

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03616

研究課題名（和文）コスミックバリエーションを越えた精密宇宙論の開拓

研究課題名（英文）Precision cosmology beyond cosmic variance

研究代表者

市来 淨與 (Ichiki, Kiyotomo)

名古屋大学・素粒子宇宙起源研究所・准教授

研究者番号：10534480

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：現代宇宙論においては、宇宙初期に生成された密度揺らぎの統計的な大きさを、宇宙の様々な時代で測定し、宇宙モデルを決定している。近年ではこの測定において検出器のノイズは問題にならなくなり、むしろ観測する宇宙が一つしかないというサンプルバリエーションが検定力の限界を決めている。そこで揺らぎの統計量ではなく、揺らぎの成長を直接追うことで宇宙モデルの決定ができないかを探った。初期揺らぎの分布をガウス分布であると仮定すると成長による揺らぎの増大と初期揺らぎの大きさが分離可能であること、また銀河団で生成される宇宙マイクロ波背景輻射の偏光を各時刻で観測することにより、揺らぎの成長を直接推定できることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙論研究においては、揺らぎの平均や分散といった統計量を観測量として用いて宇宙モデルの決定を行っていますが、これは宇宙が統計的に一様で等方的であるということが暗に仮定されています。これは近代宇宙論では宇宙原理と呼ばれる標準的な仮定ではありますが、本研究は、その仮定を排除して直接的に宇宙の構造の進化を追うにはどうしたらよいか、という課題に取り組んでおり、いくつかの方法を提示したものになっています。

研究成果の概要（英文）：In modern cosmology, the statistical magnitude of the density fluctuations generated in the early universe is measured at different epochs of the universe to determine the cosmological model. In recent years, detector noise has become less of an issue in these measurements, and instead, the sample variance, where there is only one universe to observe, determines the limit of the power of the test. We explored the possibility of choosing the cosmological model by directly following the growth of the fluctuations rather than the statistics of the fluctuations. We found that the growth of the fluctuations can be separated from the size of the initial fluctuations by assuming that the distribution of the initial fluctuations is Gaussian and that the growth of the fluctuations can be estimated directly by observing the polarisation of the cosmic microwave background radiation produced in a galaxy cluster at each time.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：宇宙大規模構造 宇宙マイクロ波背景輻射

1. 研究開始当初の背景

近年の宇宙マイクロ波背景放射(CMB) 温度揺らぎや銀河分布の精密な観測により、宇宙の構成要素や宇宙年齢(宇宙論パラメタ) が 10%弱の精度で決定しつつある[1]。この決定のプロセスでは、宇宙初期に生成されたとされる初期密度揺らぎに起因する CMB 温度揺らぎや銀河分布のパワースペクトル(分散) を測定し、モデルとの比較を行っている。近年の観測技術の目覚ましい発展により、この測定において検出器のノイズは問題にならなくなり、むしろ観測する宇宙が一つしかないという事実からくるサンプルバリエーション(コスミックバリエーション) が検定力の限界を決めている。

例えば、大角度スケールにおける CMB 温度揺らぎの振幅が標準宇宙モデルの予言値より不自然に小さいという問題が知られているが、大角度スケールの揺らぎの分散の推定がコスミックバリエーションで決まっているため、これ以上検定を進めることができない。また、宇宙論モデルの違いは主に初期密度揺らぎの時間発展の違いとなって現れるため、揺らぎの分散の大きさを宇宙の異なる時刻で比較することによって、この時間発展を検証するのがこれまでの標準的な手法である。ここでも、各時刻での分散の推定精度はコスミックバリエーションによってリミットされてしまう、という困難がある。そこで、このコスミックバリエーションの壁を破り、現在の観測的宇宙論を精密さの点で質的に大きく改善することができるか? という問題がここでの「問い」である。

参考文献

- [1] Planck Collaboration, Ade, P. A. R., Aghanim, N., et al. 2016, A&A, 594, A13
- [2] Meyers, J., Meerburg, P. D., van Engelen, A., & Battaglia, N. 2017, arXiv:1710.01708
- [3] G.-C. Liu, K. Ichiki, H. Tashiro and N. Sugiyama, MNRAS Letters 460, issue 1, p.L104-L108, (2016)

2. 研究の目的

このコスミックバリエーションの壁を破りさらに精密な宇宙論を展開するためには、分散などの統計量に頼らずに、宇宙密度揺らぎの時間発展が直接的に追えればよい。このことを難しくしている原因の一つは、天文観測が原則的に光円錐上に限定されるからである。近年 Meyers らは、遠方銀河団で散乱された CMB 光子の偏光には、その銀河団の位置から見た CMB の大角度スケールの揺らぎの情報、すなわち現在の我々にとっての光円錐上から離れた場所の情報が反映されることを用いて、コスミックバリエーションを超えた宇宙の光学的厚みの観測が可能であると主張し注目を浴びている[2]。

