様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科研費
KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ３０ 年　 ５ 月 ３０ 日現在

機関番号： １２６０１
研究種目： 若手研究(B)
研究期間： 2014～2017
課題番号： ２６８００１２１

研究課題名（和文）Planck時代におけるインフレーション模型およびその再加熱過程の精査

研究課題名（英文）Studying inflation models and reheating in the PLANCK era

研究代表者
中山　和則（Nakayama, Kazunori）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・助教

研究者番号：９０５９６６５２

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　2,000,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙初期にインフレーションと呼ばれる加速膨張の時期があったことが観測的に明らかになっている。その一方で、インフレーション期の後に続く「再加熱期」については理論的にも観測的にも不明な部分が多かった。特に私はこの再加熱期の解析を精力的に行い、これまで考えられていなかった豊かな現象の発見に成功した。代表的な例として、再加熱期におけるヒッグス真空の崩壊や、爆発的な粒子生成現象、重力の効果による再加熱など、いずれもインフレーション宇宙の新たな検証方法へ向けた重要な結果を導いた。

研究成果の概要（英文）：There are increasing observational evidence of the existence of accelerated expansion era in the very early Universe, called inflation. On the other hand, the physics of ``reheating'' after inflation has been unclear both theoretically and observationally. I studied the physics of reheating in detail, and found rich phenomena which had not been known so far, for example, the decay of Higgs vacuum during reheating, violent particle production phenomena, reheating through gravitational effects. All these results are important as new probes of inflationary Universe.

研究分野： 素粒子論的宇宙論

キーワード： インフレーション　初期宇宙　再加熱　ヒッグス　超対称性　アクシオン

１．研究開始当初の背景

初期宇宙においてインフレーションと呼ばれる加速膨張が起こったことはほぼ確実だと思われているが、その具体的な模型は未知のままである。インフレーションは素粒子の基礎理論とも密接に関係しており、インフレーション模型の特定は素粒子論・宇宙論の大きな目標の一つであると言える。Planck 衛星が宇宙背景放射の精密観測を行い、2013 年に結果を報告した。これにより種々のインフレーション模型が強い制限を受けることとなった。こうした中で、インフレーション模型の検証に向けて、Planck による観測と整合的な模型の構築および、再加熱過程を正しく記述する理論の整備が急務である。

２．研究の目的

(1) Planck 衛星の観測結果と整合的かつ、将来的に観測可能な強度の原始重力波を予言するようなインフレーション模型を構築すると同時に、具体的な素粒子模型との関係やその検証方法を明らかにする。

(2) インフレーション後の再加熱の時期における豊かな物理現象を解析する。特に粒子生成の理論の整備や、電弱真空の安定性の詳細な解析を行い、素粒子標準模型の宇宙論を確立し、さらに標準模型を超えた物理への手がかりを得る。

(3) 暗黒物質の正体解明に向け、最近の実験・観測データから暗黒物質模型への示唆や制限を導く。

３．研究の方法

上記(1)-(3)について、最新の実験結果に注目しながら並行して研究を行う。必要に応じて、２次元または３次元格子シミュレーションを行う。

４．研究成果

本節での引用文献番号は「5.主な発表論文等」欄に記載された雑誌論文の番号に対応する。

(1) Planck 衛星の観測結果と整合的かつ、将来的に観測可能な原始重力波を予言するインフレーション模型を構築した。特に、暗黒物質スカラー場自身がインフレーションを引き起こす具体的な模型を構築し、加速器や暗黒物質検出実験との関連を議論した[15]。さらに、超対称性理論における右巻きスカラーニュートリノをインフラトンと同定する模型を構築し、この模型とニュートリノ振動実験との関係、特にニュートリノ CP 位相の予言値を明らかにした[8]。

(2) インフレーション後の再加熱期において、重力の効果による粒子生成率を見積もり、これまでの理解とは逆にインフレーション時のハッブルスケールよりも重い粒子も効率的に生成されることを示した[13]。さらに拡張重力理論においては重力的粒子生成の効率が飛躍的に増大する場合があることを明らかにした。また、ある種の拡張重力理論において、再加熱期においおいてインフラトン場の深刻な不安定性が存在することを明らかにし、従来の一部のインフレーション模型の正当性に疑問を投げかけた[11]。

