

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23540327

研究課題名(和文)電荷を持つ超対称性粒子の宇宙論的検証

研究課題名(英文)Cosmological tests of charged supersymmetric particles

研究代表者

郡 和範 (Kohri, Kazunori)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号：50565819

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：4年間で、関連の深い論文34本、まとめの論文を1本執筆したことが最大の成果である。2013年のヒッグス粒子発見を受け、それと無矛盾な最小超対称性理論のパラメータ領域は、厳しく制限されることとなった。そのパラメータの範囲内で、超対称性粒子がダークマタになる条件と、長寿命荷電粒子がビッグバン元素合成に与える悪い影響を逃れる条件を課す場合、さらにパラメータ領域は制限される。我々はsinglinoという粒子を一つ導入することにより超対称性理論を拡張すれば、そのsinglinoがダークマタとなり、ビッグバン元素合成でのリチウム7問題とリチウム6問題を同時に解決することを示した。

研究成果の概要(英文)：During the period in which I have been supported by this grant, I have published 34 papers including a single concluding full-length paper. In response to the discovery of the Higgs particle in 2013, the parameter spaces of Minimal Supersymmetric Standard Models (MSSM) have been restricted severely. In order to fit the data of the relic abundance of the cold dark matter which could be a particle in MSSM, and satisfy the conditions for the successful big-bang nucleosynthesis, the allowed parameter spaces have been severely shrunk or disappeared. However, we have shown that if we add a new singlet particle (singlino) into the MSSM model, the situation is changed. The singlino can become the cold dark matter, and the existence of the long-lived scalar tau lepton can solve both the Lithium 7 and Lithium 6 problems simultaneously in some parameter spaces. By those achievements, we have summarized all of known important effects on cosmology induced by a long-lived charged massive particle.

研究分野：素粒子の宇宙論

キーワード：宇宙論 ダークマタ 超対称性粒子

## 1. 研究開始当初の背景

WMAP 衛星などの宇宙背景放射(CMB)などの観測により、現在の宇宙のエネルギー密度は約 26%がダークマター、約 69%がダークエネルギーであり、我々の知っている物質である原子はわずか約 5%しかないことが知られていた。宇宙の全体の約 95%が未知の物質と未知のエネルギーで構成されているという驚くべき結果である。この現代物理学の謎に対し、我々基礎物理学者の次の役割はそれらダークマターとダークエネルギーの正体が何かということ突き止めることである。

## 2. 研究の目的

上記の問題は、分野の垣根を取り払って、現代基礎物理学の総力を結集して挑まなければならない問題である。ダークマターは未発見の中性粒子である可能性がある。その直接検出は非常に困難であるが、素粒子論の標準理論を越える理論、例えば超対称性理論などでは、そうしたダークマターの候補を予言するのに加え、長寿命の荷電粒子の存在をも同時に予言している。これらの理論では宇宙のある時期に長寿命荷電粒子が存在し、それがその後ダークマターに崩壊するというシナリオが自然に描ける。しかもそのような長寿命荷電粒子が宇宙に存在すると、宇宙論との整合性から、その性質に厳しい制限を得る事ができる。そうした長寿命の荷電粒子の性質を総合的に明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

長寿命の荷電粒子が存在すると、ビッグバン元素合成(BBN)、宇宙背景放射(CMB)のゆらぎ、大規模構造(LSS)に決定的な変更をもたらす。私の研究の方法はこの変更に着目し、超対称荷電粒子などの新理論の下での宇宙論モデルの予言と現在の観測とを比較することにより新理論のモデルを検証することである。またその結果に基づいて、それらが関係する将来実験への提言を行う。

## 4. 研究成果

4年間で、関連の深い論文 42本、まとめの論文を1本執筆したことが最大の成果である。2013年のヒッグス粒子発見を受け、それと無矛盾な最小超対称性理論のパラメーター領域は、厳しく制限されることとなった。そのパラメーターの範囲内で、超対称性粒子がダークマターになる条件と、長寿命荷電粒子がビッグバン元素合成に与える悪い影響を逃れる条件を課す場合、さらにパラメーター領域は制限される。我々は *singlino* という粒子を一つ導入することにより超対称性理論