本研究計画ではこの考えを発展させ、3次元宇宙初期密度揺らぎを様々な時刻、様々な位置で推定し、その時間発展を可能な限り直接再構築することを研究目的とする。これまで、観測的宇宙論の主要な情報源として統計的なパワースペクトルとその時間発展が用いられてきたが、本研究では統計量を用いないことでコスミックバリエーションを超えた宇宙論を展開する点に特色がある。とくに遠方銀河団で散乱された CMB 光子の偏光を用いた研究については、[2] に先駆けて申請者も考察を進めており、遠方(「過去」)の銀河団の観測を用いることで、「現在」の我々の位置における CMB 温度揺らぎの再構築が可能であることを示すなど、独自で新しい知見を得つつある[3]。最終的には、この再構築した宇宙初期密度揺らぎの時間発展を追うことにより、コスミックバリエーションの壁を超えた新しい精密宇宙論を創成することを目指す。

3. 研究の方法

宇宙の密度揺らぎを3次元的に再構築する方法として、最も直接的だと考えられる方法が、密度揺らぎをトレースしているとされる銀河の分布を遠方まで観測することである。話を単純化するため、位置 x 、時刻 t として $1+1$ 次元の宇宙論的線形摂動理論を考えると観測される密度場 δ は観測点を $(i = 1, 2, \dots, N)$ の N 点として、 $\delta(x_i, t_i) = \sum D(t_i) \delta_0(k_j) e^{ik_j x_i}$ で与えられる。ここで、 $D(t_i)$ は宇宙論モデルによって与えられる時間進化を与えるグロースファクターで、 $\delta_0(k_j)$ はコスミックバリエーションの原因となるランダムな初期密度揺らぎのフーリエモードである。直接推定したいものは、 $D(t_i) (i = 1, 2, \dots, N)$ と $\delta_0(k_j) (j = 1, 2, \dots, N)$ の $2N$ 個の量であり、観測量は $\delta(x_i, t_i) (i = 1, 2, \dots, N)$ の N 個であるので、モデルが必要となる。この困難は、天文学の観測が光円錐上に限定されるためである。この逆問題を解くための方法はいくつかあるが、まず試す

べき方法として、 $D(t_i) = t^n$ というべき型の時間発展を仮定して推定量をNから1へ減らすことが考えられる。多くの宇宙論モデルで密度揺らぎの時間発展はべき型則に従うことが知られているので、これは妥当なモデル化と考えられる。次に $\delta_0(k_j)$ の推定については理論的な支持がある(1) 正規性を事前分布とする推定、(2) 非正規性を最小にする推定、および(3) 密度揺らぎの空間変化に対するスパース性を課した推定を行ってみる。

また、別の方法としてCMB光子の散乱を用いる方法が考えられる。CMB光子の一部は銀河団中の電子によって再度散乱されるが、その際にその銀河団の光円錐上にある初期密度揺らぎの四重極成分を拾って偏光することが知られている。従って、多くの銀河団からの偏光されたCMB光子や、遠方21cm線円偏光を観測することで、我々の光円錐上とは別の場所での3次元密度揺らぎの再構築が行えるはずである。再構築を行って求めた大スケールでの密度揺らぎと、実際に直接観測される揺らぎを比較することにより、宇宙論モデルがどれくらい精度よく決めることができるかを調べる。

4. 研究成果

(1) ダークマターN体シミュレーションデータを元に、初期3次元密度揺らぎの再構築を行う研究では、ガウシアンプロセスが上手く行かなかった結果を受けてから様々な他の手法を試すことになったが、D'Agostino's K-squared testという非ガウス性の検定を上手く用いることにより、初期3次元密度揺らぎを再構築することが可能であることを見出した。具体的には、密度揺らぎができるだけガウス分布に従うように、重力による成長を引き戻すことによって初期の3次元密度揺らぎを再構築するという方法である。結果の例を図1に示す。

