

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2013～2016

課題番号：25400248

研究課題名（和文）インフレーション宇宙における物質とその揺らぎの起源

研究課題名（英文）Origin of matter and its fluctuation in the inflationary universe

研究代表者

川崎 雅裕（Kawasaki, Masahiro）

東京大学・宇宙線研究所・教授

研究者番号：50202031

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：暗黒物質の有力な候補であるアクシオンや超対称性粒子がインフレーション中に獲得した揺らぎの性質と進化に着目して、それがマイクロ波宇宙背景放射等に与える影響から、暗黒物質の背後にある理論モデルに強い制限が与えられることを明らかにした。また、宇宙の物質と反物質の非対称性を説明する有力なモデルの一つであるアフレック・ダイン機構に関して、バリオン数と暗黒物質の存在量に関係がつけられることを明らかにした。さらに、暗黒物質として原始ブラックホールの可能性を指摘し、原始ブラックホールを生成するインフレーションモデルを構築した。

研究成果の概要（英文）： We have considered axions and supersymmetric particles as promising candidates for dark matter which acquire fluctuations during inflation. We have studied cosmological effects of the fluctuations on cosmic microwave background and obtained stringent constraints on particle physics models. We have also shown that co-genesis of baryon number and dark matter is possible in Affleck-Dine mechanism which accounts for matter and anti-matter asymmetry of the universe in supersymmetric theories. Furthermore we have found that primordial black holes are a good candidate for dark matter and built a inflation model which can produce an appropriate amount of primordial black holes.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：宇宙論 暗黒物質 インフレーション宇宙 バリオン数生成 超対称性

1. 研究開始当初の背景

近年、宇宙論的な観測の飛躍的な進歩により宇宙に対する理解は大いに深まっている。一方、理論においては、インフレーション宇宙モデルが観測された宇宙の密度揺らぎの性質をうまく説明することから現代宇宙論の新たな標準モデルとしての地位を確立しつつある。しかし、宇宙の重要な構成要素である暗黒物質やバリオン数に関してはその正体や起源が未だに謎のままである。

2. 研究の目的

上のような背景の下、インフレーション宇宙の枠組みにおいて素粒子理論を用いて、物質の起源、つまり、暗黒物質やバリオン数がどのように生成されたか、両者の間にどのような関連性があるかなどについて理論モデルを構築するとともに、暗黒物質やバリオンがインフレーションによって獲得する揺らぎの性質を調べ、現在あるいは近い将来行われる宇宙論的観測によって、宇宙の物質の起源や暗黒物質の正体を明らかにする可能性を理論的立場から考察することが本研究の目的である。具体的には以下の項目について研究を行う。

(1) 強い相互作用における CP 問題を解決する Peccei-Quinn (PQ) 機構で予言されるアクシオンは暗黒物質の有力な候補となっている。しかし、その宇宙論的進化を考えると等曲率揺らぎ問題やドメイン・ウォール問題を引き起こすことが知られている。様々なインフレーション宇宙モデルとアクシオンモデルを詳細に調べ、これらの問題がないシナリオを構築する。

(2) 超対称性化された素粒子標準モデルにおいてバリオン数生成を行うアフleck・ダイン機構では巨大なバリオン数を持った Q ボールと呼ばれるソリトンが生成されることが知られており、その崩壊によって宇宙にバリオン数が作られる。また同時に安定な超対称性粒子も生成されそれが暗黒物質を担う可能性がある。そこで、Q ボールを通じて統一的に宇宙の暗黒物質とバリオン数を説明するモデルを構築する。

(3) インフレーション宇宙における様々な暗黒物質の生成を考え、暗黒物質の存在量、揺らぎの大きさ、バリオン数生成との関係を考察して、インフレーションモデルに関する知見を得て、それに基づいてインフレーションモデルを構築する。

(4) カーバトンモデルにおいてバリオン数や暗黒物質の生成機構を考え、それによって生じる等曲率揺らぎの大きさを調べ、等曲率揺らぎを抑制し、宇宙の暗黒物質質量やバリオ

