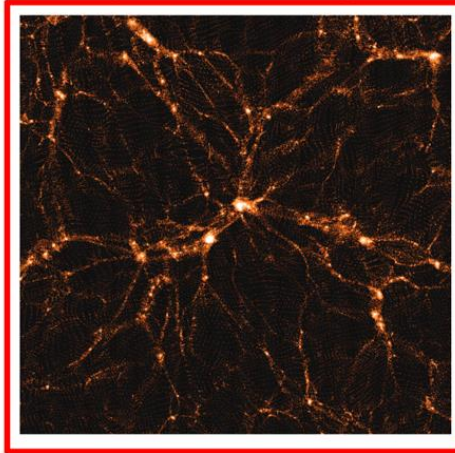
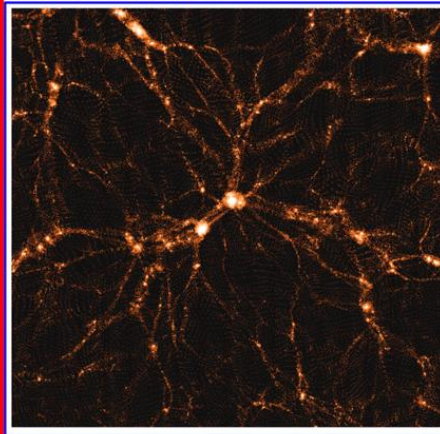


HSCデータが支持する宇宙
(シミュレーション)



プランク衛星が支持する宇宙



すばる望遠鏡発の精密宇宙論の幕開け！ ～ダークマター、ダークエネルギーの解明を目指して～

名古屋大学大学院理学研究科／素粒子宇宙起源研究機構の 杉山 直 教授、高等研究院／大学院理学研究科の 西澤 淳 特任講師 及び 宮武 広直 特任助教は、東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU) の 日影 千秋 特任助教を中心とし、東京大学、国立天文台、名古屋大学、米国プリンストン大学、米国カーネギーメロン大学、台湾中央研究院天文及天文物理研究所 (ASIAA) の研究者らからなる国際研究チームとともに、すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam (ハイパーシュプリムカム：HSC)^{※1)} による宇宙観測を行い、宇宙の 3 次元ダークマター^{※2)} の空間分布について最も深く (過去の宇宙) かつ広い天域の地図を作成し、解析しました。約 1000 万個の銀河の形状における重力レンズ歪み効果^{※3)} を観測することに成功し、宇宙の構造^{※4)} の形成の度合いを表す物理量を精密に測定しました。今回の HSC の結果と欧州宇宙機関 (ESA) の宇宙背景放射観測衛星 Planck^{※5)} 及び他の観測装置による宇宙観測の結果と組み合わせることで、研究チームは宇宙最大の謎であるダークエネルギー^{※6)} の性質についても知見を得ることに成功しました。今回の HSC の結果は、全計画のたった約 10% のデータを用いたものであり、今後の HSC データによりダークマター・ダークエネルギーが宇宙の構造形成を支配する標準的な宇宙模型への理解をさらに深め、ダークエネルギーの正体を解明できることが期待されます。

本研究成果は 9 月 26 日に米国のプレプリントサーバー (<https://arxiv.org>) で公開されました。既に日本天文学会欧文研究報告 (Publication of Astronomical Society of Japan; PASJ) に投稿され、専門家による厳正な査読が行われています。

【ポイント】

- すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam(HSC)で観測した銀河の形状における重力レンズ効果を測定することによって、宇宙の3次元ダークマター空間分布を測定した。
- 宇宙の3次元ダークマター空間分布から銀河などの宇宙の構造の形成の度合いを表す物理量を精密に測定した。また、宇宙最大の謎であるダークエネルギーの性質についても知見を得ることに成功した。
- 銀河の画像をシミュレーションするなど個々の銀河の形状を極めて正確に測定し、さらに「確証バイアス」を避けるためにブラインド解析^{*7)}と呼ばれる手法を用いた。
- 今回のHSCの結果は、全計画のたった約10%のデータを用いたものであり、今後のHSCデータにより標準的な宇宙模型への理解をさらに深め、ダークエネルギーの正体を解明できる可能性がある。

