

令和元年6月7日現在

機関番号：82118

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2013～2017

課題番号：25105011

研究課題名(和文)ニュートリノで探る素粒子の起源と宇宙の構造

研究課題名(英文)Neutrino physics and the origin of the Universe

研究代表者

北野 龍一郎(Kitano, Ryuichiro)

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

研究者番号：50543451

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 47,700,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙の始まりには、空間の爆発的な膨張であるインフレーションが起こったとされる。その後、素粒子の生成により宇宙は熱化され、これまで138億年かけて温度が下がり続け、現在の我々の観測する姿が作られたとされる。この宇宙の歴史上、既知の素粒子理論では説明できない事実がいくつかある。本研究では、その謎である「バリオン数の起源」「暗黒物質の起源と正体」「インフレーションの仕組み」などに関しての多くの研究成果が挙げられた。宇宙初期に生成されたニュートリノの振動現象によるバリオン数生成の新しい機構を発表し、地上のニュートリノ振動実験と宇宙の成り立ちとの関連の可能性について重要な知見が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

加速器で作られたニュートリノを長距離飛ばして観測する長基線ニュートリノ振動実験や、宇宙からやってくる超高エネルギーニュートリノを捕まえるIceCube実験など、さまざまな最新実験により、ニュートリノの素粒子としての性質や、宇宙におけるニュートリノのエネルギー分布などがどんどんわかってきている。本研究では、実験結果がどのように理論を反映しているのか、また、宇宙の成り立ちとどう関係しているのか考察し、様々な知見を与えることができた。

研究成果の概要(英文)：It is now understood that the Universe has started by the inflation era where the space expands explosively. The production of particles happens after the inflation, and it thermalizes the Universe. The temperature drops as time goes, and we observe the Universe in the present form after 13.8 Billion years of histories. There are several mysteries which cannot be understood within the particle physics as we know now. In this research project, many new results are obtained for the understanding of these mysteries, such as "Baryon asymmetry of the Universe," "Nature and origin of Dark Matter," and "Mechanism of inflation." For example, it is reported that the oscillation phenomena of the neutrinos produced in the particle production era can explain the baryon asymmetry of the Universe. This new scenario directly relates the on-ground neutrino oscillation experiments and the structure of the Universe.

研究分野：素粒子論

キーワード：素粒子論

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2012年にヒッグス粒子が発見され、標準模型の足元が固まった。また、ニュートリノが3世代間で飛んでいる間に種類を変化させる振動現象が起こっていることが確立し、ニュートリノには非常に小さい質量があることがわかってきた。この非常に小さい質量は標準模型を超えた非常にミクロな世界で起こる物理の影響である可能性があり、素粒子と宇宙のさらなる理解へ向けた足がかりとなる。そこで、素粒子理論・超弦理論の若手研究者であった伊部昌宏氏、大河内豊氏とチームを組むことにより、多方面から素粒子・宇宙の理解へ向けた研究計画を立てた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ニュートリノ物理を足がかりとして、素粒子の起源や宇宙の成り立ちに関する未解決問題に取り組み、素粒子・宇宙理論の全体像に迫ることである。ニュートリノは素粒子理論、初期宇宙論において重要な鍵となる粒子であるが、その起源は謎めいている。超弦理論などの時空と関連が深い理論においてニュートリノはどのように出現するのか、また、ヒッグス機構を通じて見え隠れする標準模型を超えた物理においてニュートリノはどのような役割を担っているのか、それから、インフレーション、バリオン生成機構においてニュートリノの性質がどのように制限されるのか、これら多方向からの考察によってニュートリノ物理を深く理解し、また逆に、ニュートリノ物理から見えてくる素粒子・宇宙の全体像に迫る。

