

## 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 27 日現在

機関番号：13301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22740137

研究課題名（和文） ニュートリノ質量と素粒子的宇宙論の諸問題を説明する標準模型の拡張理論

研究課題名（英文） Extended standard model with neutrino masses and dark matter

## 研究代表者

青木 真由美 (AOKI MAYUMI)

金沢大学・数物科学系・助教

研究者番号：70425601

研究成果の概要（和文）：標準模型の枠内では、ニュートリノ質量や暗黒物質の正体を説明することが出来ず、標準模型の拡張が必要とされている。ニュートリノ質量を輻射補正で生成する輻射シーソー模型は、TeV スケールに新物理があることが期待できるため、検証可能な模型として有望である。また、輻射シーソー模型には、暗黒物質候補を自然と含むものが存在する。本研究では、輻射シーソー模型の検証可能性を多方面から議論した。その結果、将来実験においてその特徴的な性質が検証可能であることを示した。

研究成果の概要（英文）：Tiny neutrino masses and dark matter are beyond the scope of the standard model, so that an extension of the standard model is required to explain these phenomena. The radiative seesaw models can explain the neutrino masses by radiative corrections due to TeV-scale physics and some of them contain dark matter candidates. We studied phenomenological aspects of these models. It was found that such models are tested by future experiments.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	1,900,000	570,000	2,470,000

研究分野：素粒子論

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：ニュートリノ，暗黒物質

## 1. 研究開始当初の背景

ニュートリノは微小な質量を持つ素粒子であるが、標準模型の枠内ではニュートリノに質量を持たせる機構が存在せず、ニュートリノ質量を説明することができない。一方、暗黒物質は宇宙のエネルギーのおよそ4分の1を占めているが、その正体は明らかとはなっ

ておらず、標準模型でそのような暗黒物質を説明することはできない。このようにニュートリノ質量や暗黒物質の正体を説明するためには、標準模型を超えた新たな理論が必要となる。

ニュートリノ質量を説明する新物理として、輻射補正によってループレベルでニュートリノ質量を生成する機構が提案されている。こ

の機構を伴った模型（輻射シーソー模型）では、輻射補正による抑制因子がかかるため新物理のスケールを TeV スケール程度にまで下げることが可能であり、加速器実験での検証が期待できる。

右巻きニュートリノ等を含む輻射シーソー模型では、ツリーレベルでニュートリノ質量が生成されるのを避けるため、 $Z_2$  対称性などの離散対称性が課せられる。この対称性は同時に、暗黒物質の安定性を保証する対称性であると考えられる。つまり、輻射シーソー模型に課せられた離散対称性のもとで奇である最も軽い中性粒子が暗黒物質の候補となりうる。このとき、例えば  $Z_4$  対称性や  $Z_2 \times Z_2$  対称性のような  $Z_2$  対称性よりも大きな離散対称性が課せられた場合には、複数の安定粒子が存在し、暗黒物質が複数種類の粒子から形成される可能性がある。

ニュートリノ質量を説明する輻射シーソー模型は、加速器実験での検証が期待できるだけでなく、暗黒物質の物理とも深く結びついている可能性があり非常に興味深い模型である。よって様々な角度から模型を検証し、その妥当性を追求していくことは重要であると考え、本研究の着想に至った。

## 2. 研究の目的

(1) 輻射シーソー模型の検証可能性を探るため、模型の持つ拡張ヒッグスセクターとマヨラナ性の2つの性質に注目する。輻射シーソー模型は、標準模型のヒッグス二重項に加え、新たなスカラー場を含むことが多い。また、右巻きニュートリノのマヨラナ質量項等はレプトン数の破れの起源となる。そこで、加速器実験におけるこれらの性質の検証可能性を定量的に議論することを目的とした。

