

すばる HSC Y3 データの 弱重力レンズ宇宙論解析



杉山



高田



宮武

杉山 素直¹・高田 昌広²・宮武 広直³

〈¹ Department of Physics and Astronomy, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA 19104, USA〉

〈^{1,2,3} 東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構〒277-8583 千葉県柏市柏の葉 5-1-5〉

〈³ 名古屋大学素粒子宇宙起源研究所〒464-8602 愛知県名古屋市千種区不老町〉

e-mail: ¹ sunaosugiyama@gmail.com, ² masahiro.takada@ipmu.jp, ³ miyatake@kmi.nagoya-u.ac.jp

宇宙の標準模型 Λ CDM は様々な観測データを驚くほどよく再現するが、近年、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) と銀河サーベイのデータから測定された S_8 (Λ CDM のパラメータの一つ) のあいだに不一致が見つかり、「 S_8 不一致問題」として注目されている。我々は、 S_8 不一致問題を精密かつロバストに検証することを目的として、すばる HSC による広天域撮像銀河サーベイの3年度データ (HSC Y3) から宇宙の大規模構造の弱重力レンズ効果を精密に測定し、 Λ CDM 模型の宇宙論パラメータを測定した。従来の研究と比較して測光的赤方偏移の不定性の影響を受けにくい解析手法を新たに導入し、 S_8 を約5%の精度で測定した。HSC Y3の結果は、CMBの結果と約 2.5σ の統計的有意性で違いがあり、依然として S_8 不一致問題が存在することを確認した。本稿では HSC Y3の宇宙論解析とともに、 S_8 不一致問題が示唆する宇宙論的解釈を解説する。

1. はじめに：宇宙の標準模型

宇宙の標準模型である Λ CDM 模型に「危機」が迫っていることをご存知だろうか？ Λ CDM 模型とは、インフレーションが予言する初期条件を仮定し、現在の宇宙におけるエネルギーの大部分を宇宙定数 Λ と冷たい暗黒物質 (cold dark matter; CDM) が占めていることを仮定した、宇宙の進化を記述する模型である。アインシュタインによって導入された宇宙定数 Λ は Ia 型超新星の観測により発見された宇宙の加速膨張を説明し、また冷たい暗黒物質は重力だけで相互作用する正体不明の物質であり、物質を空間的に集積させ、構造

形成を駆動する役割を担う。 Λ CDM 模型は、宇宙マイクロ波背景放射 (cosmic microwave background; CMB) の角度異方性や後期宇宙の大規模構造の観測事実をよく説明できる。近年の CMB や銀河サーベイの観測は高精度かつ大規模化しており、宇宙定数の大きさや暗黒物質の量、宇宙構造の進行度合いを特徴づけるパラメータ (以後 S_8 と呼ぶ) などを数パーセントの精度で測定しており、精密宇宙論の時代が到来していると言える。

この精密宇宙論で最近話題になっているのが、CMB 観測と銀河サーベイのそれぞれで推定した S_8 の値が一致しないという問題 (S_8 不一致問題—英語では S_8 tension) である。Planck 衛星などによっ

て得られたCMBデータが示唆する Λ CDM模型の S_8 の値と、銀河サーベイが測定した S_8 の値のあいだに統計精度で 2σ 程度の不一致があるという結果が、多くの独立な研究グループにより報告されている。この不一致が真であれば、標準模型を超える新しい物理を示唆している可能性がある。つまり、 Λ CDM模型はもはや標準模型としての立場を危ぶまれ、新しい宇宙像への拡張が迫られている可能性がある。本稿では、 S_8 不一致問題を検証することを目的とし、すばるハイパーシュプリームカム (Hyper Suprime-Cam; HSC) データから弱い重力レンズ効果を測定し、宇宙論解析を行った最新の研究結果を解説する。本稿で解説する内容はすでに投稿された、あるいは既に受理された論文に基づいており、国立天文台の特集ページでも紹介されているので、そちらも参照されたい*1。

