

令和元年6月11日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K17646

研究課題名(和文) 宇宙論的観測による宇宙初期の構造形成物理の検証の研究

研究課題名(英文) Revealing structure formation in the early universe through cosmological observations

研究代表者

田代 寛之 (Tashiro, Hiroyuki)

名古屋大学・PhD登龍門推進室(理)・特任講師

研究者番号：40437190

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙論的観測を用いた、宇宙初期の構造形成の理解に向けた研究を行った。特に、新しい宇宙論的観測手法である宇宙論的21cm線観測に注目し、この観測を用いた構造形成史解明のための理論研究を主におこなった。その成果として、将来の21cm線観測が、幅広いスケールに渡って構造形成の種の統計的性質を明らかにすることや、宇宙再電離期という宇宙最初の天体形成と密接な関係がある時期の解明、また重力理論の検証にも応用可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙論的起源を持つ21cm線の観測は新しい宇宙論的観測として大きく注目されている。2020年代にはその最初の本格的観測 Square Kilometer Array (SKA) も国際計画として始まる。本研究では、その21cm線観測の宇宙論への応用の可能性を様々な着眼点より探っている。そのため本研究は、その本格観測へ向けた前駆的研究となっており、新しい宇宙論的観測による宇宙論の展開方向を示すものである。

研究成果の概要(英文)：We investigated the structure formation in the early universe through various cosmological observations. In particular we focused on the feasibility study of future 21 cm observations as a probe of the structure formation history. Our main results are as follows; 21cm observations can reveal the statistical nature of the seeds of the cosmological structure over a wide range of scales, 21cm observations can access the epoch of reionization at which first stars and galaxies are produced, 21cm observations can test the theory of gravity.

研究分野：宇宙論

キーワード：宇宙大規模構造 宇宙構造形成史 宇宙論的磁場

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

我々の宇宙でどのように構造形成が行われて、いま観測されている銀河や銀河団、大規模構造等の姿になっていったのかは、宇宙論が明かすべき大きな問いの一つである。宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) や銀河や銀河団分布の精密観測により、宇宙の構造形成の種となる「原始ゆらぎ」が重力的に成長して、現在の構造の姿になったという大まかな理解は得た。しかし、その原始ゆらぎの詳細な情報や、いつ宇宙で最初の星や銀河ができたのかなど、未だ解き明かされない宇宙論的問題は多くある。

このような中、いま、新しい宇宙の観測として期待されるものが、宇宙初期の中性水素 21cm 線の観測である。これまで、宇宙が誕生して約 38 万年後の姿を伝えてくれる CMB と現在の宇宙の姿を示してくれる銀河、銀河団観測により、構造形成の物理を解き明かす試みが行われてきた。この 21cm 線観測は、その間の時代の構造形成を直接観測できる手法である。

現在、この宇宙論的な起源を持つ 21cm 線観測のために国際協力のもと、超大型の電波干渉計型望遠鏡 Square Kilometer Array (SKA) が建設中であり、2020 年代にはその望遠鏡による本格的観測が予定されている。したがって、宇宙論的起源を持つ 21cm 線観測により、どのような宇宙論的問題を解き明かすことができるのかを予め調べることは、SKA を宇宙論の進展に最大限に活かすためにも重要な課題である。

### 2. 研究の目的

様々な宇宙論的観測を駆使し、構造形成の初期条件やその物理の解明を目的とする。とくに、新たな宇宙観測手段である 21cm 線による新たに切り開かれる観測的宇宙論を念頭に置く。21cm 線観測の特色である広い赤方偏移観測に注目し、これにより明らかにすることができる構造形成の物理の検討を行う。

また、他の宇宙論観測とシナジー効果を狙えるよう、21cm 線に拘ることなく幅広く、構造形成物理を明らかにするための宇宙論的観測の応用を考え、新たな観測手法や観測ターゲットなどを提言したい。