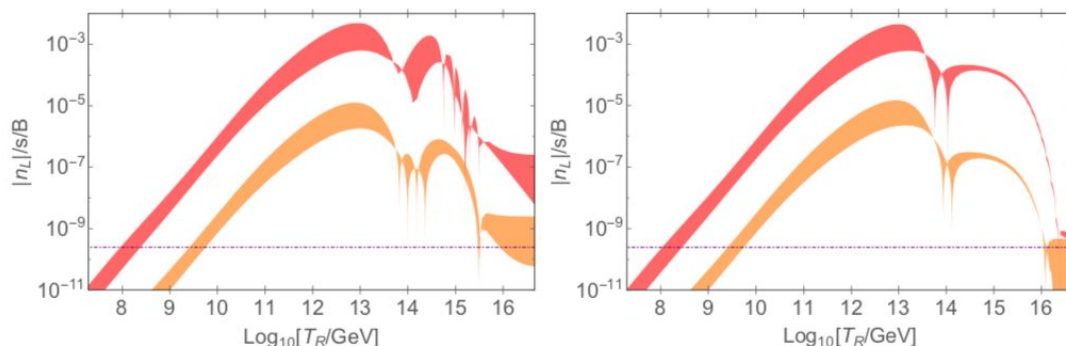
3. 研究の方法

ニュートリノに関して、多くの未解決問題が知られている。例えば、「ニュートリノは素粒子か?」「ニュートリノ同士に働く新しい力は存在するか?」「ニュートリノが見る新しい空間次元は存在するか?」「ニュートリノの質量は Dirac 型か Majorana 型か?」「ニュートリノは3世代か?」「インフレーション理論とニュートリノは関連しているか?」「宇宙のバリオン数生成はニュートリノの崩壊によって起こったのか?」「ニュートリノの質量の起源は?」「ニュートリノは超弦理論と整合性をもっているか?」などと、あげてみればキリがないほどである。そこで、本研究では、これらの問題に3つの分野「標準模型を超えた物理」「初期宇宙論」「超弦理論」からアプローチする。また、ニュートリノの起源や性質に関する新しい可能性について、多方向からの徹底的な分析から理論の検証方法を議論し、ニュートリノ実験で何を測定すべきか発信していく。

4. 研究成果

宇宙のバリオン数の起源を説明するためには、バリオン数を作る過程と壊す過程の非平衡が必要である。宇宙の歴史において、そのような非平衡期があったわけであるが、それがいつどのように起こったのか、未解決の謎である。しかし、実はインフレーションで始まったとされる宇宙には、その絶好の機会がある。インフレーション後に爆発的な粒子生成が起こり、その直後に粒子たちの散乱により熱化される。この熱化の過程は一方通行であり、様々な一方過程が起こる。

2016年に我々は、宇宙初期に生成されたニュートリノが熱化の過程でニュートリノ振動を引き起こし、そのCPの破れが宇宙のバリオン数の種となったという仮説を発表した。実際に、ニュートリノ振動実験によって得られた混合角やCP位相により、宇宙のバリオン数が説明できるという結果が得られた。下の図は、宇宙が熱化した後の温度(再加熱温度)の関数としてバリオン数密度をプロットしたもので、必要なバリオン数非対称 10^{-10} 程度が説明可能であることがわかる。



統一理論において、いくつかの異なるエネルギーをもつ真空が近年注目を浴びている。より低いエネルギーの真空(真真空)が存在すると、量子力学的な効果により、元の状態(偽真空)から低い状態(真真空)へと崩壊してしまうが、これは水の過冷却現象と本質的に同じである。我々は一連の研究において、準安定状態を用いた超対称性の破れのモデルにおける制限

や、真空崩壊の触媒を弦理論の枠組みで調べることなど、真空崩壊における新たな可能性を模索し様々な制限を提案した。また、議論を有限温度系に理論を拡張し、初期宇宙における高温状態での相転移の触媒効果を調べた。その結果、真空は温度効果で不安定となり真空崩壊が早まることがわかった。この結果は弦理論のランドスケープと呼ばれる概念を議論する上で、触媒効果は見逃すことができないことを示唆している。