(2) 離散対称性が課されていない輻射シーソー模型の枠組みでは、暗黒物質の候補となる粒子が存在しない。そこで、輻射シーソー模型を拡張し、暗黒物質粒子を预言するような模型の構築を試みる。その方法として、階層性問題を解決することで知られている超対称性理論への拡張を考える。超対称性理論には、陽子崩壊を避けるために、R パリティと呼ばれる離散対称性が課せられており、その対称性のもとで奇の最も軽い中性粒子が暗黒物質の候補となりうる。超対称性理論への拡張により、ニュートリノ質量と暗黒物質の両者を説明しうる新たな模型の構築を目指した。

(3) 輻射シーソー模型に課せられている離散対称性のうち最もシンプルなのは  $Z_2$  対称性であるが、もし模型が2つ以上の  $Z_2$  対称性や、 $Z_4$  対称性のようなより大きな対称性を持つ場合には、それに伴い複数の暗黒物質粒子が存

在する可能性がある。そのような場合には、暗黒物質が一種類のときには起こりえない新しいタイプの対消滅反応（非標準対消滅反応）が起こり得て、ボルツマン方程式の振る舞いが大きく変わりうる。そこで、輻射シーソー模型を拡張し、多成分暗黒物質を预言する具体的な模型を構築し、ボルツマン方程式の振る舞いを解析することで、暗黒物質の残存量にどのような影響をもたらすかを議論した。

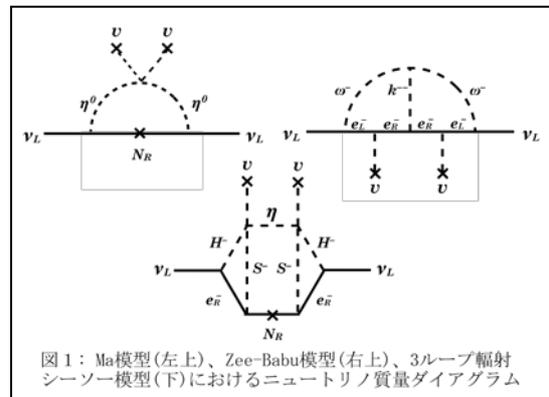
## 3. 研究の方法

(1) 以下の①から③の3つの輻射シーソー模型に注目し、拡張ヒッグスセクターとマヨラナ性についての議論を行った。それぞれの模型におけるニュートリノ生成ダイアグラムを図1に示す。

① Ma 模型： $Z_2$  奇の右巻きニュートリノとスカラー二重項を標準模型に加えることで、1ループのダイアグラムでニュートリノ質量を生成する。

② Zee-Babu 模型：2つの荷電スカラー場を導入した模型で、2ループのダイアグラムでニュートリノ質量を生成する。

③ 3ループ輻射シーソー模型：ニュートリノ質量と暗黒物質および電弱バリオン数生成機構に必要な1次相転移を実現する模型であり、 $Z_2$  奇の右巻きニュートリノとスカラー場を含む。



それぞれの模型に対し、実験や観測と矛盾しないパラメータにおいて、線形加速器実験における模型の検証可能性を議論した。特に、荷電スカラー場の対生成過程に注目し、その断面積を評価した。また、マヨラナ性の検証については、電子-電子衝突型線形加速器を用いた議論を行った。

(2) 2ループの輻射シーソー模型である Zee-Babu 模型は、離散対称性を伴っておらず、暗黒物質となる粒子は存在しない。そこで、Zee-Babu 模型を超対称性理論に拡張して、R パリティ奇であるニュートラリーノが暗黒物質となる模型を構築した。超対称性化した模

型では、ニュートリノ質量を生成する新たなダイアグラムが存在するため、それらの寄与を取り入れ、ニュートリノ質量や混合角を解析した。また、暗黒物質の残存量が観測値と矛盾しないパラメータ領域を求め、加速器実験におけるモデルの検証可能性について議論した。

(3) 離散対称性が課された輻射シーソーモデルである Ma 模型を超対称性化したモデルでは、複数の暗黒物質粒子が存在する。そこで、特に  $Z_2$  対称性と R パリティのもとで奇であるイナートヒッグシーノが暗黒物質の一つである場合に注目し、モデルの妥当性を議論した。