### 3. 研究の方法

宇宙模構造形成由来の宇宙論的 21cm 線のシグナル予測に取り組む。その際の構造進化モデル作りにおいては、解析的な手法によったモデルだけでなく、大規模構造形成シミュレーションも取り入れ、その予言能力を高めていく。さらにそのシグナル観測として SKA を念頭に置き、シグナルの測定の可能性や、それによりどのような宇宙初期の構造形成問題の解明が可能であるかの理論予測を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) 構造形成の種となる原始ゆらぎの統計的性質の解明

原始ゆらぎとは、宇宙の構造の種と言える、宇宙初期に造られた一種の宇宙にある「モノ」の粗密である。このゆらぎが重力的に成長することによって、銀河や銀河団、宇宙大規模構造が形成される。そのため、この原始ゆらぎは宇宙構造形成の初期条件として重要な要素であり、またその生成原因である宇宙初期の物理とも非常に密接な関係がある。現在の CMB 観測や銀河探索により、1Mpc スケール以上のゆらぎについては詳細な理解を得られているが、1Mpc 以下に関してはほぼ未知である。

本研究では、この原始ゆらぎを将来の 21cm 線観測によりこの原始ゆらぎのどのような性質を明らかにできるかを調査した。ここで注目した 21cm 線源がミニハローと呼ばれる太陽質量の  $10^5$  から  $10^8$  程度の宇宙初期に存在する天体である。このミニハローの存在量は 1Mpc 以下のゆらぎに非常に敏感であるが、星を形成するにはその質量が軽すぎる。そのため、この天体に存在する中性水素が発する 21cm 線を観測することが、このミニハローの存在量にアクセスする有効な方法となる。

原始ゆらぎの性質のうち、その振幅のスケール依存性とそのゆらぎの非ガウス性に注目し、将来の観測 SKA での決定精度について精査した。その結果、これらの原始ゆらぎの性質について、既存の制限よりも 10 倍以上の強い制限をあたえる可能性があることを示した。

#### (2) 宇宙再電離期解明に向けての取り組み

宇宙再電離期とは、宇宙誕生後 38 万年の時に陽子と電子が結合し中性化した宇宙が、宇宙初期の天体の影響で再び電離したであろう時期のことを示す。そのため、宇宙最初の星や銀河の誕生と非常に深い関係を持つ時期である。しかしながら、いつその時期が始まったのか、そして、どのような天体によりその再電離が進んだのかは未だ不明である。

再電離を引き起こす天体の候補としては、銀河、活動銀河核が挙げられる。そこで本研究

では、今現在の再電離に関する観測、CMB や高赤方偏移のライマンアルファ線の観測により、どちらの天体が再電離の候補として有力かを調べた。その結果、銀河が大変有力であり、もし活動銀河核が再電離を引き起こすなら、現在の観測で得られている存在量の上限值をとる場合でのみ可能であることを示した。

21cm 線観測はこの再電離期の直接観測の手段として大変有力である。しかしながら、信号は微弱であるため、それ単体では検出が難しいことから、CMB との相互相関をとる手法が有力である。そこで、SKA の試験実験である the Murchison Widefield Array (MWA) のデータを使い、CMB 相互相関のデモンストレーションを行った。残念ながら再電離期からの信号の検出には至らなかったが、世界初の 21cm 線-CMB 相互相関シグナルの制限を得ることができた。また、相互相関の結果は、事前のノイズ予想と一致した。このことは、ノイズの理解をさらに深めることで、SKA においてその信号の検出が十分可能であることを意味している。

### (3) フィラメント構造とミッシングバリオン

近傍宇宙の観測により明らかにされたバリオン量は、CMB 観測の解析結果で予言されているそれに対して、半分以下でしかない(ミッシングバリオン問題)。宇宙大規模構造のシミュレーション結果に基づけば、その大半は、銀河団と銀河団をつなぐフィラメント状の構造に、温度  $10^4$ - $10^7$  K の WHIM (Warm/Hot Intergalactic Medium) となり存在すると予期されている。

本研究では、将来の中性水素 21cm 線観測 SKA がこのようなフィラメント構造を検出し、WHIM の存在を検知可能かを宇宙大規模構造のシミュレーションを用いて調査した。

