

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 6月 4日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540267

研究課題名（和文） 宇宙初期におけるスカラー場の進化の宇宙論的観測に基づく探求

研究課題名（英文） Study on evolution of scalar fields in the early universe and its observational consequences

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

研究成果の概要（和文）：宇宙初期の真空の相転移に伴って生成される位相欠陥（ドメイン・ウォール、ストリング）や超対称性理論で予言される Q ボールなどの空間的に局在したスカラー場の宇宙論的進化を数値シミュレーションによって定量的に調べ、それらが生成する暗黒物質やバリオン数を定量的に評価し、また、観測と比較することで背後にある素粒子理論に制限を与えた。

研究成果の概要（英文）：We studied localized scalar field configurations such as topological defects (domain walls and strings) produced in the vacuum phase transitions and Q-balls predicted in supersymmetric theories. We investigated the cosmological evolution of those scalar fields by numerical simulations and estimated dark matter and baryon number densities which they produce. Thereby, we obtained constraints on particle physics models by using observational data.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
年度			
年度			
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：宇宙物理学

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：素粒子的宇宙論、インフレーション、アクシオン、位相欠陥、超対称性

1. 研究開始当初の背景

近年、宇宙論的観測は飛躍的な発展を遂げ、誕生間もない宇宙に関する重要な情報をもたらしている。特に、2003年のWMAPによる宇宙背景放射の観測によって、宇宙論は精密科学へと進化し、さらに宇宙のごく初期にインフレーションと呼ばれる加速度的な宇宙膨張があったことが強く示唆された。また、素粒子理論ではインフレーションを起こすインフラトンをはじめ宇宙論に影響を与え

る多くのスカラー場が予言され、その中には宇宙の暗黒物質や物質・反物質の非対称性の起源に関係しているものがあり、観測からその手がかりを得ることが可能になってきた。

2. 研究の目的

(1) 位相欠陥からの重力波生成：真空の相転移に伴って生成される位相欠陥である、ドメイン・ウォールについて、それらから生成

さる重力波を定量的に評価し観測可能性を議論する。

(2) アフレック・ダイン機構と Q ボール生成：超対称性理論において宇宙における物質・反物質の非対称性の起源を説明するアフレック・ダイン機構を考え、そこで重要な役割を果たすアフレック・ダイン場の宇宙論的進化を調べ、Q ボールやバリオン等曲率揺らぎの生成を調べ、観測からモデルに対して制限を与える。

(3) アクシオンモデルへの制限：素粒子の強い相互作用における CP 問題を解決するアクシオンモデルに関して、アクシオンがインフレーション中に獲得する揺らぎによって生じる等曲率密度揺らぎやアクシオンモデルで必然的に作られるドメイン・ウォールとストリングからのアクシオン生成が宇宙に及ぼす影響を調べ、最新の宇宙背景放射の観測から制限をつける。

3. 研究の方法

(1) 位相欠陥からの重力波生成：ドメイン・ウォールから放出される重力波を、ドメイン・ウォールを生成する相転移の直前からドメイン・ウォールが崩壊して重力波を放出するまでの全経過におけるスカラー場のダイナミクスを3次元数値シミュレーションによって計算し、放出される重力波のスペクトルを定量的に評価する。

(2) アフレック・ダイン機構と Q ボール生成：宇宙初期にアフレック・ダイン機構に伴って生成される Q ボールについての解析を高精度数値シミュレーションを用いて行う。その結果を基にバリオン数の揺らぎについて解析する。

(3) アクシオンモデルへの制限：アクシオンモデルで生成されるストリングとドメイン・ウォールの進化を格子シミュレーションによって調べる。また、様々なアクシオンモデルを用いて等曲率揺らぎのスケール依存性や非ガウス性を計算する。