暗黒物質の解明は現在の素粒子・宇宙物理学の最も重要な課題の一つである。暗黒物質の有力な候補の一つとして、宇宙初期において標準模型の粒子と熱平衡にあった暗黒物質が対消滅することで現在の暗黒物質残存量を説明することが可能ないわゆる熱的残存暗黒物質があげられる。熱的残存暗黒物質は暗黒物質残存量が対消滅断面積の大きさによって説明され、宇宙の初期条件に強く依存しないという非常に魅力的な特徴を持っている。

一方で暗黒物質の対消滅断面積の大きさには量子論のユニタリティからくる上限が存在する。対消滅断面積のユニタリティ上限と観測された暗黒物質の残存量の説明に必要な対消滅断面積を組み合わせることで暗黒物質の質量に上限が得られ、その値はおおよそ 300TeV となる。この質量は熱的残存暗黒物質のユニタリティ上限と呼ばれている。我々は、その上限を超える質量を持つ熱的残存暗黒物質模型の可能性を議論し、上限を超える熱的残存暗黒物質模型が実際に構成可能であることを示した。その鍵となるのは空間的に広がりを持った物体が対消滅する際にはトータルで各角運動量モードに対するユニタリティー上限よりも大きな断面積を持つことが可能である点である。我々は、1フレーバーの重いフェルミオンから成る SU(Nc)ゲージ理論におけるバリオンが空間的に膨張した状態に対消滅することが可能であることを示し、ユニタリティー上限を超える熱的残存暗黒物質になり得ることを示した。そのような模型では PeV を超えることも可能であり、IceCube 実験で観測されている PeV スケールのニュートリノフラックスの起源となり得ることも示した。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 80 件)

“Primordial Lepton Oscillations and Baryogenesis,” Y. Hamada, R. Kitano, J. High Energy Phys. 1611, 010 (2016)

“Thermal Effects on Decays of a Metastable Brane Configuration”, Y.Nakai, Y. Ookouchi, Phys. Lett. B762, 321 (2016).

“Thermal Relic Dark Matter Beyond the Unitarity Limit”, K. Harigaya, M. Ibe, K. Kaneta, W. Nakano and M. Suzuki, JHEP 1608 (2016) 151.

“Neutrino Universe”. T. Higaki, R. Kitano, R. Sato, J. High Energy Phys. 1407, 044 (2014).

他 76 件

〔学会発表〕(計 66 件)

“Strong CP problem on the lattice”, R. Kitano, Johns Hopkins Workshop Series on Current Problems in Particle Theory Summer 2017, “Beyond the Standard Model-Exploring the Frontier,” July. 6, 2017, Budapest, Hungary

“Decay of False Vacuum via Fuzzy Monopole in String Theory”, Y. Ookouchi, String 2015, Feb. 5, 2015, Tsukuba, Japan

他 64 件

〔図書〕(計 1 件)

大河内豊、サイエンス社、超対称性の破れ ~場の理論から弦理論まで~、2017 年、192

〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年:

国内外の別:

取得状況(計 件)

名称:

発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
<http://research.kek.jp/people/kitano/C03/>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：伊部昌宏

ローマ字氏名：(IBE, masahiro)

所属研究機関名：東京大学

部局名：宇宙線研究所

職名：准教授

研究者番号（8桁）：50599008

研究分担者氏名：大河内豊

ローマ字氏名：(OOKOUCHI, yutaka)

所属研究機関名：九州大学

部局名：基幹研究院

職名：准教授

研究者番号（8桁）：40599990

(2)研究協力者

研究協力者氏名：遠藤基

ローマ字氏名：(ENDO, motoi)

研究協力者氏名：川崎雅裕

ローマ字氏名：(KAWASAKI, masahiro)

研究協力者氏名：松本重貴

ローマ字氏名：(MATSUMOTO, shigeki)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。