2. HSC-SSPサーベイ

宇宙の大規模構造の弱い重力レンズとは、遠方銀河から発せられた光の経路が手前の物質分布 (主に暗黒物質の分布) によって曲げられる効果である。結果として、実際の3次元空間では離れていて、物理的には因果関係がないが、天球上では近い銀河の像のあいだに「系統的」な歪み効果が観測される。逆に、観測される銀河形状から弱い重力レンズ歪み効果を測定することで、宇宙の物質分布を調べることができ、その距離スケール依存性や赤方偏移依存性から宇宙論パラメータを測定できる。しかし、弱い重力レンズは文字通り「弱い」効果であり、銀河像に大きさが数%の楕円率しか引き起こさない。これは、銀河が固有に持つ楕円率の典型的な大きさよりも20倍ほど小さい。このため、弱い重力レンズ効果の測定を行うには、個々の銀河の形状を精密に測定することに加え、可能な限り多数の銀河を統計解析に用い

ることで、ランダムな銀河固有の形状の寄与を抑え、系統的な重力レンズ歪み効果の信号を抽出することが必要不可欠になる。

HSCはすばる望遠鏡の主焦点に搭載された、広視野、高結像性能を持つカメラであり、弱い重力レンズ効果を用いた宇宙論を主要な科学目標として日本、台湾、プリンストン大学で共同開発された [1, 2]。iバンドの典型的なシーイングサイズは0.6秒角であり、高精度な銀河の形状測定を可能にする。競合する弱重力レンズサーベイである米国のDark Energy Survey (DES) や欧州のKilo-Degree Survey (KiDS) と比較して、すばる望遠鏡の集光力により、高赤方偏移 (平均赤方偏移 $\langle z \rangle \sim 1$) にある暗い銀河を重力レンズ解析に用いることができる。広い赤方偏移範囲をカバーすることで、宇宙の構造形成の進化をより広範囲にわたり調べることができる。特に、宇宙膨張が減速から加速に変遷する $z \sim 1$ の時期の宇宙構造の進化を調べることができることは、HSCデータを用いた重力レンズ宇宙論研究のユニークな点である。HSC戦略枠サーベイ (HSC Subaru Strategic Program; HSC-SSP*2) [3, 4] では、弱い重力レンズ宇宙論を主目的として、約1,100平方度の天域にわたり銀河の多色サーベイを行った (2021年12月にデータ取得は完了)。本稿では2014年から2019年のあいだに取得した約416平方度の天域の観測データを使用したHSC Year 3 (Y3) 宇宙論解析の結果を紹介する (Year 3となっているのは本データが、HSC-SSPの当初の計画である3年度分に相当するからである)。初年度のデータ解析 (HSC Year 1; Y1) の結果については日影千秋氏による解説記事を参照されたい [5]。

3. 銀河の形状カタログ

弱い重力レンズ効果を用いた宇宙論を行うため

*1 天文台のHSC Weak Lensing Year 3ページ: <https://hsc-release.mtk.nao.ac.jp/doc/index.php/wly3/>

*2 <https://hsc.mtk.nao.ac.jp/ssp/>

には、まずはHSC-SSPで得られた個々の銀河の画像から銀河の楕円率を正確に測定することが最初のステップになる。すばるのような地上望遠鏡の撮像観測で得られる銀河の画像は、大気のシーイング、検出器のノイズ、また検出器の離散的なピクセルなどの影響を受ける。これらの影響を定量的に評価するため、ハッブル宇宙望遠鏡のデータや画像シミュレーションを用いて、HSCデータの特性を可能な限り再現し、銀河形状の測定における系統誤差の較正を行った。具体的には、ハッブル宇宙望遠鏡で得られた高角度分解能の銀河画像に弱重力レンズ歪み効果とHSCデータがもつピクセルノイズやPSF (point spread function) をシミュレーションで再現し、実際に用いる銀河形状測定の手法によってどの程度正確に入力した重力レンズ効果を復元できるかのテストを行った。重力レンズ測定手法の精度は、以下の式で定量化するのが通例である。