ン数を説明できるモデルを構築する。

3. 研究の方法

(1) PQ 対称性がインフレーション中に壊れている場合について、アクシオンを含むスカラー場が大きな期待値を持つことによって等曲率揺らぎを抑制するモデルを考え、インフレーション後のスカラー場の時間発展を格子シミュレーション計算を用いて調べ、スカラー場の共鳴的振動による位相欠陥の生成という問題が回避できるか明らかにする。また、PQ 対称性がインフレーション後に壊れている場合にも位相欠陥の生成を格子シミュレーションで調べ、位相欠陥から放出されるアクシオン量を定量的に評価する。

(2) アフレック・ダイン機構において生成される Q ボールに関して、数値計算によって求められた正確な崩壊率を用いて、Q ボールから放出されるバリオン数と超対称性暗黒物質を定量的に評価する。また、ゲージ場を含む Q ボールの性質を数値計算を用いて調べる。

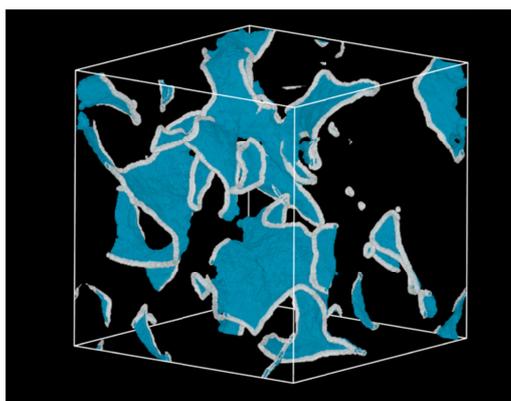
(3) カーバトンモデルが作る揺らぎのスペクトルと揺らぎによって二次的に生成する重力波を定量的に評価するために、揺らぎのスカラー・モードとテンソル・モード発展方程式を数値的に解く。

4. 研究成果

(1) アクシオンを含む Peccei-Quinn 場 (PQ 場) が大きな期待値を持つ場合には、アクシオンの宇宙論的問題の一つである等曲率揺らぎが抑制される。しかし、この場合インフレーション後の PQ 場の振動によって PQ 対称性が回復し、ドメイン・ウォールが生成され新たな宇宙論的問題を生じる可能性がある。そこで格子シミュレーションを行いインフレーション後の振動で PQ 対称性が回復するかを調べ、ドメイン・ウォール問題も等曲率揺らぎ問題も解決できるために必要な条件を明らかにした。さらに、この条件を満たし宇宙論的に無矛盾なインフレーションモデルとアクシオンモデルが構築できることを示した。

(2) PQ 場がインフレーション中にプランクスケール近くの期待値を持ち等曲率揺らぎの問題を解決するモデルにおいて、PQ 場がインフレーションを起こすスカラー場 (インフラトン) と重力的に結合していると、カオティック・インフレーションのポテンシャルが変更を受け、それによってカオティック・インフレーションが作る揺らぎがより観測と一致することを示した。

(3) PQ 対称性がインフレーション後に壊れる場合には、PQ スカラー場の宇宙論的進化に伴って位相欠陥(ストリングとドメイン・ウォール)が生成される。それらの位相欠陥から放出されるアクシオンは宇宙の暗黒物質密度に重要な寄与をする可能性がある。そこで、従来よりも高精度な 2 次元・3 次元数値シミュレーション(図 1)を用いて位相欠陥の時間進化と放出されるアクシオンのエネルギー・スペクトルを正確に求め、宇宙におけるアクシオンの存在量を見積もり、アクシ