を拡張すれば、その *singlino* がダークマターとなり、ビッグバン元素合成でのリチウム7問題とリチウム6問題を同時に解決することを示した[Kohri et al, Phys. Rev. D 90 (2014) 035003]。これは素粒子論分野と宇宙論分野の分野を横断する成果である。その他、長寿命荷電粒子が大規模構造に与える影響をコンピューターシミュレーションで計算するなど[Kamada et al, JCAP 1303, 008 (2013)]、視覚的にもその影響を明らかにすることに成功し、関連分野からの反響は大きい。当初の目的を十二分に達成する成果である。

## 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 34 件、うち投稿中で未掲載 2 件)

1 What we can learn from running of the tensor mode: a case of the scalon, Kazunori Kohri, Chia-Min Lin, Tomohiro Matsuda, JCAP (2015) submitted, arXiv:1503.05267 [astro-ph.CO]

2 Consistency Relations for Large Field Inflation: Non-minimal Coupling, Takeshi Chiba, Kazunori Kohri, PTEP 2015 2, 023E01, arXiv:1411.7104 [astro-ph.CO]

3 Superheavy dark matter and IceCube neutrino signals: bounds on decaying dark matter, Carsten Rott, Kazunori Kohri, Seong Chan Park, JCAP (2015) submitted, arXiv:1408.4575 [hep-ph]

4 Small Field Coleman-Weinberg Inflation driven by Fermion Condensate, Satoshi Iso, Kazunori Kohri, Kengo Shimada, Phys. Rev. D91 (2015) 4, 044006, arXiv:1408.2339 [hep-ph]

5 Consistency Relations for Large Field Inflation, Takeshi Chiba, Kazunori Kohri, PTEP 2014 (2014) 9, 093E01, arXiv:1406.6117 [astro-ph.CO]

6 Ambiguity in running spectral index with an extra light field during inflation, Kazunori Kohri, and Tomohiro Matsuda, JCAP 1502 (2015) 02, 019, arXiv: 1405.6769 [astro-ph.CO]

7 Testing scenarios of primordial black holes being the seeds of supermassive black holes by ultracompact minihalos and CMB  $\mu$ -distortions, Kazunori Kohri, Tomohiro Nakama, Teruaki Suyama, Phys. Rev.

