

# Inflation and baryon number asymmetry in an extended radiative seesaw model

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2297/45361">http://hdl.handle.net/2297/45361</a>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



拡張輻射ニュートリノ質量生成模型における  
インフレーションとバリオン数生成  
Inflation and baryon number asymmetry in an  
extended radiative seesaw model

金沢大学自然科学研究科数物科学専攻  
柏瀬 翔一

## Abstract

Although Higgs boson has been found at the LHC, the standard model has serious problems from experimental and observational standpoints: neutrino masses, dark matter and baryon asymmetry of the Universe. A radiative seesaw model is known as a candidate which could explain neutrino masses and existence of dark matter simultaneously. In addition, in this model, the sufficient baryon number asymmetry could be generated through resonant leptogenesis at TeV scale. We estimate the baryon number asymmetry and discuss the prospects in the dark matter direct search experiments. In addition to three problems, inflation should also be explained since the recent Cosmic Micro Wave Background observations suggest the existence of the inflationary era at the early stage of the Universe. Thus, we extend it by two real singlet scalars with hierarchical non-minimal couplings with the Ricci scalar. One of these two could work for inflation without any problems. We show that it also gives a favorable solution for both neutrino masses and baryon number asymmetry in the Universe.

近年のヒッグス粒子の発見は、標準模型が電弱スケールまでの物理現象を説明するモデルであることを示している。その一方で、いくつかの実験によって、このモデルの枠組みで説明できない問題が明らかになっており、標準模型を越えるモデルの構築が研究されている。本研究では、その中で以下の問題について取り扱う。

#### 1. ニュートリノ振動

1998年のニュートリノ振動現象の観測によってニュートリノの質量の存在が明らかになった。標準模型フェルミオンはヒッグス機構によって質量を獲得するが、ニュートリノについてはその質量が厳密にゼロであり、ニュートリノ振動現象は起こりえない。そのため、ニュートリノに質量を与える機構が必要となる。

#### 2. 暗黒物質の存在

銀河団を構成する銀河の軌道速度から銀河団全体の質量が光学的に観測される物質質量に比べて大きいことが明らかになり、1933年にツビッキーによって暗黒物質の存在が指摘された。その後、観測技術の発展により、暗黒物質の存在を示唆する様々な観測結果が得られており、標準模型の粒子とは異なる性質を持つことがわかっている。したがって、暗黒物質となる新たな粒子をモデルに導入する必要がある。

#### 3. 宇宙のバリオン数非対称性

現在、我々の身のまわりにあるものは物質であり、反物質はほとんど存在しない。このような粒子-反粒子非対称性はインフレーション後に生成されたと考えられる。なぜなら、宇宙の初期条件としてバリオン数非対称だったとしても、インフレーション後の再加熱時に標準宇宙論における全エントロピーが生成されるため、これによって薄められてしまうからである。したがって、このような非対称性が素粒子的な要因によって生じたものだとすると、標準模型ではこのような非対称性を生み出す機構が不十分なため、モデルを拡張する必要がある。

#### 4. インフレーション

標準宇宙論は軽元素合成比を説明し大きな成功を収めた。その一方で、地平線問題や平坦性問題のような標準宇宙論では説明できない問題が存在する。インフレーションはこの問題を解決する極初期宇宙の進化モデルであり、佐藤勝彦やグースによって提唱された。極初期宇宙において、フリードマン宇宙のような膨張ではなく、指数関数的に膨張するド・ジッター宇宙のような時代が存在したとするシナリオである。このように指数関数的膨張を引き起こし、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測結果と矛盾しないモデルの枠組みが要求される。

これらの問題は実験・観測事実に基づく問題であるため、これらの同時説明を試みることで、標準模型を越える模型の持つべき性質に対する手がかりが得られると期待できる。

上の問題の1. ニュートリノ振動と2. 暗黒物質の存在を解決する単純な拡張模型として、真空期待値を持たないスカラー二重項  $\eta$  とゲージ重項フェルミオン  $N_i$ , ( $i = 1 \sim 3$ ) を標準模型に導入した Ma 模型が知られている。この新たに導入した粒子が  $Z_2$  対称性の下で奇パリティであるとする、ニュートリノの質量は、ディラック質量項が禁止されるため、輻射補正によって生成される。さらに、最も軽い中性粒子は標準模型粒子への崩壊が禁止されるため、暗黒物質の候補となる。これらの粒子の質量が TeV スケールにあれば、この模型の枠組みでニュートリノ振動と暗黒物質の存在を同時に説明することができる。この模型では暗黒物質として新しく導入した一重項フェルミオンとスカラー二重項の中性成分が候補として考えられるが、一重項フェルミオン暗黒物質の場合、レプトンフレーバーを破る過程の観測実験によってパラメーター領域が厳しく制限されている。一方、新たなスカラー二重項の中性成分が暗黒物質の場合、広いパラメーター領域でこれらの問題の同時説明が可能である。

