

氏 名	田辺 義博
学位の種類	博士（理学）
学位記番号	総博甲第159号
学位授与年月日	令和7年3月19日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項
文部科学省報告番号	甲第843号
専攻名	総合理工学専攻
学位論文題目	最小超対称標準模型の flat direction をインフラトンとするバリオン数生成 (Baryogenesis from flat direction of minimal supersymmetric Standard Model as inflaton)
論文審査委員	主査 島根大学教授 田中 宏志 島根大学教授 山田 拓身 島根大学教授 影島 博之 大阪公立大学教授 波場 直之

論文内容の要旨

本研究では、新たなインフレーションモデルを構築し、宇宙論的な観測値に基づいてモデルパラメータに制限を加えた。そのなかの最も整合的な系につき、初期宇宙の粒子-反粒子の対消滅から生き残った現在の物質粒子の数（バリオン数）の説明が可能であるか検証し、無矛盾でありうることを示した。

100GeV オーダー以下の物理実験は、標準模型（standard model: SM）とほぼ無矛盾である。ヒッグス質量の量子補正に対する安定性を実現するため、超対称性（supersymmetry: SUSY）を理論に導入する事を考える。この拡張により、自然界の4つの相互作用のうち3つが高エネルギー域にて統一され、さらに、暗黒物質の存在も説明可能であるなど、SUSY は SM を超える物理の探求に有力な理論的枠組みを与える。

SUSY は、SM 粒子それぞれと、スピンの 1/2 だけ異なる SUSY 粒子の存在を预言する。そして、SUSY 粒子とヒッグス粒子のスカラ場との組み合わせ ϕ には flat direction（スカラポテンシャルの平坦方向）が存在し、初期宇宙の指数関数的膨張、いわゆるインフレーションを引き起こすインフラトンとしての役割を担わせることが可能となる。

本研究では、インフラトンのポテンシャル V に課される条件 slow roll condition を比較的容易に満たし、かつ、場の値がプランクスケールを超えない特徴を持つ、inflection point inflation (IPI) モデルを考える。そして、SM を minimal に SUSY に拡張した MSSM（最小超対称標準模型）について、 ϕ のスカラポテンシャルの平坦方向をインフラトンとみなし、このポテンシャル $V(\phi)$ を用いた IPI モデルを提案する。 V は、具体的には、インフラトンの質量項 $m_\phi^2 \phi^2$ に加え、プランク質量でサプレスされた、質量次元 4 以上の高次項 ϕ^n 等を伴うこととなる（次数 n は、平坦方向の性質から $n=4, 5, 6, 7, 9$ に限定されることも本研究では考慮した）。

ただし、厳密な IPI では、モデルスクリーニングの指標であるスペクトル指数 n_s が観測値から有意にずれてしまう。そこで slow roll condition を満たしつつ V に課される条件をわずかに緩め、 n_s が観測値に収まるように quasi-IPI (q-IPI) モデルを構築し、これを解析した。

まず、宇宙論的な観測値であるスカラーパワースペクトル P_ζ の最新値に基づいて、高次項をポテンシャル V に組み入れる際の結合係数 λ と、インフラトンの質量 m_ϕ や IPI からのずれの許容程度等との関係ないし制限を、各次数について調べた。

その結果、興味深いことに、 $n=6$ について、結合係数 λ が $\sim \mathcal{O}(1)$ という自然な値であるとき、質量 m_ϕ が、実験施設 LHC にて制限のついた SUSY 粒子の質量下限 2000GeV に近い値をとることがわかった。よって、 $n=6$ である場合の整合性をさらに検証することとした。

ところで、初期宇宙においては、ビッグバンから秒～分のオーダーにて、軽元素が形成されることが理論から示されており、実際、 ^4He , D , ^3He 等の軽元素について、理論値と観測値とが見事に一致する。この SM 粒子を生成する過程は、本研究のモデルでも必要である。

一方、SM 粒子や MSSM 粒子には、その粒子と質量が同じであって、各種量子数が反対である「反粒子」も存在する。ただし、粒子と反粒子とは衝突により対消滅してしまう。従って、現在宇宙を構成する物質粒子の数（バリオン数）を説明するには、初期宇宙において、SUSY 粒子が単に SM 粒子へ崩壊するだけでなく、粒子の生成数と反粒子の生成数との間に僅かな差があることが必要となる。これを説明する機構は Baryogenesis（バリオン数生成）として知られる。

そこで、本研究では、平坦方向のうち 0 でないバリオン数を持ち、上記 $n=6$ の高次項を形成する場の一つである udd 方向のインフラトン进行调查した。なおインフレーションが終了すると、インフラトンがポテンシャルの谷に落ち込み、開放されるエネルギーが宇宙を再加熱する。本研究では、このときのインフラトンの崩壊により、直接バリオン数が生成される可能性进行调查した。