一方、Ma 模型に 2 つの暗黒物質を加え、新たに  $Z_2$  対称性を課したシンプルな拡張モデルにおいて、3 種類の暗黒物質が寄与する対消滅過程を解析し、生成される単色ニュートリノの検出率を見積もった。

#### 4. 研究成果

(1) Ma 模型、Zee-Babu 模型および 3 ループ輻射シーソーモデルの 3 つのモデルに対し、線形加速器実験における荷電スカラー場の対生成を議論した。その結果、断面積の角度分布やジェットの不変質量分布などを解析することによって、各モデルの荷電スカラー場が検出可能であることを示した。一方、マヨラナ性については、電子-電子を衝突させる線形加速器を用いて議論を行い、図 2 に示すように、3 ループ輻射シーソーモデル (AKS 模型) では、マヨラナ性を拾う荷電スカラー対生成のシグナルが顕著に大きくなり、その検証が可能であることがわかった。

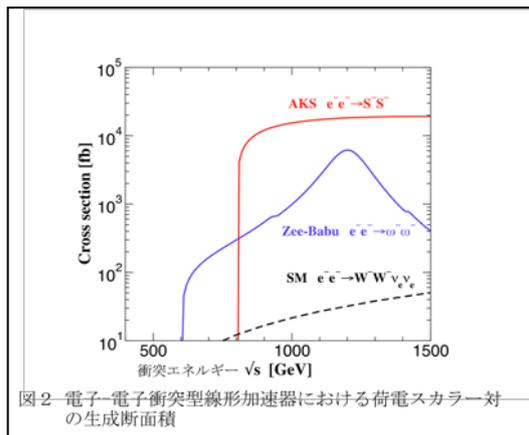


図2-電子-電子衝突型線形加速器における荷電スカラー対の生成断面積

(2) Zee-Babu 模型に超対称性を課すことで、暗黒物質を伴う新たな輻射シーソーモデルを提案し、ニュートリノ実験や暗黒物質の観測結果に抵触しないモデルを完成させることができた。このモデルでは、電荷 2 のフェルミオン場が予言されることが特徴的であり、それらの検出が LHC 加速器実験で可能であることを

示した。

(3) 複数の暗黒物質候補を含む超対称性 Ma 模型においてイナートヒッグシーノが暗黒物質の一つである場合に注目し、ニュートリノ質量や暗黒物質の残存量を解析し、実験や観測に矛盾しないパラメータ領域を示した。最小超対称性理論では、暗黒物質であるニュートラリーノが許されるパラメータ領域は非常に狭いが、Ma 模型の枠組みを取り入れることで、ニュートラリーノがイナートヒッグシーノに対消滅する過程が新たに許される可能性があり、その効果によりパラメータ領域が広がることがわかった。

一方、Ma 模型に 2 つの暗黒物質粒子を加えることで 3 種類の暗黒物質が予言されるシンプルな拡張モデルを議論した。ボルツマン方程式を数値的に解くことによって、非標準対消滅過程が暗黒物質の残存量を大きく変えうることを示した。また、多成分暗黒物質の存在は、暗黒物質の直接検出の可能性にも影響を与えることが定量的にわかった。さらに、非標準対消滅過程によって放出されるニュートリノの検出可能性を議論し、それが多成分暗黒物質の大きなヒントを与えることを示した。

今後は、複数の暗黒物質を予言する超対称性を課さない新しいモデルの構築を目指したい。さらに、本研究では簡単のため無視してきた非標準対消滅過程をも取り入れた議論を展開していきたいと考えている。