オンが暗黒物質になる条件を求め、暗黒物質アクシオンが将来実験で検出される可能性があることを明らかにした。

図 1 ドメイン・ウォールのシミュレーション

(4) インフレーション後の再加熱温度が非常に低い場合の暗黒物質生成に関して、インフラトンの崩壊によって生じる高エネルギー粒子が熱化される過程を詳細に調べ、高エネルギー粒子と熱浴中の粒子の非弾性散乱によって暗黒物質が生成され、数 100GeV 以上の質量を持った暗黒物質が観測値を説明できることを明らかにした。

(5) 将来の宇宙背景放射 B モード偏光の観測に備え、高いエネルギー・スケールのインフレーションが起こった場合のアフレック・ダイン機構によるバリオン数生成の問題と等曲率揺らぎの問題を考察した。等曲率揺らぎの制限からインフレーション後の再加熱温度が低くなることが要求されるが、その場合でもインフラトンの崩壊過程の非弾性散乱を通じて暗黒物質が生成できることを明らかにした。

(6) バリオン数生成を行うアフレック・ダイン機構において生成されるソリトンである Q ボールが崩壊するときに放出されるクォークと超対称性暗黒物質粒子の崩壊分岐比を正しく評価することによって、現在の宇宙に存在するバリオンと暗黒物質の存在比を説明できることを示した。

(7) バリオン等曲率揺らぎと暗黒物質等曲率揺らぎの両方を生成するスニュートリ

ノ・カーバトン・モデルを提案し、2 つの等曲率揺らぎの相関によって全等曲率揺らぎが抑圧され等曲率揺らぎに対する制限を逃れ、さらに、宇宙背景放射の温度の大スケールにおける非等方性を減少させ観測との一致が良くなることを示した。

(8) 小スケールで大きな揺らぎを生成するカーバトンモデルを提案し、揺らぎの 2 次効果で生成される重力波を定量的に評価し、それが将来の衛星を用いた重力波観測やパルサー・タイミング観測によって検出可能であることを示した。

(9) インフレーション中に生成される密度揺らぎの計算に関して、ストカスティック形式を用いた新たな計算方法を提案し、この新たな計算方法をスロー・ロール型のインフレーションに適用し、揺らぎのパワースペクトルを求め従来の方法と無矛盾な結果を得た。

(10) 小スケールに大きな密度揺らぎが存在する場合にその 2 次効果として宇宙初期の中性子と陽子の比を決める弱い相互作用による反応が影響を受け、ヘリウム 4 の存在比が減少することを発見し、ヘリウム 4 の観測から揺らぎの大きさに制限が与えられることを明らかにした。

(11) 小スケールに大きな密度揺らぎがある場合には原始ブラックホールが生成されることが知られている。そこで、原始ブラックホールを生成するような大きな揺らぎを作るモデルとしてインフレーションが 2 段階で起こるダブルインフレーション・モデルを構築し、このモデルに基づいて生成される原始ブラックホールが宇宙の暗黒物質を説明できること、さらに、LIGO によって発見された重力波イベントを説明する数 10 太陽質量の原始ブラックホールも生成できることを明らかにした。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 45 件)

[注: 以下の論文は全て査読有で、著者はアルファベット順である。]

- (1) M. Kawasaki, A. Kusenko, Y. Tada and T.T. Yanagida, Primordial black holes as dark matter in supergravity inflation models, Phys. Rev. D 94, 083523-1 (2016)
doi:10.1103/PhysRevD.94.083523
- (2) M. Kawasaki, K. Mukaida and T.T. Yanagida, Simple cosmological solution to the Higgs field instability problem in chaotic inflation and the formation of primordial black holes, Phys. Rev. D 94, 063509 (2016)