$$\hat{\gamma} = (1+m)\gamma + a \quad (1)$$

ここで、 $\hat{\gamma}$ は楕円率に換算した重力レンズ歪み効果の推定値、 γ はシミュレーションのインプット値である。手法の正確さは、乗算・加算の較正因子 m と a で定量化している。HSC Y3の解析で用いた手法では、 m は $O(10^{-2})$ (つまり1%レベル)、 a は $O(10^{-3})$ の精度で較正できている。特に、興味のある宇宙論パラメータ S_8 は弱い重力レンズの強度、観測的には銀河形状 γ の振幅に直結するため、乗算的補正因子 m を数%レベルで較正しておくことが精密宇宙論を遂行するために要求され、実際の我々の手法はこの要求を満たしていることを確かめた。

銀河形状に加えて、個々の銀河の赤方偏移情報も宇宙論解析には必要な情報である。5つの透過フィルター (grizy) で各領域を測定し、各々の銀河の色から測光的赤方偏移を推定した [6, 7]。こうして得られたHSC銀河の赤方偏移分布を図1に示す。すばるの集光力のおかげで高赤方偏移

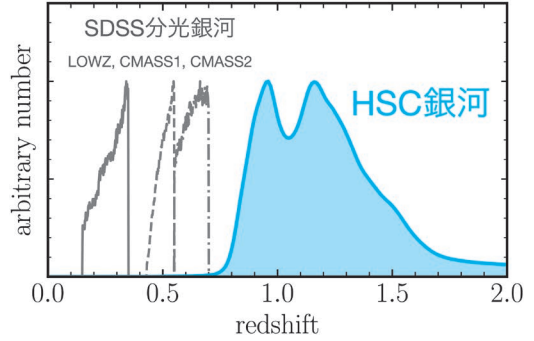


図1 本研究の宇宙論解析に用いた銀河サンプル。青色線はHSC銀河の赤方偏移分布を示す。灰色線はHSC銀河よりも低赤方偏移にある分光SDSS銀河の分布を示す。銀河弱重力レンズ効果を測定するために、レンズ天体のSDSS銀河よりも高赤方偏移にあるHSC銀河だけを選択している。

($z > 1$)の銀河まで解析に用いることができる。

さらに、各晩の観測条件に依存して、観測した銀河の形状は、大気の影響、つまりPSFの影響を受ける。これについては、銀河と同じ領域のHSCデータの星像からPSFを正確に測定し、銀河の画像におけるPSFの影響を補正する。しかし、PSF補正も完璧ではないので、PSFの系統誤差が及ぼす影響を定量的に評価した [8]。

以上述べたように、宇宙論解析には観測の系統誤差の小さい、均一なデータを用いる必要がある。この理由で、本解析では、すべての透過フィルターで観測が完了しており、各銀河の画像が十分なS/Nで検出されている (十分な深さがある)、という条件を課し、観測領域を選定した。HSCチームは、約1年間にわたりデータ・カタログの入念かつ慎重な解析・テストを行い、面積で約416平方度の領域にある3,500万個以上のHSC銀河の形状カタログを作成した [9]。これらの銀河カタログについては、いずれの系統誤差の定量的な評価も、宇宙論解析に必要な要求精度を達成していることを確認している。