- D 90 (2014) 083514, arXiv:1405.5999 [astro-ph.CO]
- 8 Detecting the relic gravitational wave from the electroweak phase transition at SKA, Yohei Kikuta, Kazunori Kohri, Eunseong So, JCAP (2014) submitted, arXiv:1405.4166 [hep-ph]
- 9 Probing Lepton Asymmetry with 21 cm Fluctuations, Kazunori Kohri, Yoshihiko Oyama, Toyokazu Sekiguchi, Tomo Takahashi, JCAP 1409 (2014) 014, arXiv:1404.4847 [astro-ph.CO]
- 10 Distinguishing between Extra Natural Inflation and Natural Inflation after BICEP2, Kazunori Kohri, C. S. Lim and C.-M. Lin, JCAP 1408 (2014) 001, arXiv:1405.0772 [hep-ph]
- 11 Big-bang nucleosynthesis through bound-state effects with a long-lived slepton in the NMSSM, Kazunori Kohri, Masafumi Koike, Yasufumi Konishi, Shingo Ohta, Joe Sato, Takashi Shimomura, Kenichi Sugai, Masato Yamanaka, Phys. Rev. D 90 (2014) 035003, arXiv:1403.1561 [hep-ph]
- 12 130 GeV gamma-ray through axion conversion M. Yamanaka, Kazunori Kohri, K. Ioka, and M.M. Nojiri, Phys. Rev. D 91 (2015) 6, 063532, arXiv:1310.3474 [astro-ph.CO]
- 13 Hilltop Supernatural Inflation and SUSY Unified Models, Kazunori Kohri, C. S. Lim, C.-M. Lin and Y. Mimura, JCAP 1401 (2014) 029, arXiv:1309.4551 [hep-ph]
- 14 Threshold of primordial black hole formation, T. Harada, C.-M. Yoo and Kazunori Kohri, Phys. Rev. D 88, 084051 (2013), arXiv:1309.4201 [astro-ph.CO]
- 15 Scale-dependent CMB asymmetry from primordial configuration, Kazunori Kohri, C.-M. Lin and T. Matsuda, JCAP (2013) in press, arXiv:1308.5790 [hep-ph]
- 16 Constraining the co-genesis of Visible and Dark Matter with AMS-02 and Xenon-100, Kazunori Kohri and N. Sahu, Phys. Rev. D 88 103001 (2013), arXiv:1306.5629 [hep-ph]
- 17 Emissivities of gamma's and electrons/positrons Induced by Collisions between Cosmic-Ray Proton and ISM in the Galaxy, T. Shibata, Y. Ohira, Kazunori Kohri and R. Yamazaki, Astropart. Phys. 55 (2014) 8-16, arXiv:1304.0879 [astro-ph.HE]
- 18 Observable induced gravitational waves from an early matter phase, L. Alabidi, Kazunori Kohri, M. Sasaki and Y. Sendouda, JCAP 1305, 033 (2013), arXiv:1303.4519 [astro-ph.CO]
- 19 Delta-N Formalism for Curvaton with Modulated Decay, Kazunori Kohri, Chia-Min Lin, Tomohiro Matsuda, JCAP 1306, 009 (2013), arXiv:1303.2750 [hep-ph]
- 20 Precise Measurements of Primordial Power Spectrum with 21 cm Fluctuations, Kazunori Kohri, Yoshihiko Oyama, Toyokazu Sekiguchi, and Tomo Takahashi, JCAP 1310, 065 (2013), arXiv:1303.1688 [astro-ph.CO]
- 21 Modulated decay in the multi-component Universe, Seishi Enomoto, Kazunori Kohri, Tomohiro Matsuda, JCAP 1308, 047 (2013), arXiv:1301.3787 [hep-ph]
- 22 Structure of Dark Matter Halos in Warm Dark Matter models and in models with Long-Lived Charged Massive Particles, Ayuki Kamada, Naoki Yoshida, Kazunori Kohri, Tomo Takahashi, JCAP 1303, 008 (2013), arXiv:1301.2744 [astro-ph.CO]
- 23 X-ray Spectroscopy of the Mixed Morphology Supernova Remnant W28 with XMM Newton, Ryoko Nakamura, Aya Bamba, Manabu Ishida, Ryo Yamazaki, Ken'ichi Tatematsu, Kazunori Kohri, Gerd Puhlhofer, Stefan J. Wagner, Makoto Sawada, Publ. Astron. Soc. Jap. 66 (2014) 62, arXiv:1402.0603 [astro-ph.HE]
- 24 PBH from the inflating curvaton, Kazunori Kohri, Chia-Min Lin, Tomohiro Matsuda, Phys. Rev. D 87, 103527 (2013), arXiv:1211.2371 [hep-ph]
- 25 Non-Gaussianity in the unified curvaton mechanism: The generalized curvaton mechanism that comprehends modulation at the transition, Seishi Enomoto, Kazunori Kohri, Tomohiro Matsuda, Phys. Rev. D 87, 123520 (2013), arXiv:1210.7118 [hep-ph]
- 26 Allowed slepton intergenerational mixing in light of light element abundances, Kazunori Kohri, Shingo Ohta, Joe Sato, Takashi Shimomura, Masato Yamanaka, Phys. Rev. D 86 (2012) 095024

27 Observable Spectra of Induced Determination of neutrino mass hierarchy by 21 cm line and CMB B-mode polarization observations, Yoshihiko Oyama, Akie Shimizu and Kazunori Kohri, Phys. Lett. B718 (2013) 1186-1193, arXiv:1205.5223 [astro-ph.CO]