- doi:10.1103/PhysRevD.94.063509
- (3) K. Inomata, M. Kawasaki and Y. Tada, Revisiting constraints on small scale perturbations from big-bang nucleosynthesis, *Phys. Rev. D* 94, 043527 (2016)
doi:10.1103/PhysRevD.94.043527
- (4) J.P. Hong, M. Kawasaki and M. Yamada, Charged Q-ball Dark Matter from B and L direction, *JCAP* 1608, 053 (2016)
doi:10.1088/1475-7516/2016/08/053
- (5) K. Harigaya, T. Hayakawa, M. Kawasaki and M. Yamada, Cosmology with a Heavy Polonyi Field, *JCAP* 1606, 015 (2016)
doi:10.1088/1475-7516/2016/06/015
- (6) M. Kawasaki, K. Nakayama and T. Sekiguchi, CMB Constraint on Dark Matter Annihilation after Planck 2015, *Phys. Lett. B* 756, 212-215 (2016)
doi:10.1016/j.physletb.2016.03.005
- (7) M. Kawasaki, M. Yamada, T.T. Yanagida and N. Yokozaki, High-scale SUSY from an R-invariant New Inflation in the Landscape, *Phys. Rev. D* 93, 055022 (2016)
doi:10.1103/PhysRevD.93.055022
- (8) M. Kawasaki and Y. Tada, Can massive primordial black holes be produced in mild waterfall hybrid inflation?, *JCAP* 1608, 041 (2016)
doi:10.1088/1475-7516/2016/08/041
- (9) S. Kasuya, E. Kawakami and M. Kawasaki, Axino dark matter and baryon number asymmetry production by the Q-ball decay in gauge mediation, *JCAP* 1603, 011 (2016)
doi:10.1088/1475-7516/2016/03/011
- (10) M. Kawasaki, F. Takahashi and M. Yamada, Suppressing the QCD Axion Abundance by Hidden Monopoles, *Phys. Lett. B* 753, 677-681 (2016)
doi:10.1016/j.physletb.2015.12.075
- (11) A. Achúcarro, V. Atal, M. Kawasaki and F. Takahashi, The two-field regime of natural inflation, *JCAP* 1512, 044 (2015)
doi:10.1088/1475-7516/2015/12/044
- (12) M. Kawasaki, T.T. Yanagida and N. Yokozaki, Cosmological problems of the string axion alleviated by high scale SUSY of $m_{3/2}=10-100\text{TeV}$, *Phys. Lett. B* 753, 389-294 (2016)
doi:10.1016/j.physletb.2015.12.043
- (13) M. Kawasaki, K. Kohri, T. Moroi and Y. Takaesu, Revisiting Big-Bang Nucleosynthesis Constraints on Dark-Matter Annihilation, *Phys. Lett. B* 751, 246-250 (2015)
doi:10.1016/j.physletb.2015.10.048
- (14) T. Hayakawa, M. Kawasaki and M. Yamada, Can thermal inflation be consistent with baryogenesis in gauge-mediated SUSY breaking models?, *Phys. Rev. D* 93, 063529 (2016)
doi:10.1103/PhysRevD.93.063529
- (15) M. Kawasaki, F. Takahashi and N. Takeda, Adiabatic Invariance of Oscillons/I-balls, *Phys. Rev. D* 92, 105024 (2015)
doi:10.1103/PhysRevD.92.105024
- (16) K. Harigaya, M. Ibe, M. Kawasaki and T.T. Yanagida, Dynamics of Peccei-Quinn Breaking Field after Inflation and Axion Isocurvature Perturbations, *JCAP* 1511, 003 (2015)
doi:10.1088/1475-7516/2015/11/003
- (17) K. Harigaya, M. Ibe, M. Kawasaki and T.T. Yanagida, Revisiting the Minimal Chaotic Inflation Model, *Phys. Lett. B* 756, 113-117 (2016)
doi:10.1016/j.physletb.2016.03.001
- (18) M. Kawasaki, M. Yamada and T.T. Yanagida, Cosmologically safe QCD axion as a present from extra dimension, *Phys. Lett. B* 750, 12-16 (2015)
doi:10.1016/j.physletb.2015.08.043
- (19) J. P. Hong, M. Kawasaki and M. Yamada, Charged Q-balls in gauge mediated SUSY breaking models, *Phys. Rev. D* 92, 063521 (2015)
doi:10.1103/PhysRevD.92.063521
- (20) M. Kawasaki, M. Yamada and T. T. Yanagida, Observable dark radiation from a cosmologically safe QCD axion, *Phys. Rev. D* 91, 125018 (2015)
doi:10.1103/PhysRevD.91.125018
- (21) K. Kadota, M. Kawasaki and K. Saikawa, Gravitational waves from domain walls in the next-to-minimal supersymmetric standard model, *JCAP* 1510, 041 (2015)
doi:10.1088/1475-7516/2015/10/041
- (22) M. Kawasaki and M. Yamada, Affleck-Dine baryogenesis after D-term inflation and solutions to the baryon-dark matter coincidence problem, *Phys. Rev. D* 91, 083512 (2015)
doi:10.1103/PhysRevD.91.083512
- (23) S. Kasuya, M. Kawasaki and T.T. Yanagida, IceCube potential for detecting Q-ball dark matter in gauge mediation, *PTEP* 2015, 053B02 (2015)
doi:10.1093/ptep/ptv056
- (24) M. Kawasaki, K. Saikawa and T. Sekiguchi, Axion dark matter from topological defects, *Phys. Rev. D* 91, 065014 (2015)
doi:10.1103/PhysRevD.91.065014
- (25) K. Harigaya, M. Kawasaki and T.T. Yanagida, Lower bound of the tensor-to-scalar ratio $r > 0.1$ in a nearly quadratic chaotic inflation model in supergravity, *Phys. Lett. B* 741, 267-271 (2015)
doi:10.1016/j.physletb.2014.12.053
- (26) K. Harigaya, T. Hayakawa, M. Kawasaki and S. Yokoyama, CDM/baryon isocurvature perturbations in a sneutrino curvaton model, *JCAP* 1410, 068 (2014)
doi:10.1088/1475-7516/2014/10/068
- (27) S. Kasuya and M. Kawasaki, Q-ball dark matter and baryogenesis in high-scale inflation, *Phys. Lett. B* 739, 174-179 (2014)
doi:10.1016/j.physletb.2014.10.059
- (28) M. Kawasaki, N. Kitajima and F. Takahashi, Relaxing Isocurvature Bounds on String Axion Dark Matter, *Phys. Lett. B* 737, 178-184 (2014)
doi:10.1016/j.physletb.2014.08.017

