

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月15日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2012

課題番号：21540260

研究課題名（和文） 宇宙の進化を記述する素粒子統一模型の構築

研究課題名（英文） Construction of unified theory for particle physics  
describing the evolution of the universe

研究代表者

浅賀 岳彦 (ASAKA TAKEHIKO)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：70419993

研究成果の概要（和文）：ニュートリノ質量、宇宙暗黒物質、および宇宙バリオン数の起源を手がかりに、標準模型を超えた新しい素粒子理論の構築について研究した。特に、質量が電弱スケールより軽い右巻きニュートリノに着目し、この新素粒子の引き起こす様々な物理現象を検討した。本研究では、右巻きニュートリノの世代間混合に起因した宇宙バリオン数生成量の新しい評価法を開発すると共に、地球大気や地上加速器で生成された右巻きニュートリノの観測可能性を議論した。

研究成果の概要（英文）：We have investigated new physics beyond the Standard Model explaining neutrino masses, dark matter and baryon asymmetry of the universe. In particular, the extension by right-handed neutrinos with masses smaller than the electroweak scale has been considered. We have discussed baryogenesis by right-handed neutrino oscillations and the direct searches of right-handed neutrinos.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子（理論）

### 1. 研究開始当初の背景

標準模型は、重力を除く素粒子間の相互作用をゲージ理論に基づいて記述する。LEP 実験などの精密測定で大きな成功を収め、エネルギー約 100GeV 以下の素粒子現象を説明する理論と考えられている。しかし、標準模型では解決できない宇宙物理の問題が示されている。つまり、暗黒エネルギーと暗黒物質の候補が含まれておらず、宇宙のバリオン数

と反バリオン数の間に非対称性を作り出す機構も存在しない。さらに、宇宙背景放射の温度揺らぎの起源を説明するインフレーション宇宙も実現できない。よって、宇宙の進化を記述するためには、標準模型を超えた新しい物理が必要であることが確実となった。

その一方で、20世紀終わりからスーパー神岡実験などによりニュートリノ振動現象が確認され、ニュートリノが質量を持つことが確実になった。標準模型では、ニュートリノ

は質量を持たないため、模型の拡張が必要不可欠である。

以上のように、宇宙物理の問題およびニュートリノ質量の起源を解明するためには、標準模型を超えた新しい物理が何かを特定し、その実験検証方法を示すことが決定的に重要であり、今世紀素粒子物理の最重要課題である。

このような背景の下、本研究では、ニュートリノ質量の起源を説明する新しい物理を手がかりに、「新しい素粒子模型」を探索する。ニュートリノ質量を説明する最も簡単な方法は、右巻きニュートリノを新たに模型に導入することである。我々は、導入する右巻きニュートリノの質量が約 100GeV 以下とした時、ニュートリノ質量の問題だけでなく、宇宙の暗黒物質の起源、そしてバリオン数非対称性の起源を同時に解決することを示した。この単純な拡張模型は nuMSM (neutrino Minimal Standard Model) 模型と呼ばれる。この模型では、一番軽い右巻きニュートリノが暗黒物質となり、右巻きニュートリノの振動現象に起因してバリオン数の非対称性が生成される。

## 2. 研究の目的

本研究では、我々のこれまでの業績を踏まえた上で、「軽い右巻きニュートリノ」をキーワードにして、宇宙物理の問題点を解決し、宇宙の進化を記述する新しい素粒子統一模型の構築を目指す。さらには、実験・観測により「軽い右巻きニュートリノ」の存在を確かめ、模型の検証をも目指す。上記の目標を実現するための具体的研究課題として、主要な3つを以下で説明する。

### (1) 右巻きニュートリノに対する制限

本研究の主役である「軽い右巻きニュートリノ」の可能な質量領域、および相互作用を明らかにする。そのために、これまでに行われてきた地上実験での探索制限、および宇宙物理からの制限を総括的に調査する。これらの制限から許される質量および相互作用の強さを示すと共に、模型の許されるパラメータ領域を定量的に評価する。