【研究内容】

HSC データに基づく本研究の遠方銀河を用いた宇宙の構造形成の度合いの測定結果は、より近傍の宇宙にある銀河を用いた米国中心の Dark Energy Survey (DES) と欧州中心の the Kilo-Degree Survey (KiDS) の重力レンズによる測定結果とも良く一致しています。しかしながら、これらの重力レンズの測定結果は、Planck 衛星の観測によって得られた宇宙模型と比較して、宇宙の構造の形成の度合いはそれほど大きくないことを示唆しています。この不一致は測定の統計的誤差による見かけ上のことなのでしょうか、あるいは現在の標準的宇宙模型に何か綻びがあるのでしょうか？今後のHSCの観測データを用いることにより、この疑問を解決することができます。今回の成果は、ダークマター、ダークエネルギーの解明に向けたHSCによる精密宇宙論の最初の第一歩です。

ダークマターは光では直接見えませんが、アインシュタインの相対性理論が预言するように、宇宙の重力は遠方銀河から発せられた光の経路を曲げる重力レンズと呼ばれる現象を引き起こします。遠方銀河からの光は、約90億年もの気の遠くなるような年月をかけて宇宙空間を旅し、すばる望遠鏡に到達します。つまり、銀河からの光は宇宙の構造がどのように形成されてきたかの目撃者であり、またその重力レンズ効果を観測することで、加速膨張を引き起こすダークエネルギーの謎にも迫ることができます。ダークエネルギーの最も単純なモデルは宇宙定数ですが、これに基づく宇宙模型はHSCの結果を含む全ての宇宙観測を矛盾なく説明できます。アインシュタインは、かつて宇宙定数を「人生最大の過ち」と嘆きましたが、宇宙の標準模型で復活したのです。

研究チームが着目する重力レンズ効果は非常に小さいですが、銀河の形状から測定可能な現象です。何百万もの銀河の形状を測定することにより、宇宙の物質（主にダークマター）の3次元分布を復元することができます（図1及びムービー参照）。研究チームは詳細にダークマターの分布を解析し、その分布が数十億年の歳月をかけて、どのように形成してきたかを調べました。

ハワイ島の標高約4200m マウナケア山頂は世界最高の天文観測サイトの一つですが、

研究チームは、国立天文台のすばる望遠鏡に搭載された HSC を用い、2014 年春から大規模な宇宙イメージング（撮像）観測を行っています。直径 8.2m 主鏡（望遠鏡に入ってきた光を最初に反射する鏡）の大集光力、一度に約満月 9 個分の視野を観測できる広視野、遠方銀河のシャープな画像を撮ることを可能にする解像度の良さにより、すばる HSC は広い天域にわたり遠くて暗い宇宙の銀河をイメージング観測するには他の追随を許さない世界最高の観測装置です。今回の研究成果は、すばる望遠鏡の約 90 晩（1 晩=約 9 時間）、また約 140 平方度（単位球面上の面積の単位、球面全体は約 41000 平方度）の天域（約満月 3000 個分の視野の広さ）にわたる観測データに基づいています。

今回の研究を行うには、個々の銀河の形状を極めて正確に測定する必要があります。着目する重力レンズ効果は非常に小さいので、まず、研究チームは銀河の形状の測定に影響を与え得る様々な効果（大気のゆらぎ、観測装置の影響など）を注意深く調べる必要がありました。大気のゆらぎの影響を受けないハッブル宇宙望遠鏡の銀河画像のデータから HSC の銀河の画像をシミュレーションするなど、非常に忍耐強く注意深い解析を重ね、研究チームはそれらの測定誤差が今回の研究結果に影響を与えないことを確かめました。

微小な重力レンズ効果を正確に測定できたとしても、その検出には注意深い解析が必要とするため、観測結果が先行研究の結果と一致した途端にその解析をやめてしまうといったような、心理的影響による恣意的な操作が起きてしまうかもしれません。このような人為的な操作は「確証バイアス」と呼ばれ、客観的、信頼に足る結果を導出するために、できるだけ避けなければなりません。この理由で、研究チームはブラインド解析と呼ばれる手法を用いました。研究チームは、物理解析から得られたパラメータの実測値、あるいは他の観測結果と比較することなしに、一年以上にかけて様々なテストを行いました。