その結果、WHIM はほぼ電離しており、含まれている中性水素はわずかであるが、SKA は十分にフィラメント構造をトレースできる可能性があり、ミッシングバリオン問題の解決に寄与できる可能性があることを示した。

### (4) 重力理論の検証

一般相対性理論は、数多くの厳しい検証を経て重力理論として広く受け入れられている。しかし、それは太陽系スケール以下での検証がほとんどであり、宇宙論的スケールでの検証はまだ多くはない。そのため、宇宙論的観測を用いた重力理論の検証が必要である。

宇宙の構造形成では、原始ゆらぎといわれるわずかなモノの不均一より重力を介し成長し、現在の銀河や銀河団、大規模構造へとつながっている。そのため、これら構造の統計的性質を調べれば、重力理論の検証へとつながる。将来の 21cm 線観測計画 SKA がこれまでにない銀河探査領域の大きさを誇る。そこで、本研究では、この莫大な探査領域を利用することで、重力理論の特徴がよく現れる銀河の 3 点相関がこれまでにない精度で測れる可能性に注目した。

一般相対性理論も含む大きなクラスの重力理論でのこの 3 点相関の定式化を行ったほか、実際に、SKA 観測でこれらの重力理論がどの程度制限されるのかの予言研究を行い、既存の観測よりも厳しい重力理論の検証が行えることを示した。

## 5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 18 件)

1 Yoshiura, S., Ichiki, K., Pindor, B., Takahashi, K., Tashiro, H., and Trott, C. M., "Study of systematics effects on the cross power spectrum of 21 cm line and cosmic microwave background using Murchison Widefield Array data", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 483, 2697 (2019) DOI: 10.1093/mnras/sty3248, 査読有り。

2 Sekiguchi, T., Takahashi, T., Tashiro, H., and Yokoyama, S., "Probing primordial non-Gaussianity with 21 cm fluctuations from minihalos", *Journal of Cosmology and Astro-Particle Physics*, 2019, 033 (2019) DOI: 10.1088/1475-7516/2019/02/033, 査読有り。

3 Saga, S., Tashiro, H., and Yokoyama, S., "Limits on primordial magnetic fields from direct detection experiments of gravitational wave background", *Physical Review D*, 98, 083518 (2018) DOI: 10.1103/PhysRevD.98.083518, 査読有り。

4 Huang, F. P., Kadota, K., Sekiguchi, T., and Tashiro, H., "Radio telescope search for the resonant conversion of cold dark matter axions from the magnetized astrophysical sources", *Physical Review D*, 97, 123001 (2018) DOI: 10.1103/PhysRevD.97.123001, 査読有り。

5 Hirano, S., Kobayashi, T., Tashiro, H., and Yokoyama, S., "Matter bispectrum beyond Horndeski theories", *Physical Review D*, 97, 103517 (2018) DOI: 10.1103/PhysRevD.97.103517, 査読有り。

6 Sekiguchi, T., Takahashi, T., Tashiro, H., and Yokoyama, S., "21 cm angular power

spectrum from minihalos as a probe of primordial spectral runnings", *Journal of Cosmology and Astro-Particle Physics*, 2018, 053 (2018) DOI: 10.1088/1475-7516/2018/02/053, 査読有り.

7 Saga, S., Tashiro, H., and Yokoyama, S., "Magnetic reheating", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 474, L52 (2018) DOI: 10.1093/mnras/slx195, 査読有り.

8 Minoda, T., Hasegawa, K., Tashiro, H., Ichiki, K., and Sugiyama, N., "Thermal Sunyaev-Zel'dovich effect in the intergalactic medium with primordial magnetic fields", *Physical Review D*, 96, 123525 (2017) DOI: 10.1103/PhysRevD.96.123525, 査読有り.

9 Durrive, J.-B., Tashiro, H., Langer, M., and Sugiyama, N., "Mean energy density of photogenerated magnetic fields throughout the Epoch of Reionization", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 472, 1649 (2017) DOI: 10.1093/mnras/stx2007, 査読有り.