- (29) A. Kamada, M. Kawasaki and M. Yamada, Solution to the baryon–dark-matter coincidence problem in the constrained minimal supersymmetric model with a 126-GeV Higgs boson, *Phys. Rev. D* 91, 081301 (2015)
doi:10.1103/PhysRevD.91.081301
- (30) T. Fujita, M. Kawasaki and Y. Tada, Non-perturbative approach for curvature perturbations in stochastic delta N formalism, *JCAP* 1410, 030 (2014)
doi:10.1088/1475-7516/2014/10/030
- (31) K. Harigaya, A. Kamada, M. Kawasaki, K. Mukaida and M. Yamada, Affleck-Dine Baryogenesis and Dark Matter Production after High-scale Inflation, *Phys. Rev. D* 90, 043510 (2014)
doi:10.1103/PhysRevD.90.043510
- (32) M. Kawasaki, T. Sekiguchi, T. Takahashi and S. Yokoyama, Isocurvature perturbations and tensor mode in light of Planck and BICEP2, *JCAP* 1408, 043 (2014)
doi:10.1088/1475-7516/2014/08/043
- (33) T. Fujita, M. Kawasaki and S. Yokoyama, Curvaton in large field inflation, *JCAP* 1409, 015 (2014)
doi:10.1088/1475-7516/2014/09/015
- (34) M. Kawasaki and S. Yokoyama, Compensation for large tensor modes with isocurvature perturbations in CMB anisotropies, *JCAP* 1405, 046 (2014)
doi:10.1088/1475-7516/2014/05/046
- (35) S. Kasuya and M. Kawasaki, Baryogenesis from the gauge-mediation type Q-ball and the new type of Q-ball as the dark matter, *Phys. Rev. D* 89, 103534 (2014)
doi:10.1103/PhysRevD.89.103534
- (36) K. Harigaya, M. Kawasaki, K. Mukaida and M. Yamada, Dark Matter Production in Late Time Reheating, *Phys. Rev. D* 89, 083532 (2014)
doi:10.1103/PhysRevD.89.083532
- (37) T. Fujita, M. Kawasaki, K. Harigaya and R. Matsuda, Baryon asymmetry, dark matter, and density perturbation from primordial black holes, *Phys. Rev. D* 89, 103501 (2014)
doi:10.1103/PhysRevD.89.103501
- (38) M. Kawasaki and M. Yamada, Decay rates of Gaussian-type I-balls and Bose-enhancement effects in 3+1 dimensions, *JCAP* 1402, 001 (2014)
doi:10.1088/1475-7516/2014/02/001
- (39) M. Kawasaki and N. Takeda, I-ball formation with logarithmic potential, *JCAP* 1407, 038 (2014)
doi:10.1088/1475-7516/2014/07/038
- (40) K.S. Jeong, M. Kawasaki and F. Takahashi, Axions as Hot and Cold Dark Matter, *JCAP* 1402, 046 (2014)
doi:10.1088/1475-7516/2014/02/046
- (41) T. Hiramatsu, M. Kawasaki and K. Saikawa, On the estimation of gravitational wave spectrum