4. 研究成果

(1) 初期宇宙相転移によってドメイン・ウォールが作られる際に生じる重力波のスペクトラムを宇宙が物質優勢期・放射優勢期の両方の場合に3次元シミュレーションにより評価し、さらにシミュレーションのダイナミックレンジが小さいという欠点を補うために半解析的に重力波スペクトルを求める方

法を示した。

(2) アフレック・ダイン機構に伴って生成される Q ボールについて、高精度の3次元数値シミュレーションを用いて詳しく解析し、生成される Q ボールの半径、チャージ、アフレック・ダイン場の初期値の間の関係や反 Q ボールが生成や Q ボールのチャージ分布などを定量的に明らかにした。

(3) Q ボールが宇宙のバリオン数と暗黒物質の両方を説明する可能性を調べた。ゲージ相互作用によって超対称性の破れが伝わるモデルでは一般にグラビティーノが最も軽い安定な超対称性粒子となり暗黒物質の候補となることに注目して、Q ボールの崩壊からバリオンと共に生成されるグラビティーノとニュートラリーノの存在比、及び崩壊が元素合成に与える影響を評価し、Q ボールから作られたバリオンが宇宙のバリオン数を説明し、同時にグラビティーノが宇宙の暗黒物質になるシナリオが存在することを示した。

(4) アクシオンモデルに現れるアクシオン・ストリングの宇宙論的進化を調べ、ストリングから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評価した。またそれに基づき現在の宇宙におけるアクシオン密度を評価し、Peccei-Quinn スケールに対する制限を得た。

(5) アクシオンモデルでストリング生成の後に作られるドメイン・ウォールの宇宙論的進化を数値シミュレーションで詳しく調べドメイン・ウォールからのアクシオン放出スペクトルを定量的に評価した (図 1)。

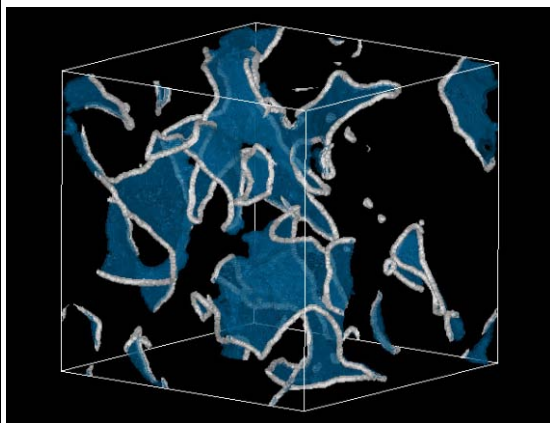


図 1 ドメイン・ウォールのシミュレーション

この結果ドメイン・ウォールとストリングのネットワークを特徴付けるドメイン・ウォール数 N が 1 の場合にはドメイン・ウォールからのアクシオンが宇宙の密度に最も大きな寄与を与え宇宙の暗黒物質を説明できる

ことを明らかにした。さらに、この結果を用いて Peccei-Quinn スケールに対する厳しい制限を得た。

ドメイン・ウォール数 N が 2 以上の場合には、放出されたアクシオンが宇宙の暗黒物質密度を超えてしまい、 N が 2 以上のアクシオンモデルはドメイン・ウォールが生成される場合には棄却されることを明らかにした。これは今後アクシオンモデルを構築する際に重要な制限となる。

(6) インフレーション中に存在するインフラトン以外の軽い場が宇宙の密度揺らぎを生成するカーバトンモデルにおいて、アクシオンのようなポテンシャルを持つカーバトンを考えると、生成される密度揺らぎスペクトルが極端にブルーになりスモール・スケールで大きな密度揺らぎが作られ、その結果、原始ブラックホールが生成される可能性があることを指摘し、実際、このモデルにおいて暗黒物質を説明するのに十分な原始ブラックホールや巨大ブラックホールの種となる 10 の 5 乗太陽質量の原始ブラックホールが生成されることを示した。