4. 宇宙論解析

4.1 宇宙論観測量

銀河形状の銀河重力レンズ効果から宇宙論の情報を引き出す信号として、本研究では3種類の2点相関関数を用いた(3×2pt手法と呼ばれる)。1番目はHSCの銀河形状の自己相関関数であり、コズミックシアの2点相関関数(ξ_{\pm})と呼ばれる。コズミックシアは、銀河と観測者間の物質分布を調べるために用いる。2番目の信号は、HSC銀河よりも低赤方偏移にあるSDSS分光銀河の位置と背景のHSC銀河形状との相互2点相関関数であり、銀河弱重力レンズ効果(galaxy-galaxy weak

lensing)と呼ばれ、以後 $\Delta\Sigma$ と表記する。SDSS分光銀河がレンズ天体の働きをし、銀河弱重力レンズ効果はレンズ天体まわりの平均的な物質(主に暗黒物質)の分布を観測的に調べるために用いる。SDSSの親カタログから、光度についてほぼ一様な特性を持つ、3つのレンズ銀河サンプルを各赤方偏移ビンで定義した(図1の灰色)。後述するように、3つの赤方偏移ビンの $\Delta\Sigma$ 信号を用いることにより、HSC銀河の測光的赤方偏移の系統誤差を較正することが可能になった。3番目の信号は、レンズ天体に用いた各赤方偏移ビンのSDSS銀河の位置の自己2点相関関数であり、銀河クラスタリングと呼ばれ、以後 w_p と表記する。

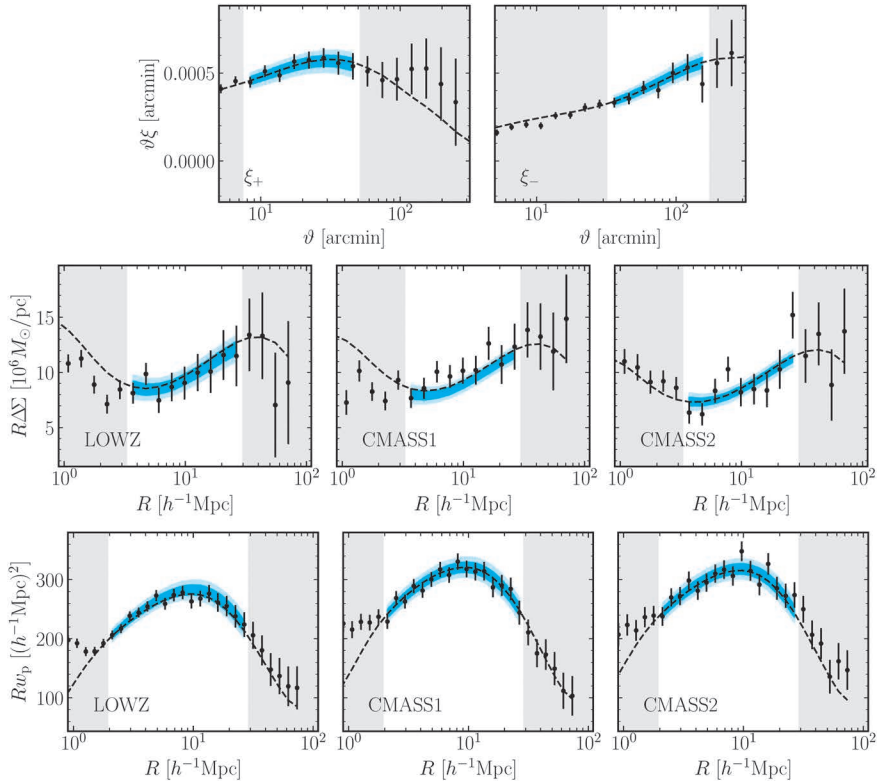


図2 宇宙論解析に使った3種類の2点相関関数の信号の測定結果(誤差棒のある黒データ点),および Λ CDMのベストフィットモデル(黒破線),モデル预言の事後確率分布の 1σ 領域(青)との比較。上の行からコズミックシア,銀河弱重力レンズ,銀河クラスタリングの信号を銀河間の物理距離/角度(R, ϑ)の関数として表示。銀河弱重力レンズについては,レンズ天体である各SDSS銀河の分光赤方偏移から計算される共動座標を用いて,天球上の銀河間角度を物理的な距離 R に変換している。銀河クラスタリングについては,銀河間距離の視線方向に垂直な成分が R である。