- from cosmic domain walls, *JCAP* 1402, 031 (2014)
doi:10.1088/1475-7516/2014/02/031
- (42) T. Fujita, M. Kawasaki, Y. Tada and T. Takesako, A new algorithm for calculating the curvature perturbations in stochastic inflation, *JCAP* 1312, 036 (2013)
doi:10.1088/1475-7516/2013/12/036
- (43) T. Fujita, K. Harigaya and M. Kawasaki, Large Scale Cosmic Perturbation from Evaporation of Primordial Black Holes, *Phys. Rev. D* 88, 123519 (2013)
doi:10.1103/PhysRevD.88.123519
- (44) M. Kawasaki, T. T. Yanagida and K. Yoshino, Domain wall and isocurvature perturbation problems in axion models, *JCAP* 1311, 030 (2013)
doi:10.1088/1475-7516/2013/11/030
- (45) M. Kawasaki, N. Kitajima and S. Yokoyama, Gravitational waves from a curvaton model with blue spectrum, *JCAP* 1308, 042 (2013)
doi:10.1088/1475-7516/2013/08/042

[学会発表](計 6件)

- (1) M. Kawasaki, Formation of primordial black holes in double inflation, “Why does the Universe accelerated? -- Exhaustive study and challenge for the future”, KEK 8-10 March 2017
- (2) M. Kawasaki, Formation of primordial black holes in double inflation, “Particle Astrophysics and Cosmology Including Fundamental Interactions (PACIFIC 2016)”, Moorea, French Polynesia, 11-17 September 2016
- (3) M. Kawasaki, Cosmological Aspect of QCD Axion, “B-mode Cosmology”, Tsukuba, Japan, 19-21 February 2015
- (4) M. Kawasaki, Dark matter axion from topological defects, “IBS-MultiDark Joint Focus Program: WIMPs and Axions”, Daejeon, Korea, 10-21 October 2014
- (5) M. Kawasaki, Cosmological problems in axion models, “The 19th International Symposium on Particles, Strings and Cosmology”, Taipei, Taiwan, 20-26 November 2013
- (6) M. Kawasaki, Domain wall and isocurvature perturbation problems in axion models, “The 10th International Symposium on Cosmology and Particle Physics”, Honolulu, Hawaii, USA, 12-15 November 2013

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川崎 雅裕 (KAWASAKI, Masahiro)

東京大学・宇宙線研究所・教授

研究者番号：50202031

(2)研究分担者
なし

(3)連携研究者
なし

(4)研究協力者
なし