そこでまず、第4章で Ma 模型の枠組みにおける3. 宇宙のバリオン数非対称性の実現可能性について調べた。このとき、新たなスカラー場を暗黒物質と仮定することで、一重項フェルミオンの崩壊によるバリオン数生成が可能となる。一重項フェルミオンの崩壊はレプトン数を破るため、これによって生じたレプトン数の非対称性がスファロン過程によってバリオン数に転化することで宇宙のバリオン数非対称性が実現される。このシナリオをレプトジェネシスといい、本研究では、崩壊によるレプトン数の生成過程と逆崩壊、散乱によるレプトン数の消失過程の反応率を計算し、この模型で生成されるバリオン数をボルツマン方程式を解いて定量的に求めた。このとき、一重項フェルミオンはニュートリノ振動に対しても重要な役割を果たすため、ニュートリノ振動実験の結果を満たすパラメーターを用いて評価した。その結果、一重項フェルミオンの質量が階層的な場合、レプトン数の消失過程の寄与が大きいため、TeV スケールで十分なバリオン数を生成することが困難であることがわかった。一方、二つの一重項フェルミオンの質量が縮退している場合、崩壊過程の量子補正によって、CP 対称性の破れが大きくなり、観測で要求されるバリオン数を TeV スケールで実現できることがわかった。

第5章では、上の3つの問題に加えて、4. インフレーションを説明する模型について議論した。近年の宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測結果はインフレーションと呼ばれる極初期宇宙における宇宙空間の急膨張の存在を示唆しており、インフレーションを実現する機構について長年議論されている。標準模型の枠組みにおけるインフレーションのシナリオも考えられてお

り, この場合, ヒッグス粒子がインフラトンとなる. この模型では, ヒッグス粒子と重力 (リッチスカラー) が強く結合することで, ヒッグス粒子のポテンシャルが場の値が大きい領域で平坦になり, インフレーションが実現される. これまでに様々なインフレーション模型が観測によって排除されているが, ヒッグス粒子によるインフレーションの模型はその結果とよく合っている. しかし, このヒッグス粒子と重力の結合は, ヒッグス粒子の各成分の散乱過程のユニタリティーが高エネルギー (二体散乱の場合,  $\Lambda_0 \sim \frac{M_{\text{pl}}}{\xi}$ ) で破れることが知られており, インフレーションのスケールは  $\Lambda \sim \frac{M_{\text{pl}}}{\sqrt{\xi}}$  であるため, ヒッグス粒子と重力の結合定数  $\xi$  が大きくなると, ユニタリティーがインフレーションスケールより低エネルギー領域で破れるという問題がある.

そこで, 本研究では上で述べた  $Z_2$  奇パリティのスカラー二重項とゲージ一重項フェルミオンに加え, さらに二つの実スカラー場  $S_1, S_2$  を導入する. このスカラー場は輻射補正によるニュートリノ質量生成に対しても重要な役割を果たす. さらに, ヒッグス粒子によるインフレーションのシナリオと同様, 二つの実スカラー場とリッチスカラーとの結合  $\sum_a \xi_a S_a^2 R$  を考え,  $S_1$  をインフラトンとする. この場合, ユニタリティーの破れのスケールは  $\Lambda_0 \sim \frac{M_{\text{pl}}}{\sqrt{\xi_1 \xi_2}}$  と見積もられる. したがって,  $\xi_1 \gg 1 \gg \xi_2$  のような階層的な結合定数を仮定することで,  $S_1$  の場の値が大きいところでポテンシャルが平坦になり, 十分なインフレーションが実現可能になる. この模型のテンソル・スカラー比およびスペクトル指数は, ヒッグス粒子によるインフレーションのシナリオと同様, 観測結果とよく合っている. さらに,  $\xi_1, \xi_2$  が独立なパラメーターであることから, ユニタリティーを破るエネルギースケールをインフレーションスケールに比べて十分に大きくとれるという点でヒッグス粒子によるインフレーション模型と異なる. したがって, 今の模型の場合, ユニタリティーを回復させるために導入した新たな場によってポテンシャルの平坦性が損なわれるというような問題が生じない.

