

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（予定）額（領域設定期間全体）：（直接経費）1,129,900,000円

研究の概要

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いく。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挑戦する。ニュートリノを軸に素粒子、原子核、宇宙線、宇宙にわたる研究分野を融合し、21 世紀の「**新しい素粒子・宇宙像**」の確立を目指す。

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

- (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破れ (CP の破れ) のパラメーターを 3σ の有意度で制限し、その結果を *Natures* 誌に発表した。CP が破れている証拠を 2σ の有意度で捉えている。
- (3) A03 班： IceCube 実験 Gen2 Phase1 に向けた新型光検出器 D-Egg の開発を進めている。また、並行して GeV 領域における大気ニュートリノモデルを高精度化した。
- (4) A04 班： 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、インフレーションモデルへの制限やニュートリノ質量に関連する結果を得た。特に、すばる望遠鏡の銀河弱レンズ効果と CMB 重力レンズ効果の相関を初めて観測に成功した。
- (5) B01 班： 二重ベータ崩壊探索用の高圧 Xe TPC を開発し、511 keV の電子に対して 1.5% の半値全幅エネルギー分解能という世界最高レベルの性能を実証した。
- (6) B02 班： 新しい原子核剤製造装置を立ち上げた。新原子核乾板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 NINJA、DsTau、FASER ν が進展している。
- (7) C01 班： 宇宙再加熱期におけるニュートリノ振動による物質反物質非対称性生成機構に着目した研究を進めた。特にインフラトンがヒッグス粒子へ崩壊するシナリオにおいては、物質反物質非対称性がニュートリノ振動の PMNS 行列の CP 位相で決定されことを明らかにした。
- (8) C02 班： 標準模型で説明できない複数の現象に注目して、それを説明するモデルの提案と検証方法を検討している。複数の標準模型を超えた現象を組み合わせることでより強いモデルの予言を与えている。
- (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 21 の公募研究が進んでいる。

5. 今後の研究計画

- (1) [ニュートリノ物理学の研究]：ニュートリノ振動を高精度で決定していく。ニュートリノ絶対質量や世代数の情報を加え、ニュートリノ質量と混合の起源の理解を進めていく。
- (2) [ニュートリノ天文学の進化の研究]：宇宙背景ニュートリノ、太陽、超新星、銀河系外天体、AGN 等からのニュートリノの観測を進めていく。
- (3) [大統一理論構築の研究]：大統一の証拠となる陽子崩壊を世界最高感度で探索する。クォークとレプトンの対称性を調べることで、大統一モデルを制限していく。
- (4) [宇宙進化史の解明]：宇宙進化の解明に向けて、原始重力波、物質・反物質非対称性の起源 (CP 対称性の破れ)、暗黒物質の崩壊と消滅の信号、宇宙背景放射 B モード、の発見を目指す。

6. 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」
- "Constraint on the Matter-Antimatter Symmetry-Violating Phase in Neutrino Oscillations", T. Nakaya *et al.* (T2K Collaboration), *Nature* 580 (2020) 7803, 339-344
- "Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A ", A. Ishihara *et al.* (IceCube Collaborations), *Science* 361, eaat1378 (2018)
- "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).
- "Leptogenesis via Neutrino Oscillation Magic.", R. Kitano *et al.*, *JHEP* 1810 (2018) 178.
- "Minimal Gauged $U(1)_{L\alpha-L\beta}$ Models Driven into a Corner.", K. Tsumura *et al.*, *Phys.Rev. D* 99 (2019) no.5, 055029.

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/>
- 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>