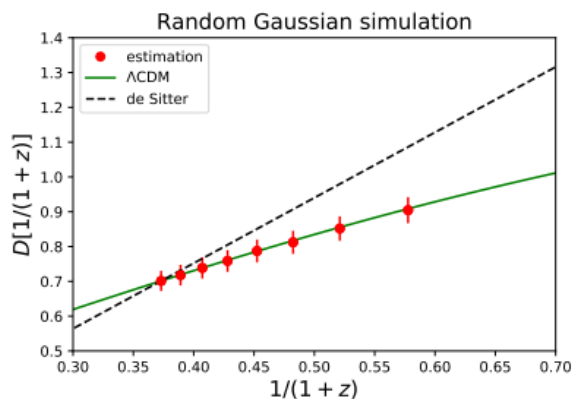


図1:初期密度揺らぎがガウス分布であったと仮定することにより、赤方偏移の関数として推定したグロースファクター、仮定した宇宙モデル(緑色の実線)を正しく推定できていることを示す。点線は宇宙項なしのモデル。

(2) 初期3次元密度揺らぎの再構築の方法として、遠方銀河団を通過してくるCMB光子の偏光の情報を用いる研究を遂行した。揺らぎの推定を行うために、ランダムに初期揺らぎを生成し、その揺らぎから期待される銀河団でのストークスパラメータを予言し、さらにそのストークスパラメータから逆問題として揺らぎを推定する、というアルゴリズムを実装した数値計算コードを開発した。

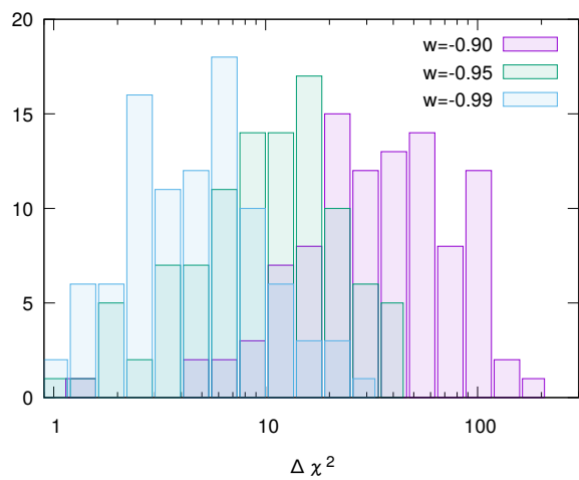


図2:100回のモンテカルロシミュレーションにより、 χ^2 の値がどの程度期待できるかを示した分布。大きな値ほど統計的に区別できることを表す。銀河団の偏光を用いて初期揺らぎを直接再構築し、その時間変化の部分だけから宇宙暗黒エネルギーの状態方程式(圧力とエネルギー密度の比)をどれくらいの精度で制限できる可能性があるか調べた。 $w=-1$ が現代の標準モデルに対応し、その値が少しずれていた時($w=-0.99, 0.95, 0.90$)に、どの程度区別できるかを表している。