### (2) 右巻きニュートリノと宇宙バリオン数

本研究で考察する「軽い右巻きニュートリノ」は、その世代間振動に起因して、宇宙バリオン数を生成することが可能である。このバリオン数生成機構に関し、以下の2つの課題に取り組む。

これまでの生成量の評価方法には不満足点が数多く存在する。そこで最初に、評価方法の改良について研究を実施し、より正確な生成量の評価を可能にする。

次に、宇宙バリオン数生成量と模型パラメータとの相関を明らかにする。特に、観測可能なニュートリノ質量、混合角および CP 位相との相関を明らかにする。これらの結果は、地上実験によるバリオン数生成機構の間接検証のための重要な鍵となる。

### (3) 右巻きニュートリノの実験検証

本研究では、その質量が電弱スケール以下の「軽い右巻きニュートリノ」を考察する。よって、質量の軽さから実験で生成され直接検証が可能である。この点は、これまでの数多くの先行研究との決定的な違いである。

これまでにも右巻きニュートリノによって、ニュートリノ質量と宇宙バリオン数を同時に解決する枠組みが提示されてきた。ここでは、レプトン数生成機構と呼ばれる右巻きニュートリノ崩壊に起因したバリオン数生成機構が考えられてきた。この場合、要求される右巻きニュートリノの質量は  $10^{10}$ GeV 程度以上であり、地上実験での生成は不可能である。

そこで本研究では、様々な実験を用いた「軽い右巻きニュートリノ」観測可能性を重点的に調査する。特に、稼働を開始した LHC 実験などの高エネルギー加速器実験だけでなく、J-PARC 実験などにおける中間子崩壊から生成される右巻きニュートリノ探索についても研究を行う。

## 3. 研究の方法

本研究では、暗黒物質、および宇宙バリオン数の起源などの標準模型の抱える宇宙物理の問題を解決する新しい素粒子物理を探し出す。特に、質量が 100GeV 以下の「軽い右巻きニュートリノ」をキーワードとして、宇宙の問題を解決し、その進化を記述する「新しい素粒子統一模型」の構築を行う。

研究の第一段階として、これまでの実験・観測から矛盾せず、暗黒物質・宇宙バリオン数を説明する模型のパラメータ領域を明らかにする。第二段階として、得られた結果を基に、「軽い右巻きニュートリノ」の実験・観測による検証について考察する。

以下に「2. 研究の目的」で提示した各項目についての研究の方法・計画を述べる。

### (1) 右巻きニュートリノに対する制限

本研究では特に、ニュートリノ質量と宇宙バリオン数を同時に説明する2つの右巻きニュートリノに対する実験・観測からの制限を調べ上げる。過去に行われてきた中間子崩壊からの右巻きニュートリノ探索結果を調べ上げ、相互作用の強さの上限を求める。さらには、宇宙物理からの制限を考察する。特に、元素合成からの制限である、右巻きニュート

リノの寿命に対する上限を評価する。

これらの制限を有機的に統合し、許される模型のパラメータ領域を解明する。特に、許される右巻きニュートリノの質量下限を評価することを目指す。

#### (2) 右巻きニュートリノと宇宙バリオン数

本研究では、右巻きニュートリノの世代間振動に起因するバリオン数生成機構を考察し、以下の二つの課題に取り組む。

最初にこれまでの評価方法の不満足点を改良する。本生成機構では、右巻きニュートリノの生成・消滅過程だけでなく、世代間振動を同時に扱うため、密度行列を用いた定式化が要求される。しかし先行研究では、密度行列の運動量依存性は無視した近似が取られ、その妥当性は正確に議論されていなかった。そこで本研究では、密度行列の運動量依存性を取り入れた評価方法を確立する。

第二に、バリオン数生成量と模型のパラメータとの相関関係を明らかにする。特に、振動実験から詳細に測定されているニュートリノ質量、混合角との相関関係を数値だけでなく、解析的にも評価する。さらに、レプトンセクターでの CP 対称性の破れとの相関を調べ、将来のニュートリノ振動での CP 対称性の破れの実験へのインパクトを議論する。