28 Gravitational Waves from Inflation, Laila Alabidi, Kazunori Kohri, Misao Sasaki, and Yuuiti Sendouda, JCAP 1209 (2012) 017, arXiv:1203.4663 [astro-ph.CO]

29 Gamma-ray are and absorption in Crab Nebula: Lovely TeV{PeV astrophysics, Kazunori Kohri, Y. Ohira and K. Ioka, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 424 (2012) 2249, arXiv:1202.6439 [astro-ph.HE]

30 The hybrid curvaton, K. Dimopoulos, Kazunori Kohri and T. Matsuda, Phys.Rev. D 85 (2012) 123541, arXiv:1201.6037 [hep-ph]

31 Evolution of Synchrotron X-rays in Supernova Remnants, R. Nakamura, A. Bamba, T. Dotani, M. Ishida, R. Yamazaki and Kazunori Kohri, Astrophys. J. 746, 134 (2012), [arXiv:1112.0822 [astro-ph.HE]]

32 The inflating curvaton, K. Dimopoulos, Kazunori Kohri, D. H. Lyth and T. Matsuda, JCAP 1203 (2012) 022, arXiv:1110.2951 [astro-ph.CO].

33 Phenomenology of Gravitational Aether as a solution to the Old Cosmological Constant Problem, S. Aslanbeigi, G. Robbers, B. Z. Foster, Kazunori Kohri and N. Afshordi, Phys. Rev. D 84, 103522 (2011), [arXiv:1106.3955 [astro-ph.CO]].

34 Big-bang nucleosynthesis with a long-lived charged massive particle including  $4\text{He}$  spallation processes, T. Jittoh, Kazunori Kohri, M. Koike, J. Sato, K. Sugai, M. Yamanaka and K. Yazaki, Phys. Rev. D 84, 035008 (2011), [arXiv:1105.1431 [hep-ph]].

[学会発表] 計 88 件、うち招待講演 55 件、発表者はすべて単名の郡和範)

1 招待講演 宇宙論におけるリチウム 7 問題と標準理論を超える物理学", 大阪市立大学物理教室セミナー(2011 年 6 月 17 日)

2 招待講演 "速度依存する対消滅散乱断面積

をもつ素粒子ダークマターモデルの宇宙論的検証", 東工大 宇宙論研究室(2011 年 10 月 25 日)

3 招待講演 BBN-CMB constraints on annihilating DM", in HEAP2011, KEK, Japan (2011 年 11 月 14 日)

4 招待講演 "Dark Matter indirect detection in terms of cosmic rays, gamma-ray, BBN and CMB", MTI University, Cairo, Egypt (2011 年 12 月 2 日)

5 招待講演 Dark Matter indirect detection in terms of cosmic rays, gamma-ray, BBN and CMB", CATACT PYRAMIDS, Giza, Egypt (2011 年 12 月 2 日)

6 招待講演 集中講義 素粒子的宇宙論入門", 首都大東京物理教室(2012 年 2 月 8 日-10 日)

7 招待講演 領域 2 シンポジウム招待講演"宇宙における高温、高密度、強磁場の現象", JPS meeting, Kwansai Gakuin Univ., Nishinomiya (2012 年 3 月 25 日)

8 招待講演 ``Cosmological constraints on long-lived neutral and charged SUSY particles", 名古屋大学 物理教室 セミナー (2012 年 4 月 11 日)

9 招待講演 ``Axion searches in astrophysics", 国際会議「Near infrared background and the epoch of reionization」, University of Texas, Austin (2012 年 5 月 15 日)

10 招待講演 ``ビッグバン元素合成研究の最前線", 東京理科大学理学部物理学科 セミナー(2012 年 5 月 29 日)

11 招待講演 ``宇宙のダークエネルギーとはなにか", KEK 公開講座 KEK つくばキャンパス (2012 年 6 月 30 日)