10 Yamauchi, D., Yokoyama, S., and Tashiro, H., "Constraining modified theories of gravity with the galaxy bispectrum", *Physical Review D*, 96, 123516 (2017) DOI: 10.1103/PhysRevD.96.123516, 査読有り.

11 Yoshiura, S., Hasegawa, K., Ichiki, K., Tashiro, H., Shimabukuro, H., and Takahashi, K., "Constraining the contribution of galaxies and active galactic nuclei to cosmic reionization", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 471, 3713 (2017) DOI: 10.1093/mnras/stx1754, 査読有り.

12 Horii, T., Asaba, S., Hasegawa, K., and Tashiro, H., "Can HI 21-cm lines trace the missing baryons in the filamentary structures?", *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 69, 73 (2017) DOI: 10.1093/pasj/psx056, 査読有り.

13 Arai, S., Nitta, D., and Tashiro, H., "Test of the Einstein equivalence principle with spectral distortions in the cosmic microwave background", *Physical Review D*, 94, 124048 (2016) DOI: 10.1103/PhysRevD.94.124048, 査読有り.

14 Liu, G.-C., Ichiki, K., Tashiro, H., and Sugiyama, N., "Reconstruction of CMB temperature anisotropies with primordial CMB induced polarization in galaxy clusters", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 460, L104 (2016) DOI: 10.1093/mnras/slw085, 査読有り.

15 Asaba, S., Ichiki, K., and Tashiro, H., "Effect of supersonic relative motion between baryons and dark matter on collapsed objects", *Physical Review D*, 93, 023518 (2016) DOI: 10.1103/PhysRevD.93.023518, 査読有り.

16 De, S. and Tashiro, H., "Circular polarization of the CMB: A probe of the first stars", *Physical Review D*, 92, 123506 (2015) DOI: 10.1103/PhysRevD.92.123506, 査読有り.

17 Chen, W., Chowdhury, B. D., Ferrer, F., Tashiro, H., and Vachaspati, T., "Intergalactic magnetic field spectra from diffuse gamma-rays", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 450, 3371 (2015) DOI: 10.1093/mnras/stv308, 査読有り.

18 Fujita, T., Namba, R., Tada, Y., Takeda, N., and Tashiro, H., "Consistent generation of magnetic fields in axion inflation models", *Journal of Cosmology and Astro-Particle Physics*, 2015, 054 (2015) DOI: 10.1088/1475-7516/2015/05/054, 査読有り.

〔学会発表〕(計 9 件)

1 Tashiro, H., "Cross-correlation signal between 21-CMB from the EoR", *COSMIC PUZZLES: FROM THE LAST SCATTERING SURFACE TO LARGE SCALE STRUCTURES*, Orsay, France (2018).

2 田代 寛之, 「21cm 線と宇宙論」 第6回観測的宇宙論ワークショップ, 弘前 (2017).

3 田代 寛之, 「宇宙マイクロ波背景放射の黒体放射からのズレによる原始磁場の制限」 日本天文学会 2017 年秋季年会, 札幌 (2017).

4 田代 寛之, 「宇宙マイクロ波背景放射によるアインシュタインの等価原理の検証」  
日本天文学会 2017 年春季年会, 福岡 (2017).

5 Tashiro, H., “Test of the Einstein equivalence principle with CMB spectral distortions”, CosPA 2016, Sydney, Australia (2016).

6 田代 寛之, 「宇宙初期の超新星残骸がつくる宇宙マイクロ波背景放射の円偏光」  
日本天文学会 2016 年春季年会, 東京 (2016).

7 田代 寛之, 「中性水素 21cm 線で探る宇宙再電離史」  
初代星・初代銀河研究会 2015, 仙台 (2015).

8 田代 寛之, 「SKA と宇宙論的磁場研究の展望」  
日本 SKA サイエンス会議「宇宙磁場 2015」, 鹿児島 (2015).

9 Tashiro, H., “ Intergalactic helical magnetic fields and parity odd signatures in the diffuse gamma ray sky ”, Nordita Program "Origin, Evolution, and Signatures of Cosmological Magnetic Fields", Sockholm, Sweden (2015).

## 6 . 研究組織

(1)研究分担者 なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。