(3) ヒッグスインフレーションと呼ばれるクラスのインフレーション模型において、これまで全く考えられていなかった爆発的な粒子生成現象の存在を指摘した。これにより、これまでの再加熱の理解が大きく変更される可能性がある[5]。

(4) 超重力理論においては、グラビティーノが宇宙論的問題を引き起こす場合があることが知られている（グラビティーノ問題）。一方で現実的なカオティック型のインフレーション模型における非熱的なグラビティーノ生成量は知られていなかった。インフレーション後のグラビティーノ生成量の詳細な評価を行い、汎用性の高い一般的な生成量の公式の導出に成功した[6]。さらに、近年提唱された最小超重力インフレーション模型と呼ばれるクラスの模型において、従来よりも遥かに大量のグラビティーノが生成され、深刻な事態を引き起こすことを指摘した[3]。

(5) LHC でのヒッグス粒子の発見以降、「真空」に対する一定の理解は得られたが、同時にこの宇宙が準安定真空状態にあることも明らかになった。インフレーション後の再加熱期において、ヒッグス場のゆらぎが急激に増大し、真空の崩壊という深刻な問題を引き起こす可能性があることを、詳細な格子シミュレーションにより初めて明らかにした。これにより、極初期宇宙から現在に至るまで、宇宙が崩壊せず存在するためのヒッグス場の結合定数に対する条件を導いた[1,7]。

(6) 暗黒物質対消滅により宇宙背景放射のゆらぎが受ける影響を評価し、最新の Planck 衛星の観測結果を用いて暗黒物質対消滅断面積に対する一般的な上限を導いた[9]。また、AMS02 衛星による宇宙線反陽子スペクトルの観測結果を受けて、

暗黒物質対消滅または崩壊によりこれを説明する可能性を議論した[12]。さらに、赤外背景放射の超過成分が観測されたことを受け、これを崩壊暗黒物質により説明する可能性を精査した[2]。

(7) LIGOでの重力波の発見により、重力波を高エネルギー素粒子物理探索の手段として利用する機運が高まっている。標準模型のヒッグス場の相転移が電弱スケールより遥かに高いスケールで起きた可能性があることを指摘し、その場合の真空の一次相転移における重力波の強度を見積もるとともに将来実験での観測可能性を議論した[10]。

(8) 素粒子標準模型における種々の問題（強いCP問題、フレーバー階層性問題、暗黒物質、バリオン非対称性、ニュートリノ質量、インフレーション）を同時に解決する、最もシンプルな模型を提案した。この模型においては、K 中間子等のアクシオンへの稀崩壊が従来のアクシオン模型に比べて遥かに大きくなり、現行および将来の加速器実験で発見の可能性があることを指摘した[4]。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 34 件）
主要な論文のみ掲載。

(1) Y.Ema, K.Mukaida and K.Nakayama,
``Electroweak Vacuum Metastability and Low-scale Inflation,''
JCAP 1712, no. 12, 030 (2017)
doi:10.1088/1475-7516/2017/12/030
査読有

(2) K.Kohri, T.Moroi and K.Nakayama,
``Can decaying particle explain cosmic infrared background excess?,''
Phys. Lett. B 772, 628 (2017)
doi:10.1016/j.physletb.2017.07.026
査読有

(3) F.Hasegawa, K.Mukaida, K.Nakayama, T.Terada and Y.Yamada,
``Gravitino Problem in Minimal Supergravity Inflation,''
Phys. Lett. B 767, 392 (2017)
doi:10.1016/j.physletb.2017.02.030
査読有

(4) Y.Ema, K.Hamaguchi, T.Moroi, K.Nakayama,
``Flaxion: a minimal extension to solve puzzles in the standard model,''
JHEP 1701, 096 (2017)
doi:10.1007/JHEP01(2017)096
査読有

(5) Y.Ema, R.Jinno, K.Mukaida and K.Nakayama,
``Violent Preheating in Inflation with Nonminimal Coupling,''
JCAP 1702, no. 02, 045 (2017)
doi:10.1088/1475-7516/2017/02/045
査読有