今回の HSC の重力レンズの観測結果から、宇宙の構造形成の進行度合いを表す物理量（以後 S8）を測定することができます。例えば、S8 が大きい宇宙では、宇宙の構造がより進化し、例えば、より多くの銀河が存在することを意味します。研究チームは、今回の高精度の HSC データの観測結果により、S8 を 3.6% の精度で測定することができました。これは米国の DES の重力レンズ効果の観測から得られた S8 の測定結果と同等の精度です（図 2）。DES は HSC より 14 倍広い領域を観測していますが、近傍の宇宙だけを観測しています。すばる HSC により、より遠くの暗い銀河まで観測すること、また過去に例がないほど解像度の高いダークマター地図を作成することで、研究チームは観測領域が小さいにも関わらず、DES と同等の測定精度を達成できたのです。このことは、世界で進行している重力レンズ観測の計画の中で、HSC の強み、他の観測結果に対する相補性を如実に表しています。

Planck 衛星によって観測された幼少期（誕生後約 40 万年）の宇宙と比較したところ、HSC の測定結果は、Planck が支持する宇宙模型と矛盾がありませんでした（図 3）。その模型とは、ダークマターとダークエネルギーが宇宙の全エネルギーのほとんどを占め、ダークエネルギーはアインシュタインが導入した「宇宙定数」のように振る舞う、いわゆる最も単純な宇宙模型です（図 4）。しかし、これまで重力レンズの観測によっ

て測定された宇宙の構造の成長度合い S_8 は、Planck 衛星の予想よりわずかに小さい値を示しています（図 5）。これは、ただ単にデータ量が限られていることによる統計的な不定性によるもの、あるいは一般相対性理論と宇宙定数に基づく宇宙の標準模型の綻びを示唆しているかもしれません。今回の HSC の結果は、全計画のたった約 10% のデータを用いたものであり、今後の HSC データにより標準的な宇宙模型への理解をさらに深め、ダークエネルギーの正体を解明できる可能性が十分にあります。

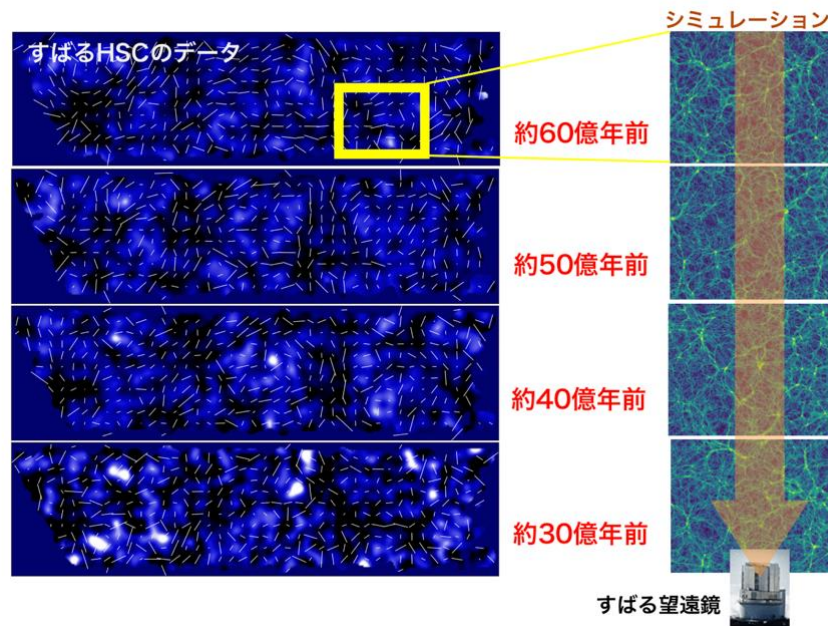


図 1: (左図) 背後にある青色のカラー地図は、HSC データから測定した宇宙の 3 次元ダークマター地図（明るい場所はダークマターがより沢山ある領域を示す）であり、HSC データの銀河の形のゆがみ（図の白線）から推定したものである。白色の棒は、各ピクセルに含まれる銀河の平均的なゆがみの方向を表し、重力レンズ効果を示す。(右図) 我々から異なる距離にある銀河を測定することで、それらの光は宇宙空間を旅行し、過去の異なる時代の宇宙における物質（主にダークマター）により重力レンズを受け、それをすばるデータから測定することで、ダークマターの 3 次元地図を復元することができる。