12 招待講演 ``私は誰の子? 宇宙の子 - 宇宙のはじまりと未来のひみつ-", 全国七夕講演会 2012 つくばエキスポセンター (2012 年 7 月 7 日)

13 招待講演 ``String axion astrophysics", The 3rd UTQuest workshop ExDiP 2012 "Superstring Cosmophysics", 帯広 (2012 年 8 月 11 日)

14 招待講演 ``Big Bang Nucleosynthesis and New Physics", COSMO12 Beijing, China (2012 年 9 月 12 日)

- 15 招待講演 ``Gravitational wave, primordial black hole, large running spectral index in Hilltop inflation/inflating curvaton"、KITPC Lecture Program, Beijing China (2012年9月18日)
- 16 招待講演 ``Determination of neutrino mass hierarchy by 21 cm line and CMB B-mode polarization observations"、KITPC Lecture Program Beijing China (2012年9月18日)
- 17 招待講演 ``Gravitational wave and primordial black holes in Hilltop inflation/Hilltop inflating curvaton"、立教大学宇宙物理学研究室 セミナー (2012年10月9日)
- 18 招待講演 ``宇宙論からの崩壊粒子への制限"、富山大学理論物理学研究室 セミナー (2012年10月12日)
- 19 招待講演 ``Determination of neutrino mass hierarchy by 21cm and CMB B mode polarization observation"、大阪大学素粒子論研究室セミナー (2012年10月30日)
- 20 招待講演 ``String axion cosmophysics"、KEK-CPGS 国際会議「AIU2012」 KEK つくば (2012年11月6日)
- 21 招待講演 集中講義 ``宇宙論からの崩壊粒子への制限"、京都大学理学部素粒子論研究室 (2013年1月17日)
- 22 招待講演 ``素粒子論的宇宙論"、札幌ウインタースクール2013 招待講師 (2013年2月13日-15日)
- 23 招待講演 ``Gravitational wave, primordial black holes, large running spectral index in Type-III Hilltop inflation"、大阪市立大学 (2013年3月1日)
- 24 招待講演 ``21cm, gravitational wave, and PBH or UCMH formations to observe small-scale fluctuations", CPPP2013, Helsinki (2013年6月5日)
- 25 招待講演 ``21cm line fluctuations, gravitational wave, and PBH or UCMH formations in type-III hilltop inflation"、素粒子論研究室セミナー 埼玉工業大 (2013年7月1日)
- 26 招待講演 KIAS Summer School Lecture Series ``Cosmological constraints on decaying/annihilating dark matter", KIAS, KOREA (2013年7月29日-8月5日)
- 27 招待講演 ``Primordial black hole formations in type-III hilltop inflation models"、EHQG セミナー、名古屋大学 (2013年10月15日)
- 28 招待講演 第66回藤原セミナー ``130 GeV gamma-ray line and axion conversion"、"X-raying the Gamma-Ray Universe" 箱根湯本 (2013年11月4日)
- 29 招待講演 ``ダークマターのなぞ"、サイエンスアゴラ WS7「のぞく かがく」日本科学未来館 (2013年11月10日)
- 30 招待講演 `` Primordial black holes formations in inflation/curvaton models"、The workshop on wormholes and primordial black holes、名古屋大 (2013年-11月25日)
- 31 招待講演 ``インフレーション宇宙における小さなスケールのゆらぎの生成と将来観測可能性"、"第2回観測的宇宙論ワークショップ"、国立天文台三鷹 (2013年12月4日)
- 32 招待講演 第7回 湯川記念財団・木村栄理論物理学賞、 ``超重力理論と初期宇宙の元素合成" 京都大学基礎物理学研究所 (2014年1月22日)
- 33 招待講演 ``Dark matter and PeV neutrinos" 研究会「NuPeV 2014」上総一ノ宮シーサイドオーツカホテル (2014年2月17日)
- 34 招待講演 ``21cm, gravitational wave, and PBH or UCMH formations to observe small-scale fluctuations"、宇宙進化コロキウム、大阪大(2014年3月5日)
- 35 招待講演 ``インフレーション宇宙における小さなスケールのゆらぎの生成と将来観測可能性"、宇宙物理学セミナー、弘前大 (2014年3月10日)
- 36 招待講演 ``21cm line, gravitational wave, and PBH or UCMH formations to observe small-scale fluctuations"、Workshop 2014 ``TeV-scale physics after the discovery of the Higgs particle"、東京女子大 (2014年3月25日)
- 37 招待講演 ``重力的に崩壊する粒子に対するビッグバン元素合成からの制限"、素粒子論領域・宇宙線宇宙物理学領域合同、日本物理学会年会、東海大(2014年3月27日)
- 38 招待講演 KASI Conference ``Big-bang nucleosynthesis and decaying- and/or