具体的には、udd 方向のうちの u 、すなわち SUSY 粒子である up 系 squark $\tilde{u}^c$ を考えると、これは主に、SUSY 粒子であるグルイーノ $\tilde{g}$ を伴いながら SM 粒子である up 系 quark $u^\dagger$ に崩壊する

$$(\tilde{u}^c \rightarrow u^\dagger + \tilde{g}).$$

一方、 $\tilde{u}^c$ は、別途、SUSY 粒子であるヒグシーノ $\tilde{H}^{u\dagger}$ を伴いながら SM 粒子 $Q^\dagger$ にも崩壊する

$$(\tilde{u}^c \rightarrow Q^\dagger + \tilde{H}^{u\dagger}).$$

そしてこれらの崩壊モードについては、弱い相互作用に関する小林益川行列中の位相等の非対称性が存在するため、反粒子の崩壊モード ($\tilde{u}^{c\dagger} \rightarrow Q + \tilde{H}^u$) との間で崩壊率に差が生じる。

いくつかの準備をおこなったあと、udd 方向についてこの崩壊率の差を求め、これから具体的にバリオン数を算出した。その結果、SUSY 粒子群の質量等、ある程度の仮定をおくところはあるものの、現在のバリオン数を説明できる、そのような変数領域があることを確認した。

以上本論文では、最小超対称標準模型のスカラーポテンシャルの平坦方向が宇宙観測と無矛盾なインフラトンとして機能し、宇宙のバリオン数生成も説明可能である、そのようなモデルないし理論の提唱をおこなった。

論文審査結果の要旨

本論文は、新たなインフレーションモデルを構築し、宇宙論的な観測値に基づいてモデルパラメータに制限を与えたものである。そしてそのなかの最も整合的な系につき、更に、初期宇宙の粒子・反粒子の対消滅から生き残った現在の物質粒子の数（バリオン数）の説明が可能であるか検証し、無矛盾でありうることを示したものである。本論文は全5章から構成されている。

第1章は序論であり、インフレーション、標準模型、超対称性 (SUSY) に言及し、SUSY の特徴である **flat direction** をインフラトンと見立てることができる旨、概説されている。そしてインフレーションを生じさせるのに必要なポテンシャルの条件 **slow roll condition** を比較的容易に実現する **inflection point inflation (IPI)** を紹介する。一方、ビッグバン元素合成の観点からインフレーション終了後にはバリオン数が生成され、それが観測値と整合する必要がある点述べられている。

第2章では、**flat direction** を考察する際のポテンシャル V の一般形を説明し、厳密な IPI である場合から条件をゆるめスペクトル指数 n_s が観測値に合うように **quasi-IPI** モデルを構築する。この新しいモデルを用いて、宇宙論的な観測値であるスカラーパワースペクトル P_ζ と e -folds N についてモデルパラメータとの間に成立する新規かつ重要な関係式を求める。そしてこの関係式を解析し、ポテンシャル V の次数について $n = 6$ である場合が最も整合的であることを見る。

第3章では、第2章の結果に基づき、 $n = 6$ のポテンシャルをもたらし、バリオン数そのものを有する系である **udd flat direction** をインフラトンとした解析をおこなっている。非熱的にバリオン数が生成されることを確認し、**tree** と **1-loop** のダイアグラムのクロスタームから **CP** 非対称がでてくることを具体的に始めて明らかにし、現在の宇宙のバリオン数を説明しうることをみている。すなわち、本論文における新たなモデルは、第2章ではインフレーション期における宇宙論的な観測量に合致することを見、第3章ではその後インフラトンが崩壊し標準模型粒子が形成され、対消滅から生き残ったバリオン数を無矛盾に説明し、いずれも学術的に新規な内容である。

第4章は、第3章において見通しを良くするために省略された、積分その他必要かつ多くの計算について過不足なく説明している。本論文で取り上げた **udd** 以外の方向のインフラトンを考察する際にも必要となる。

第5章は本論文のまとめおよび考察、そして将来的な展開について述べられている。

以上のように本論文は新規性の高い研究成果を多数含んでおり、その学術的インパクトは高い水準にあると判断できる。得られた成果の一部は、申請者を責任著者とする2編の関連論文として査読付きで **Q1** ランクの英字学術誌で発表されており、公聴会における発表と質疑応答でもその内容の新規性と重要性が認められた。以上に鑑みて、申請者の論文は博士の学位授与に値するものと審査委員が全員一致し判定した。