#### 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 11 件)

- ① M. Aoki, M. Duerr, J. Kubo and H. Takano, Multi-Component Dark Matter Systems and Their Observation Prospects, 査読有, Phys. Rev. D86 (2012) 076015  
DOI: 10.1103/PhysRevD.86.076015
- ② M. Aoki, J. Kubo, T. Okawa and H. Takano, Impact of Inert Higgsino Dark Matter, 査読有, Phys. Lett. B707 (2012) 107, DOI: 10.1016/j.physletb.2011.12.012
- ③ M. Aoki, S. Kanemura, T. Shindou and K. Yagyu, Decoupling property of the supersymmetric Higgs sector with four doublets, 査読有, JHEP 1111(2011) 038 DOI: 10.1007/JHEP11(2011)038
- ④ M. Aoki, S. Kanemura and K. Yagyu, Triviality and vacuum stability bounds in the three-loop neutrino mass model, 査読有, Phys. Rev. D83

(2011) 075016

DOI: 10.1103/PhysRevD.83.075016

- ⑤ M.Aoki, S.Kanemura, T.Shindou and K.Yagyu, An R-parity conserving radiative neutrino mass model without right-handed neutrinos, 査読有, JHEP 1007 (2010) 084  
DOI: 10.1007/JHEP07(2010)084
- ⑥ M.Aoki and S.Kanemura, Probing the Majorana nature of TeV-scale radiative seesaw models at collider experiments, 査読有, Phys. Lett. B 689 (2010) 28  
DOI: 10.1016/j.physletb.2010.04.024

〔学会発表〕(計 10 件)

- ① 青木真由美, 久保治輔, 高野浩, 多成分暗黒物質を含む輻射シーソー模型とフェルミ衛星観測のガンマ線超過, 2013 年 3 月 26 日, 日本物理学会第 69 回年次大会, 広島大学 (広島県)
- ② 青木真由美, M.Durr, 久保治輔, 高野浩, Multi-Component Dark Matter System with non-standard annihilation processes of Dark Matter, 2012 年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会, 2012 年 12 月 1 日, 金沢大学 (石川県)
- ③ 青木真由美, M.Durr, 久保治輔, 高野浩, Multi-Component Dark Matter System with non-standard annihilation processes of Dark Matter, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2012 年 9 月 14 日, 京都産業大学 (京都府)
- ④ 青木真由美, 久保治輔, 大川泰志, 高野浩, 超対称輻射シーソー模型におけるイナートヒッグシーノ暗黒物質の影響, 2011 年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会, 2011 年 11 月 26 日, 富山大学 (富山県)
- ⑤ 青木真由美, 兼村晋哉, 柳生慶, ハイパー荷  $3/2$  のアイソスピン二重項スカラー場を伴うヒッグス模型とその現象論, 日本物理学会秋季大会, 2011 年 9 月 18 日, 弘前大学 (青森県)
- ⑥ 青木真由美, 久保治輔, 大川泰志, 高野浩, SUSY Radiative Seesaw Model With GUT Boundary Condition, 日本物理学会秋季大会, 2011 年 9 月 17 日, 弘前大学 (青森県)
- ⑦ 青木真由美, 兼村晋哉, 進藤哲央, 柳生慶, Phenomenology of an R-parity conserving two-loop radiative seesaw model, 日本物理学会第 66 回年次大会, 2011 年 3 月 25 日, 新潟大学 (新潟県)
- ⑧ 青木真由美, 高野浩, 温かい暗黒物質と

冷たい暗黒物質を伴う超対称輻射シーソー模型, 日本物理学会第 66 回年次大会, 2011 年 3 月 27 日, 新潟大学 (新潟県)

- ⑨ 青木真由美, 高野浩, 輻射シーソー模型における温かい暗黒物質の可能性について, 2010 年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会, 2010 年 11 月 28 日, 富山大学 (富山県)
- ⑩ 青木真由美, 兼村晋哉, 進藤哲央, 柳生慶, ニュートリノ質量, 暗黒物質, バリオン数生成を説明する TeV スケール超対称輻射シーソー模型, 2010 年 9 月 14 日, 日本物理学会秋季大会, 九州工業大学 (福岡県)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

青木 真由美 (AOKI MAYUMI)  
金沢大学・数物科学系・助教  
研究者番号: 70425601

### (2) 研究分担者

該当なし

### (3) 連携研究者

該当なし