次に、開発した計算コードを実行することにより、暗黒エネルギーの状態方程式パラメータが将来の銀河団CMB偏光を測ることでどれくらいの精度で求めることができるかどうかについて調べた。その結果、研究目的にある通り揺らぎの分散の推定ではなく、揺らぎの時間進化を直接測ることができることから、これまでのCMB観測から得られている暗黒エネルギーに関する制限を大幅に改善できることが明らかになった(図2参照)。一方、先行研究にあった揺らぎの分散を推定する従来の方法についても再検証を行ったところ、先行研究におけるコスミックバリエーションの取扱い方に誤りを見つけ、従来の方法では制限が全くつかなくなることも明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ichiki, Kiyotomo ; Sumiya, Kento ; Liu, Guo-Chin	4. 巻 105
2. 論文標題 Measuring the cosmological density field twice: A novel test of dark energy using the CMB quadrupole	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 d.063507
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.063507	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Villanueva-Domingo, Pablo; Ichiki, Kiyotomo	4. 巻 -
2. 論文標題 21 cm forest constraints on primordial black holes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab119	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Matsuo, Taro; Greene, Thomas P.; Qezlou, Mahdi; Bird, Simeon; Ichiki, Kiyotomo; Fujii, Yuka; Yamamuro, Tomoyasu	4. 巻 163
2. 論文標題 Densified Pupil Spectrograph as High-precision Radial Velocimetry: From Direct Measurement of the Universe's Expansion History to Characterization of Nearby Habitable Planet Candidates	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 id.63, 27 pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/ac397b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Minoda Teppei, Ichiki Kiyotomo, Tashiro Hiroyuki	4. 巻 2021
2. 論文標題 Small-scale CMB anisotropies induced by the primordial magnetic fields	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 093 ~ 093
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2021/03/093	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Cooray Suchetha, Takeuchi Tsutomu T, Akahori Takuya, Miyashita Yoshimitsu, Ideguchi Shinsuke, Takahashi Keitaro, Ichiki Kiyotomo	4. 巻 500
2. 論文標題 An iterative reconstruction algorithm for Faraday tomography	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 5129 ~ 5141
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa3580	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shimabukuro Hayato, Ichiki Kiyotomo, Kadota Kenji	4. 巻 102
2. 論文標題 21cm forest probes on axion dark matter in postinflationary Peccei-Quinn symmetry breaking scenarios	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 id. 023522
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.023522	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shimabukuro Hayato, Ichiki Kiyotomo, Kadota Kenji	4. 巻 101
2. 論文標題 Constraining the nature of ultra light dark matter particles with the 21cm forest	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 id. 043516
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.043516	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kadota Kenji, Ooba Junpei, Tashiro Hiroyuki, Ichiki Kiyotomo, Liu Guo-Chin	4. 巻 100
2. 論文標題 Cross-correlation between 21-cm radiation and CMB B modes from the cosmic birefringence in the presence of a light scalar field	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 id. 063506
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.063506	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Minami Yuto, Ochi Hiroki, Ichiki Kiyotomo, Katayama Nobuhiko, Komatsu Eiichiro, Matsumura Tomotake	4. 巻 8
2. 論文標題 Simultaneous determination of the cosmic birefringence and miscalibrated polarization angles from CMB experiments	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 id.083E02
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz079	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ichiki Kiyotomo, Kanai Hiroaki, Katayama Nobuhiko, Komatsu Eiichiro	4. 巻 2019
2. 論文標題 Delta-map method of removing CMB foregrounds with spatially varying spectra	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 id.033E01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshiura S, Ichiki K, Pindor B, Takahashi K, Tashiro H, Trott C M	4. 巻 483
2. 論文標題 Study of systematics effects on the cross power spectrum of 21cm line and cosmic microwave background using Murchison Widefield Array data	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2697 ~ 2711
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty3248	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Gangopadhyay Mayukh R., Mathews Grant J., Ichiki Kiyotomo, Kajino Toshitaka	4. 巻 78
2. 論文標題 Explaining low ℓ anomalies in the CMB power spectrum with resonant superstring excitations during inflation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 article id. 733
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-018-6218-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Endo Takao, Nishizawa Atsushi J, Ichiki Kiyotomo	4. 巻 478
2. 論文標題 Effect of dark energy perturbation on cosmic voids formation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 5230 ~ 5239
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty1292	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計11件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 市来浄與
2. 発表標題 Measuring the cosmological density field twice: A novel test of dark energy using CMB the quadrupole
3. 学会等名 基研研究会「次世代CMB観測と宇宙論」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 市来浄與
2. 発表標題 銀河団偏光と宇宙マイクロ波背景輻射四重極揺らぎを用いた暗黒エネルギーの新しい検証法
3. 学会等名 立教大学コロキウム(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 市来浄與
2. 発表標題 宇宙マイクロ波背景輻射観測
3. 学会等名 天文観測におけるビッグデータ解析と宇宙論パラメータの推定(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 市來淨與
2. 発表標題 21cm forest constraints on primordial black holes
3. 学会等名 Brain-storming workshop on Primordial Black Holes and Gravitational Waves (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 市來淨與
2. 発表標題 The Epoch of Reionization and the Square Kilometre Array
3. 学会等名 第4回 CMB JSPS研究拠点形成事業・国内交流若手セミナー (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 市來淨與
2. 発表標題 偏光スニヤエフゼルドビッチ効果を用いた宇宙論
3. 学会等名 国立天文台研究集会「(サブ)ミリ波単一鏡の革新で挑む, 天文学の未解決問題」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kiyotomo Ichiki
2. 発表標題 Cosmology with CMB Quadrupoles
3. 学会等名 7th Korea-Japan Workshop on Dark Energy: Maeda's Universe (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 市來淨與
2. 発表標題 SKA宇宙論
3. 学会等名 Testing Gravity THxOBS Japan kickoff meeting (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 市來淨與
2. 発表標題 Cosmology with CMB polarization: current status and future prospects
3. 学会等名 初代星・初代銀河研究会 2 0 1 9 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kiyotomo Ichiki
2. 発表標題 LiteBIRD mission and Japanese activities related to the CMB foregrounds
3. 学会等名 the Rencontres du Vietnam (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kiyotomo Ichiki
2. 発表標題 Current status and future prospects of CMB and 21cm cosmology
3. 学会等名 Second international workshop "Particles, Gravitation and the Universe" (PGU 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------