#### (3) 右巻きニュートリノの実験検証

様々な実験を用いた「軽い右巻きニュートリノ」の検証可能性について検討する。想定している実験は、以下の通りである。

①高エネルギー加速器実験である LHC 実験における右巻きニュートリノ探索の可能性を議論する。

②地球大気で生成された右巻きニュートリノをスーパー神岡実験で探索する手法を考察する。

③T2K 実験などの加速器により生成された右巻きニュートリノを検出器で探索する可能性を探る。

以上の研究課題を横断的に実施することにより、新しい素粒子「軽い右巻きニュートリノ」の存在を明らかにし、標準模型を超えた新しい素粒子理論の枠組みを提示する。

### 4. 研究成果

(1) 質量が、 $\pi$ , K 中間子よりも軽い右巻きニュートリノの相互作用の振る舞いを詳細に調べ、その地上実験からの制限および宇宙元素合成から制限を考察した。これまでの先行研究では、質量が  $\pi$  中間子より軽い右巻きニュートリノは否定されていた。我々は、現存する探索実験の制限を回避しつつ、寿命を短くする機構を発見した。その結果、質量が

34MeV から  $\pi$  中間子質量までの軽い右巻きニュートリノの存在が許されることを発表した。この研究成果は、今後の  $\pi$  中間子崩壊による右巻きニュートリノ探索実験に対して大きなインパクトを与えた。

さらに、軽い右巻きニュートリノがニュートリノを伴わない 2 重ベータ崩壊への寄与を定量的に評価した事である。その結果、右巻きニュートリノの質量が 1 GeV 程度以下の場合には非常に重要な寄与、つまり標準模型に存在する 3 つの左巻きニュートリノの寄与を打ち消す効果を与えることを示した。この研究結果により、「nuMSM」模型では近い将来における 2 重ベータ崩壊実験における検証が困難であることを指摘した。

(2) 右巻きニュートリノ世代間振動に起因した宇宙バリオン数生成量と模型パラメータの相関を明らかにした。我々は、バリオン数生成量を数値的および解析的に評価する方法を確立した。特に解析的な評価式は非常に重要な研究成果であり、その結果、物質創成量のニュートリノパラメータ（質量、混合角および CP 位相）依存性が明らかとなり、「宇宙物質・反物質非対称性」の起源解明へ向けて大きく前進した。

具体的な研究成果としては、模型のパラメータの一つである  $\omega$  が実数の場合を考察した。特に、ニュートリノ質量が階層的な場合と逆階層的な場合を比べると、一般的には後者は約 5% 程度生成量が小さいことが判明した。一方、階層的な質量の場合、混合角  $\theta_{23}$  が 45 度および  $\theta_{13}$  が 0 度となると生成量が消滅する事を見つけた。よって、将来の振動実験によりこれらの混合角が詳細に測定されると、宇宙物質生成の観点からニュートリノ質量の階層性について大きな手がかりが得られる。

(3) 「軽い右巻きニュートリノ」による宇宙バリオン数生成を記述する際、その生成消滅過程だけでなく世代間混合の効果を取り入れる必要があるため、密度行列を用いた定式化が用いられる。我々は世界で初めて、ニュートリノ密度行列の運動量依存性を明らかにした。そのために粒子生成消滅率に対する運動量依存性を計算し、様々な運動量モードに対する密度行列の発展方程式を数値的に解析した。その結果、密度行列の運動量依存性は熱平衡分布と比較して大きく歪む事が判明した。その理由は、高運動量モードは生成率が抑制され、反対に低運動量モードは生成が加速されるためである。我々は運動量依存性を考慮した密度行列の発展方程式を解くことにより、宇宙バリオン数生成量のより正確な評価を行うことに成功した。