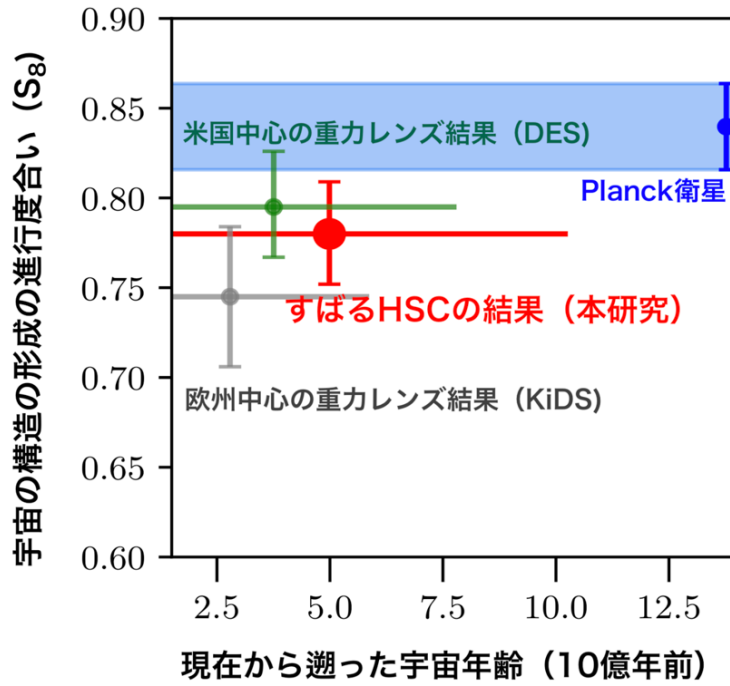


図 2: 宇宙のさまざまな時期の観測によって得られた現在の宇宙の構造の進行の度合いの測定結果。赤い円が HSC の測定結果を示しており、弱い重力レンズ測定の中では、最も遠い(過去の)宇宙の構造を観測できたことを示している。Planck 衛星の宇宙背景放射による宇宙初期の観測結果や、他の重力レンズ観測である Dark Energy Survey (DES) や Kilo Degree Survey (KiDS) の結果との比較も示している。

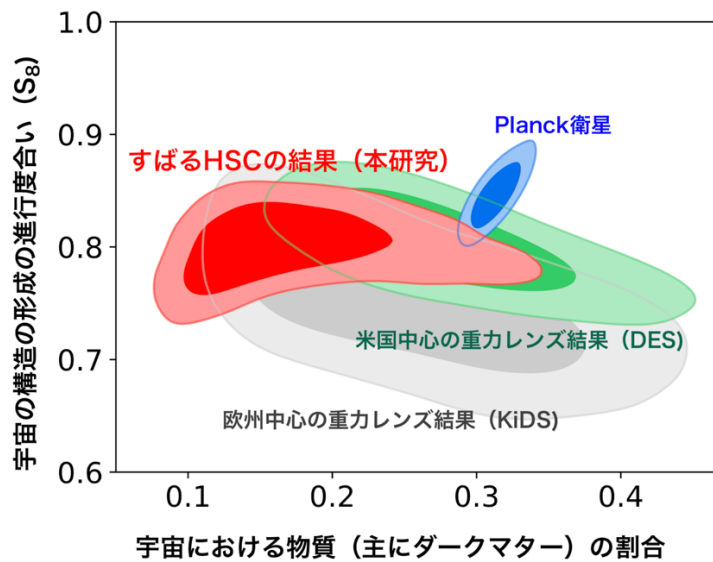


図 3: 3次元のダークマター地図の解析から推定された、宇宙の全エネルギーに占める物質の割合（それ以外はダークエネルギー）と現宇宙の構造形成の進行の度合いを表す物理量 S_8 の測定結果。HSC の重力レンズ観測によって得られた S_8 の値は、Dark Energy Survey (DES) や Kilo Degree Survey (KiDS) の重力レンズ測定による、より近傍の宇宙の結果と一致している。また図中の青部分は、プランク衛星の宇宙背景放射観測による初期の宇宙の結果を示している。