annihilating SUSY) dark matter", KASI, Daejeon, KOREA (2014年4月17日)

39 招待講演 KASI Workshop "Perspectives and insights on future detections of small-scale fluctuations", KASI, Daejeon, KOREA (2014年4月22日)

40 招待講演 SKKU Seminar "Perspectives and insights on future detections of small-scale fluctuations", Suwon, Korea ((2014年4月25日)

41 招待講演 KEK Caravan, Kougakuin Univ Open House, "Misteries of Dark Matter and Dark Eerngy " 工学院大学 (2014年5月10日)

42 招待講演 NAOJ Theory Seminar, "How to distinguish large field Inflation models after BICEP2" National Astronomical Observatory of Japan (2014年7月2日)

43 招待講演 集中講義, "宇宙論入門", 静岡大 (2014年9月24日 -- 9月26日)

44 招待講演 素粒子論セミナー "Inflation after BICEP2", 静岡大 (2014年9月26日)

45 招待講演 素粒子論セミナー "Introduction to infaltional cosmology", 北大 (2014年10月31日)

46 招待講演 素粒子論セミナー "Coleman-Weinberg conformal inflation models", 北大 (2014年10月31日)

47 招待講演 集中講義 "素粒子的宇宙論入門" 新潟大・山形大 素粒子合同合宿 2014、磐梯青年の家 (2014年11月7日 -- 2014年11月9日)

48 招待講演 セミナー "重力的に崩壊する粒子へのビッグバン元素合成からの制限" 新潟大・山形大 素粒子合同合宿 2014、磐梯青年の家 (2014年11月7日 -- 2014年11月9日)

49 招待講演 "宇宙初期のインフレーション理論入門 第1回 我々の住んでいる宇宙" 朝日カルチャーセンター横浜 (2015年1月17日)

50 招待講演 "Reports from the Planck2014 Ferrara and the Paris workshopsReports" KEK workshop B-mode cosmology, KEK, Tsukuba (2015年2月19日)

51 招待講演 "宇宙初期のインフレーション理論入門 第2回 標準ビッグバン宇宙論" 朝

日カルチャーセンター横浜 (2015年2月7日)

52 招待講演 "宇宙初期のインフレーション理論入門 第3回 標準ビッグバン宇宙論の問題点とインフレーション宇宙"朝日カルチャーセンター横浜 (2015年2月21日)

53 招待講演 "宇宙初期のインフレーション理論入門 第4回 インフレーション宇宙の最前線" 朝日カルチャーセンター横浜 (2015年3月7日)

54 招待講演 "将来の宇宙論的 21cm 線観測と CMB 偏光観測による新物理探査" 新物理の実証策を考える会、沖縄科学技術大学院大学 (2015年3月13日)

55 招待講演 IBS Particle Physics Seminar "Coleman-Weinberg Inflation", IBS Daejeon, Korea (2015年3月18日)

他 33件

〔図書〕(計1件)

KEK 物理学シリーズ第3巻 「宇宙物理学」小玉英雄・井岡邦仁・郡和範 共立出版(2014) 291ページ

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕  
ホームページ等 なし

6. 研究組織  
(1)研究代表者

郡 和範 (Kazunori Kohri)  
研究者番号: 50565819

(2)研究分担者  
なし ( )

(3)連携研究者  
なし ( )