

ホームページ等

- ニュートリノで拓く素粒子と宇宙 : <https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/nucosmos>
- スーパーカミオカンデ : <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/>
- ハイパーカミオカンデ : <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/hk/>
- T2K 実験 : <https://t2k-experiment.org>
- IceCube 実験 : <https://icecube.wisc.edu>
- POLARBEAR 実験 : <https://bolo.berkeley.edu/polarbear/>
- ひっぐすたん (素粒子をマンガで説明) : <http://higgstan.com>