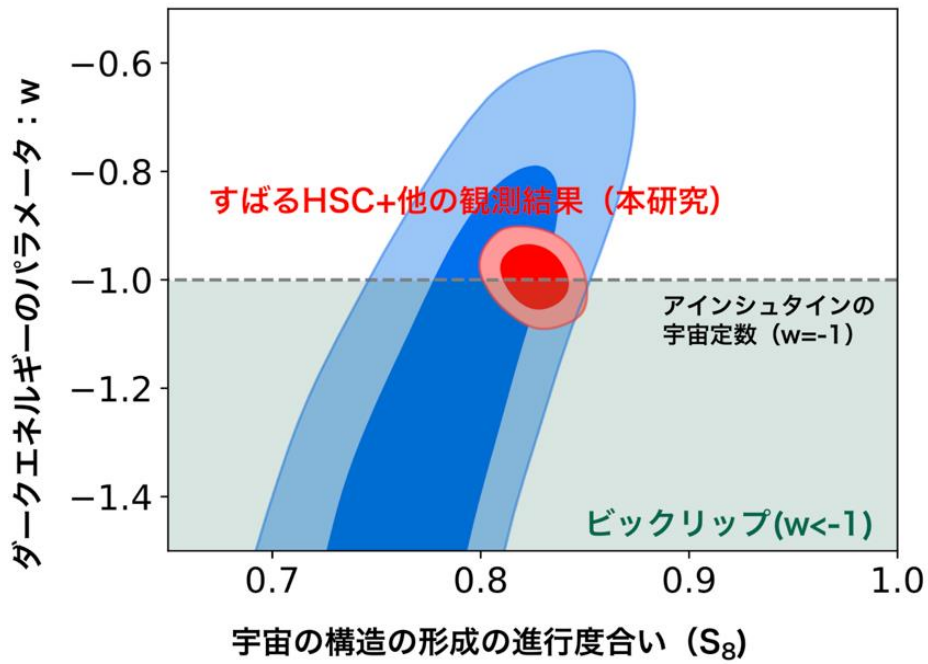


図 4: ダークエネルギーの時間進化を示すパラメータ w の測定結果。図中の青い等高線は HSC 観測のみの測定結果、赤い等高線は、HSC 観測に加えて、Planck 衛星、超新星やバリオン音響振動の観測を組み合わせた測定結果。

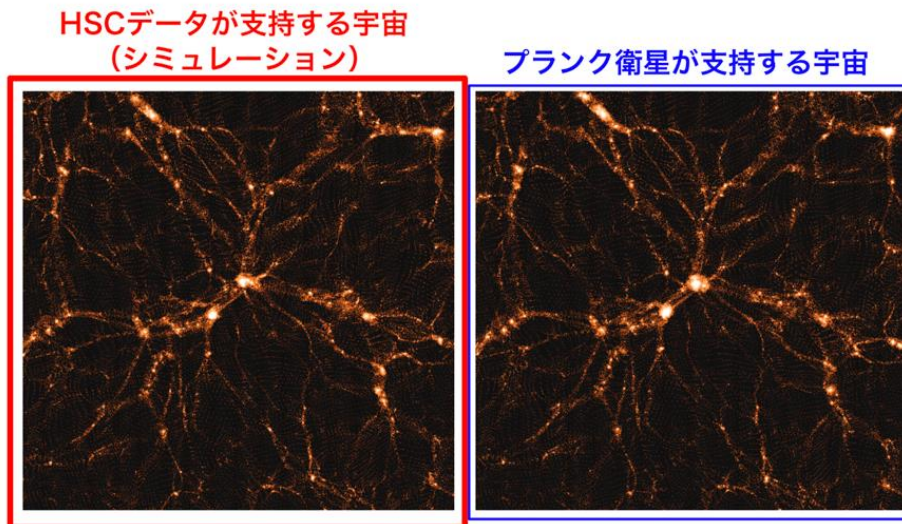


図 5: 左図は HSC などの重力レンズ観測が支持する宇宙モデルの構造のシミュレーションの結果。右図はプランク衛星の観測が支持する宇宙モデルの構造のシミュレーションの結果を示す。2 つの図の違いはわずかではあるが、Planck の支持する宇宙では HSC の宇宙に比べより構造が進化していることがわかる。果たして、この違いが単なる統計的な誤差によるものなのか？世界中の天文学者は、この疑問に答えるため、さらに多くの観測データを集めている。

【用語説明】

注 1) すばる／Hyper Suprime-Cam

すばる望遠鏡はハワイのマウナケア山頂に設置された口径 8.2 m の国立天文台の主力光学望遠鏡である。Hyper Suprime-Cam (HSC) はすばる望遠鏡の主焦点に据えられた大型広視野デジタルカメラ。国立天文台、Kavli IPMU が中心となり国際的な研究協力によって作製された。

注 2) ダークマター

宇宙にある物質の 80% 以上は、原子などではない未知の物質であると考えられている。ダークマターは、私たちの母、すなわち星や銀河、銀河団などの宇宙の構造を形成する役割を果たしていると考えられています。本研究で紹介した弱い重力レンズ効果を測定することで、宇宙のダークマターの地図を作り、また宇宙の構造がどのように形成されたかを明らかにすることができる。