(6) Y.Ema, K.Mukaida, K.Nakayama, T.Terada,
``Nonthermal Gravitino Production after Large Field Inflation,''
JHEP 1611, 184 (2016)
doi:10.1007/JHEP11(2016)184
査読有

(7) Y.Ema, K.Mukaida and K.Nakayama,
``Fate of Electroweak Vacuum during Preheating,''
JCAP 1610, no. 10, 043 (2016)
doi:10.1088/1475-7516/2016/10/043
査読有

(8) K.Nakayama, F.Takahashi and T.T.Yanagida,
``Viable Chaotic Inflation as a Source of Neutrino Masses and Leptogenesis,''
Phys. Lett. B 757, 32 (2016)
doi:10.1016/j.physletb.2016.03.051
査読有

(9) M.Kawasaki, K.Nakayama and T.Sekiguchi,
``CMB Constraint on Dark Matter Annihilation after Planck 2015,''
Phys. Lett. B 756, 212 (2016)
doi:10.1016/j.physletb.2016.03.005
査読有

(10) R.Jinno, K.Nakayama and M.Takimoto,
``Gravitational Waves from the First Order Phase Transition of the Higgs Field at High Energy Scales,''
Phys. Rev. D 93, no. 4, 045024 (2016)
doi:10.1103/PhysRevD.93.045024
査読有

(11) Y.Ema, R.Jinno, K.Mukaida and K.Nakayama,
``Particle Production after Inflation with Non-minimal Derivative Coupling to Gravity,''
JCAP 1510, no. 10, 020 (2015)
DOI: 10.1088/1475-7516/2015/10/020
査読有

(12) K.Hamaguchi, T.Moroi and K.Nakayama,
``AMS-02 Antiprotons from Annihilating or Decaying Dark Matter,''
Phys. Lett. B 747, 523 (2015)
DOI: 10.1016/j.physletb.2015.06.041
査読有

(13) Y.Ema, R.Jinno, K.Mukaida and K.Nakayama,
``Gravitational Effects on Inflaton Decay,''
JCAP 1505, no. 05, 038 (2015)
DOI: 10.1088/1475-7516/2015/05/038
査読有

(14) T.Moroi, K.Mukaida, K.Nakayama, M.Takimoto,
``Axion Models with High Scale Inflation,''
JHEP 1411, 151 (2014)
DOI: 10.1007/JHEP11(2014)151
査読有

(15) K.Mukaida and K.Nakayama,
``Dark Matter Chaotic Inflation in Light of BICEP2,''
JCAP 1408, 062 (2014)
DOI: 10.1088/1475-7516/2014/08/062
査読有

〔学会発表〕（計 18 件）
主要な講演のみ掲載。

(1) K.Nakayama,
``宇宙初期の相転移で生成される重力波''
KEK-Cosmo 2018 Workshop 宇宙重力波検出への期待(2018/1/23,24)

(2) K.Nakayama,
``Flaxion: a minimal extension to solve puzzles in the standard model''
Focus Meeting: new perspectives on light particles (2017/11/28)

(3) K.Nakayama,
``物質と反物質の非対称性''
Flavor Physics Workshop 2017(2017/11/1)

(4) K.Nakayama,
``Gravitational waves as a probe of physics beyond the standard model''
Physics in LHC and the early Universe (2017/01/10)

(5) K.Nakayama,
``Moduli-assisted electroweak vacuum''
Hidden Sector Physics and Cosmophysics (2016/12/15)

(6) K.Nakayama,
``Gravitational Particle Production after Inflation with Extended Gravity Models''
Everything about Gravity (2015/12/15)

(7) K.Nakayama,
``AMS-02 による宇宙線反陽子観測と暗黒物質''
「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」2015 年領域研究会(2015/05/16)

(8) K.Nakayama,
``Inflationary gravitational waves as a probe of the early universe''
B-mode Cosmology(2015/02/21)

(9) K.Nakayama,
``Dynamics of oscillating scalar field in the early Universe''
KEK Theory Workshop 2015 (2015/01/28)

(10)K.Nakayama,
``Axion Cosmology with High Scale Inflation''
COSPA2014 (2014/12/09)

６．研究組織

(1)研究代表者
中山 和則（NAKAYAMA, Kazunori）
東京大学・大学院理学系研究科・助教
研究者番号：90596652