(4)「軽い右巻きニュートリノ」の実験観測による検証可能性についても検討した。我々は地球大気中で生成される「軽い右巻きニュートリノ」がスーパー神岡実験の検出器内で崩壊するシグナルを見いだす可能性について考察した。我々は先行研究では考慮されていなかった、右巻きニュートリノの質量が大気での生成率および検出器内での崩壊率に与える影響を定量的に評価した。さらに、スーパー神岡実験におけるシグナルの特徴を見いだすために、右巻きニュートリノの崩壊から発生する電子・陽電子対のエネルギー和の分布とその opening angle 分布を求め、実験でシグナルとバックグラウンドを区別するための方法を提示し、今後のスーパー神岡実験での観測・解析にたいして大きなインパクトを与えた。

(5)最後に、加速器ニュートリノ実験における右巻きニュートリノの検証可能性について研究を進めた。特に、日本で実施されている T2K 実験を想定し、その前方検出器での探索方法について考察した。J-PARC 実験施設において、陽子線がカーボンターゲットと衝突することにより生じる右巻きニュートリノ生成量、特に運動量と角度分布を定量的に評価した。そして、T2K 実験の前方検出器でシグナルとなる右巻きニュートリノの崩壊モードを見いだした。その結果、T2K 実験における右巻きニュートリノ探索感度を示し、先行実験 PS191 より優位な感度を持っていることを示した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① T. Asaka and H. Nagao, “Non-perturbative Corrections to Particle Production from Coherent Oscillation”, Progress of Theoretical Physics 124 (2010) 293-314 (査読有). DOI: 10.1143/PTP.124.293
- ② T. Asaka and H. Ishida, “Baryogenesis via sterile neutrino oscillation and neutrino parameters”, Progress in particle and nuclear physics 64 (2010) 390-392 (査読無). DOI: 10.1016/j.pnnp.2009.12.056
- ③ T. Asaka and H. Ishida, “Flavour Mixing of Neutrinos and Baryon Asymmetry of the Universe”, Physics Letters B692 (2010) 105-113 (査読有). DOI: 10.1016/j.physletb.2010.07.016
- ④ T. Asaka, S. Eijima and H. Ishida,

“Mixing of Active and Sterile Neutrinos”, Journal of High Energy Physics 1104 (2011) 011, 30pages, (査読有).

DOI: 10.1007/JHEP04(2011)011

⑤ T. Asaka, S. Eijima and H. Ishida, “Kinetic Equations for Baryogenesis via Sterile Neutrino Oscillation”, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 1202 (2012) 021, 22pages, (査読有).

DOI: 10.1088/1475-7516/2012/02/021

⑥ T. Asaka and A. Watanabe, “Atmospheric Sterile Neutrinos”, Journal of High Energy Physics 1207 (2012) 112, 23pages, (査読有).

DOI: 10.1007/JHEP07(2012)112

⑦ T. Asaka, S. Eijima and A. Watanabe, “Heavy neutrino search in accelerator-based experiments”, Journal of High Energy Physics 1303 (2013) 125, 26pages, (査読有).

DOI: 10.1007/JHEP03(2013)125

[学会発表] (計 21 件)

① 浅賀岳彦, “Neutrino masses, dark matter, and baryon asymmetry of the universe”, The 8th Particle Physics Phenomenology Workshop (PPP8), 2009 年 5 月 21 日, NCKU, Tainan, Taiwan.

② 浅賀岳彦, “Baryogenesis via Sterile Neutrino Oscillation and Neutrino Parameters”, The 31th International School of Nuclear Physics, 2009 年 9 月 20 日, 平成 21 年 9 月 20 日 Erice-Sicily, Italy.

③ 浅賀岳彦, “Baryogenesis via Sterile Neutrino Oscillation and Neutrino Parameters”, 2009 年 11 月 19 日, Luxor, Egypt.

④ 石田裕之, 浅賀岳彦, “Low energy CP violation in  $\nu$  sector and baryogenesis via sterile  $\nu$  oscillation”, The Cosmo International Conference on Particle Physics and Cosmology (Cosmo09), 2009 年 9 月 7 日, CERN, Switzerland.