(7) アクシオンモデルを超対称化した超対称アクシオンモデルにおいてインフレーションが自然に実現し、アクシオンのスカラーパートナーのアクシオンの崩壊によってグラビティーノなどの宇宙論的に問題となる粒子が薄められ、観測と矛盾しないシナリオを構築することができることを示した。

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 41 件)

1. C. Hikage, M. Kawasaki, T. Sekiguchi, T. Takahashi, "Extended analysis of CMB constraints on non-Gaussianity in isocurvature perturbations," JCAP 1303, 020 (2013) 査読有り
DOI: 10.1088/1475-7516/2013/03/020
2. A. Kamada, M. Kawasaki, M. Yamada, "Opening the window to the co-genesis with Affleck-Dine mechanism in gravity mediation," Phys. Lett. B 719, 9-13 (2013) 査読有り
DOI: 10.1016/j.physletb.2013.01.017
3. M. Kawasaki, N. Kitajima, K. Nakayama, "Smooth hybrid inflation in a supersymmetric axion model," Phys. Rev. D 87, 035010 (2013) 査読有り
DOI: 10.1103/PhysRevD.87.035010
4. K. Harigaya, M. Ibe, M. Kawasaki, T.T. Yanagida, "Non-Gaussianity from Attractor Curvaton," Phys. Rev. D 87, 063514 (2013) 査読あり
DOI: 10.1103/PhysRevD.87.063514
5. K. Harigaya, M. Kawasaki, T.T. Yanagida, "High Scale SUSY Breaking From Topological Inflation," Phys. Lett. B 719, 126-130 (2013) 査読有り
DOI: 10.1016/j.physletb.2013.01.002
6. M. Kawasaki, T. Kobayashi, F. Takahashi, "Non-Gaussianity from Axionic Curvaton," JCAP 1303, 016 (2013) 査読有り
DOI: 10.1088/1475-7516/2013/03/016
7. M. Kawasaki, M. Yamada, "Q ball Decay Rates into Gravitinos and Quarks," Phys. Rev. D 87, 023517 (2013) 査読有り
DOI: 10.1103/PhysRevD.87.023517
8. T. Hiramatsu, M. Kawasaki, K. Saikawa, T. Sekiguchi, "Axion cosmology with long-lived domain walls," JCAP 1301, 001 (2013) 査読有り
DOI: 10.1088/1475-7516/2013/01/001
9. M. Kawasaki, N. Kitajima, T.T. Yanagida, "Primordial black hole formation from an axion-like curvaton model," Phys. Rev. D 87, 063519 (2013) 査読有り
DOI: 10.1103/PhysRevD.87.063519
10. M. Kawasaki, T. Takesako, "Stochastic Approach to Flat Direction during Inflation," JCAP 1208, 031 (2012) 査読有り
DOI: 10.1088/1475-7516/2012/08/031
11. T. Hiramatsu, M. Kawasaki, K. Saikawa, T. Sekiguchi, "Production of dark matter axions from collapse of string-wall systems," Phys. Rev. D 85, 10502 (2012) 査読有り
DOI: 10.1103/PhysRevD.85.105020
12. M. Kawasaki, A. Kusenko, T.T. Yanagida, "Primordial seeds of supermassive black holes," Phys. Lett. B 711, 1-5 (2012) 査読有り
DOI: 10.1016/j.physletb.2012.03.056
13. S. Kasuya, M. Kawasaki, "Gravitino dark matter and baryon asymmetry from Q-ball decay in gauge mediation," Phys. Rev. D 84, 123528 (2011) 査読有り
DOI: 10.1103/PhysRevD.84.123528
14. M. Kawasaki, T. Sekiguchi, T. Takahashi, "Differentiating CDM and Baryon Isocurvature Models with 21