注 3) 重力レンズ歪み効果

ダークマターの重力によって光の軌道が曲げられる現象のこと。その結果、銀河や銀河団など重力の強い領域は拡大レンズのような役割を果たし、その背後にある銀河の形を引き伸ばしたり曲げたりなど、銀河の形をゆがめる。弱い重力レンズ効果は、このゆがみの大きさが非常に弱く、1% にすら満たない場合がある。

注 4) 宇宙の構造

COBE、WMAP 及び Planck 衛星は、宇宙が約 38 万歳、その温度が 3000 度の超高温だった頃のビッグバン直後の宇宙の姿を観測している。当時の宇宙は目立った構造もなく、退屈なものだったが、10 万分の 1 ほどのわずかなダークマターの密度ゆらぎがある。ダークマターの重力によって、ダークマターがわずかに多いところに物が集まり、それによって重力が増えてさらに物が集まることを繰り返した結果、星や銀河、銀河団など宇宙の構造が形成されてきたと考えられている。一方で、ダークエネルギーは宇宙の膨張を加速し、ダークマターが作った構造を逆に引きはがそうとする。ゆえに、宇宙の構造はダークマターとダークエネルギーの競争の結果として形成されていく。宇宙の構造を精密に測定することで、このせめぎ合い、つまり、どのようにしてダークマターが構造を形成し、ダークエネルギーが引き剥がしていつているのかを正確に調べることができる。

注 5) Planck 衛星

欧州宇宙機関(ESA)が 2009 年に打ち上げた高感度・高分解能マイクロ波望遠鏡。宇宙が生まれて 38 万年後に初めて自由になった光(宇宙マイクロ波背景放射)を観測し、標準宇宙モデルにおける宇宙論パラメータを精密に測定した。

注 6) ダークエネルギー

重力は引き合うが、決して押し返すことはない。ビッグバンによって、あらゆるものが飛散した後、重力による引力作用でブレーキがかかり、宇宙の膨張速度は遅くなると思われていた。しかし、1998 年に宇宙の膨張が加速していることが発見された。この宇宙の膨張を後押しする何かを「ダークエネルギー」と呼んでいる。もしダークエネルギーが運動量を拾い上げ、宇宙の膨張の速度が無限になると、ビッグリップによって宇宙は終わりを迎える。つまり、ダークエネルギーは宇宙の運命の鍵を握っていると言え

る。

注7) ブラインド解析

解析者による心理的な影響（確証バイアス）を排除するため、目標とする物理量や被験者の情報等を隠した状態で解析作業を行う手法。素粒子物理学や医学の分野で用いられてきた。

【論文情報】

雑誌名：プレプリントサーバー arXiv (<https://arxiv.org/abs/1809.09148>)、

日本天文学会欧文研究報告(Publication of Astronomical Society of Japan; PASJ)

論文タイトル：Cosmology from cosmic shear power spectra with Subaru Hyper Suprime-Cam first-year data

著者：ChiakiHikage(1),MasamuneOguri(2,3,1),TakashiHamana(4),SurhudMore(5,1), Rachel Mandelbaum(6), Masahiro Takada(1), Fabian Kohlinger(1), Hironao Miyatake (7,8,9,1), Atsushi J. Nishizawa(7), Naoshi Sugiyama(8,10,1) et al.

著者所属:

1 Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (Kavli IPMU WPI), UT Institutes for Advanced Study, University of Tokyo, Kashiwa 277-8583, Japan

2 Research Center for the Early Universe, University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan

3 Department of Physics, University of Tokyo 1130-0033, Japan

4 National Astronomical Observatory of Japan, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

5 The Inter-University Center for Astronomy and Astrophysics, Post Bag 4, Ganeshkhind, Pune 411007, India

6 McWilliams Center for Cosmology, Department of Physics, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA 15213, USA

7 Institute for Advanced Research, Nagoya University, Nagoya 464-8602, Aichi, Japan

8 Division of Particle and Astrophysical Science, Graduate School of Science, Nagoya University, Nagoya 464-8602, Aichi, Japan

9 Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA 91109, USA

10 Kobayashi-Maskawa Institute for the Origin of Particles and the Universe, Nagoya University, Nagoya, 464-8602, Aichi, Japan