⑤ 長尾浩明, 浅賀岳彦, “Particle Production from Coherent Oscillation”, DESY Theory Workshop “Collider Phenomenology”, 2009 年 10 月 1 日, DESY, Hamburg, Germany.

⑥ 石田裕之, 浅賀岳彦, “Baryogenesis via Sterile Neutrino Oscillation and Neutrino Parameters”, 日本物理学会 第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 21 日, 岡山大学.

⑦ 長尾浩明, 浅賀岳彦, “Right-handed neutrino from inflaton decay as Dark Matter candidate”, 日本物理学会 第 65 回

年次大会, 2010年3月21日, 岡山大学.

⑧永島伸多郎, 浅賀岳彦, “Search for sterile neutrino in pion decay”, 日本物理学会 第65回年次大会, 2010年3月23日, 岡山大学.

⑨浅賀岳彦, “Light Sterile Neutrinos and Baryon Asymmetry of the Universe”, The 16th International Symposium on Particles, Strings and Cosmology (PASCOS2010), 2010年7月22日, Valencia, Spain.

⑩浅賀岳彦, “Neutrino masses and baryogenesis by light right-handed neutrinos”, Workshop on Out-of-Equilibrium Quantum Fields in the Early Universe, 2010年9月8日, Aachen, Germany.

⑪石田裕之, 浅賀岳彦, “Flavour Mixing of Neutrinos and Baryon Asymmetry of the Universe”, 第65回日本物理学会, 2010年9月13日, 九州工業大学.

⑫永島伸多郎, 浅賀岳彦, “軽いステライルニュートリノの存在検証”, 第65回日本物理学会, 2010年9月14日, 九州工業大学.

⑬石田裕之, 浅賀岳彦, “Neutrinoless Double Beta Decays in the  $\nu$ MSM”, 平成22年度 日本物理学会新潟支部 第39回例会, 2010年12月4日, 長岡技術科学大学.

⑭永島伸多郎, 浅賀岳彦, “Search for sterile neutrinos in meson decays”, 平成22年度 日本物理学会新潟支部 第39回例会, 2010年12月4日, 長岡技術科学大学.

⑮浅賀岳彦, “Probing sterile neutrinos in meson decays”, International Conference on “From the Planck scale to the Electroweak Scale” (PLANCK 2011), 2011年6月1日, リスボン、ポルトガル

⑯石田裕之, 浅賀岳彦, “Momentum Dependence of Density Matrices in Baryogenesis via Neutrino Oscillation”, 日本物理学会 第67回年次大会, 2011年3月27日, 関西学院大学.

⑰永島伸多郎, 浅賀岳彦, “Right-handed neutrinos in meson decays”, 日本物理学会 第67回年次大会, 2011年3月27日, 関西学院大学.

⑱浅賀岳彦, “Probing baryon asymmetry by light right-handed neutrinos”, Neutrino Oscillation Workshop MMXII (NOW2012), 2012年09月12日, Italy.

⑲浅賀岳彦, “Dark Matter and Baryon Asymmetry in the  $\nu$ MSM”, SNOWDARK2013, 2013年03月23日, USA.

⑳永島伸多郎, 浅賀岳彦, “軽い右巻きニュートリノによるニュートリノ質量と宇宙バリオン数非対称性”, 日本物理学会 第68回年次大会, 2013年03月29日, 広島大学.

㉑武田一浩, 浅賀岳彦, “重いニュートリノ

の崩壊によるエンタロピー生成”, 日本物理学会 第68回年次大会, 2013年03月26日, 広島大学.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

浅賀 岳彦 (ASAKA TAKEHIKO)  
新潟大学・自然科学系・准教授  
研究者番号: 70419993

### (2) 研究分担者

谷本 盛光 (TANIMOTO MORIMITSU)  
新潟大学・自然科学系・教授  
研究者番号: 90108366

中野 博章 (HIROAKI NAKANO)  
新潟大学・自然科学系・准教授  
研究者番号: 60262424