- cm Fluctuations,” JCAP 1110, 028 (2011) 査読有り
DOI: 10.1088/1475-7516/2011/10/028
15. M. Kawasaki, N. Kitajima, K. Nakayama, “Cosmological Aspects of Inflation in a Supersymmetric Axion Model,” Phys. Rev. D83, 123521 (2011) 査読有り
DOI: 10.1103/PhysRevD.83.123521
 16. M. Kawasaki, K. Saikawa, “Study of gravitational radiation from cosmic domain walls,” JCAP 1109, 008 (2011) 査読有り
DOI: 10.1088/1475-7516/2011/09/008
 17. T. Hiramatsu, M. Kawasaki, K. Saikawa, “Evolution of String-Wall Networks and Axionic Domain Wall Problem,” JCAP 1108, 030 (2011) 査読有り
DOI: 10.1088/1475-7516/2011/08/030
 18. T. Hiramatsu, M. Kawasaki, T. Sekiguchi, M. Yamaguchi J. Yokoyama, “Improved estimation of radiated axions from cosmological axionic strings,” Phys. Rev. D83, 123531 (2011) 査読有り
DOI: 10.1103/PhysRevD.83.123531
 19. M. Kawasaki, N. Kitajima, K. Nakayama, “Inflation from a Supersymmetric Axion Model,” Phys. Rev. D82, 123531 (2010) 査読有り
DOI: 10.1103/PhysRevD.82.123531
 20. T. Hiramatsu, M. Kawasaki, F. Takahashi, “Numerical study of Q-ball formation in gravity mediation,” JCAP 1006, 008 (2010) 査読有り
DOI: 10.1088/1475-7516/2010/06/008
 21. T. Hiramatsu, M. Kawasaki, K. Saikawa, “Gravitational Waves from Collapsing Domain Walls,” JCAP 1005, 032 (2010) 査読有り
DOI: 10.1088/1475-7516/2010/05/032
 22. M. Kawasaki, K. Miyamoto, K. Nakayama, “Gravitational waves from kinks on infinite cosmic strings,” Phys. Rev. D 81, 103523 (2010) 査読有り
DOI: 10.1103/PhysRevD.81.103523
 23. K. Ishiwata, M. Kawasaki, K. Kohri, T. Moroi, “Right-handed sneutrino dark matter and big-bang nucleosynthesis,” Phys. Lett. B 689, 163-168 (2010) 査読有り
DOI: 10.1016/j.physletb.2010.04.054
 24. M. Kawasaki, T. Sekiguchi, “Probing the primordial power spectra with inflationary priors,” JCAP 1002, 013 (2010) 査読有り

- DOI: 10.1088/1475-7516/2010/02/013
25. T. Kanzaki, M. Kawasaki, K. Nakayama, “Effects of Dark Matter Annihilation on the Cosmic Microwave Background,” Prog. Theor. Phys. 123, 853-865 (2010) 査読有り
DOI: 10.1143/PTP.123.853

[学会発表] (計 5 件)

1. M. Kawasaki, Axion Cosmology -- Axions from topological defects “Accelerators In the Universe 2012 Axion Cosmophysics”, KEK, Tsukuba, Japan, 6-9 Nov. 2012.
2. M. Kawasaki, Axion Cosmology “The 4th GCOE International Symposium: Weaving Science Web beyond Particle-Matter Hierarchy”, Tohoku University, Japan, February 20-23, 2012
3. M. Kawasaki, Particle Cosmology, Nagoya University GCOE Winter School/Workshop 2011 “Particle Cosmology”, Sakata-Hirata Hall, Nagoya University, December 19 - 21, 2011
4. M. Kawasaki, Inflation from a SUSY Axion Model “International Conference on Particle Physics and Cosmology (COSMO 11)” Porto, Portugal, August 22-26, 2011
5. M. Kawasaki, Isocurvature Perturbation as Probe for the Early Universe “Extra-Dimension Probe by Cosmophysics” KEK, Japan, November 9-12, 2010

[その他]

ホームページ

<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/th/kawasaki/Welcome.html>

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