インフレーション模型を議論する際, インフレーション後の再加熱が重要になる. この模型ではインフラトンの崩壊によって宇宙を熱化できる. さらに, スカラー二重項  $\eta$  にレプトン数を持たせることで, この再加熱期のインフラトンの崩壊時にバリオン数生成が実現されるシナリオが考えられる. この場合, インフラトンの崩壊によってまず  $\eta$  セクターにレプトン数の非対称性が生じ, これがレプトン数を保存する散乱過程を通じて, 標準模型レプトンセクターに移転する. そして, スファレロン過程によってバリオン数に転化される. このとき重要なパラメーターはニュートリノ振動実験や暗黒物質探査実験によって制限されており, 本研究ではバリオン数生成とこれらの実験結果との整合性について評価を行った. その結果, この拡張模型が上に挙げた 4 つの問題を同時に解決し得ることがわかった.

今の模型場合, 暗黒物質の候補として最も軽い右巻きニュートリノと  $\eta$  の中性成分が考えられるが, ここでは  $\eta$  の中性成分を暗黒物質として議論した. この場合, 暗黒物質の直接探査実験によってバリオン数生成に重要なパラメーターであるスカラー結合定数  $\lambda_5$  に下限値が与えられるため, バリオン数生成過程のシナリオが制限される. 一方, 右巻きニュートリノが暗黒物質の場合,  $\lambda_5$  に対する制限はないが, 暗黒物質の残存量説明のため, ニュートリノ湯川結合定数がある程度大きくとる必要があり, 上で述べたようにレプトンフレーバーを破る過程との整合性が重要となる. また, このような大きな結合定数の場合,  $T \simeq T_R$  でレプトン数を保存する仮定が常に熱平衡状態となるため,  $\eta$  の場合と異なるバリオン数生成シナリオになる. Ma 模型では右巻きニュートリノ暗黒物質とすると, バリオン数生成は困難であるため, 今後, この拡張模型について定量的な評価を行う予定である.

平成 28 年 2 月 4 日

## 学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

拡張輻射ニュートリノ質量生成モデルにおけるインフレーションと宇宙のバリオン数生成

2. 論文提出者 (1) 所 属 数物科学 専攻

(2) <sup>ふり</sup>氏 <sup>がな</sup>名 <sup>かしわせ</sup>柏瀬 <sup>しょういち</sup>翔一

3. 審査結果の要旨（600～650 字）

膨大な実験結果を説明することに成功してきた素粒子標準モデルはヒッグス粒子の発見により確証を得たかに見える。一方で、ニュートリノ質量や暗黒物質の存在、宇宙のバリオン数の起源など説明不可能な事象が存在することも知られている。また、宇宙背景放射の詳細な観測が示めす宇宙初期におけるインフレーションと呼ばれる指数関数的な宇宙膨張の存在も標準モデルでの説明には困難を伴う。これらは、標準モデル拡張の必要性を示唆している。

本論文ではこれらの困難の解決を目指し、ニュートリノ質量生成を可能とし、暗黒物質の存在を説明し得るモデルとして提案された輻射シーソーモデルに対して、ニュートリノ質量生成に重要な役割を果たすスカラー場をインフラトンとして導入する拡張モデルを提案し、その現象論的諸性質を考察している。本論文において示された重要な結果として、(1) ニュートリノ振動実験結果、暗黒物質の残存量の説明が可能である、(2) 宇宙背景放射の揺らきに関するスカラー指標やテンソル・スカラー比に観測結果と整合する値を与える、(3) インフラトンの崩壊に起源を持つ非熱的レプトジェネシスにより宇宙のバリオン数が生み出される、等が挙げられる。これらの結果は標準モデルの複数の重要課題を一つの枠組みで同時に説明する可能性を提示しており、標準モデルの拡張に向けた研究へ有用なヒントを与えるものであり、博士論文に値すると内容である判断する。

4. 審査結果 (1) 判 定 (いずれかに○印) 合 格 ・ 不合格

(2) 授与学位 博 士 ( 理 学 )