なかでも、銀河バイアスへの依存性が異なる銀河弱重力レンズと銀河クラスタリングを組み合わることは、宇宙論パラメータと銀河バイアスのあいだの縮退を解くことができる強力な手法である。

HSC Y3のデータは前回のY1の解析と比較して約3倍の面積の天域におけるデータに対応し、それに伴って統計精度も向上している。ロバストな宇宙論解析を実現するためには、観測量の2点相関関数の理論モデルに要求される正確性もより厳しいものになる。一般に宇宙の大規模構造は大(長波長)スケールで正確な線形理論が有効で、小(短波長)スケールでは線形理論が破綻し、非線形な構造成長や銀河物理の不定性のために第一原理的な理論予言が難しくなる。特に銀河分布と物質分布のあいだの銀河バイアスモデルは不定性が大きく、この不定性を吸収できるロバストなモデルが必須である。一方で、小スケールの観測データは、統計誤差に比較して信号が大きく(S/N が大き)、より多くの情報を含んでいる。このため、いかに小スケールの物理を有効的に正確にモデル化しつつ、その不定性の影響をベイズ統計的に周辺化できるか、という点が、宇宙論パラメータの精密測定の鍵となる。今回のHSC Y3の 3×2 pt解析では銀河バイアスモデルとして暗黒物質ハローに基づくモデルを用いた [10]。このモデルは小スケールの非線形段階までの構造形成を正確に計算できる宇宙論的N体シミュレーションの大規模データを機械学習で高速エミュレートした手法で、HSC Y3の要求精度を満たしていることを確認した。機械学習によるエミュレータの詳細は西道氏の記事 [11] を参照されたい。

図2に、HSC Y3の銀河形状カタログとSDSSの分光銀河カタログから実際に測定した 3×2 ptの信号を銀河ペア間の物理距離/角度(R, θ)の関数として示す [12, 13]。コズミックシア、銀河弱重力レンズ信号には対称性からゼロになるべきBモード、クロスモードと呼ばれる信号があり、

特に大スケールにおける系統誤差のチェックに利用できる。灰色で示された大スケール領域はこれらのテストによって宇宙論解析から除外されたデータ領域を示しており、宇宙論パラメータに系統誤差が及ばないように注意深く設定した。一方で小スケール側に関しては、銀河物理の不定性が大きくなる小スケールのデータ点によって、最終的な宇宙論パラメータの測定が影響を受けないように除外するスケール領域を決定した。

4.2 ブラインド解析

宇宙論解析を行う際に注意すべき誤差として、データ及び理論モデルの系統誤差以外に、解析者由来の確証バイアスと呼ばれる系統誤差がある。これは解析者が持つ思い込み、あるいは結果がこうであって欲しいという先入観から、結果を間違えて解釈してしまったり、都合のよい解析を行ってしまうバイアスのことを言う。例えばHSCの宇宙論解析では銀河の形状カタログから信号を測定して、モデルを構築し、宇宙論パラメータの推定結果を最終的に得るまでに典型的には1年ほどかかる。このあいだに様々な系統誤差のチェック、解析パイプラインのチェック・修正・改良を行うことで結果をアップデートしていくが、もし解析者がHSCの結果をPlanck衛星などの他の宇宙論観測の結果と比較しながら行くと、HSC結果が他の結果と合致した瞬間に系統誤差の洗い出しや手法のチェック・改良をやめてしまい、解析パイプラインのバグや系統誤差を見逃してしまう危険性がある。

この確証バイアスを避けるために、我々はブラインド解析と呼ばれる手法を導入した。まず、HSC Y3の銀河形状カタログに加えて、意図的に式(1)の m の値をシフトさせることで、二つの「偽」のカタログを作成した。シフトした m の値には暗号鍵が付けられており、解析者はこの3つのカタログのうちどれが本物かを知らずに解析するため、どのカタログが本物であってもよいように、真と偽の両方を含む全カタログの系統誤差の

チェックを行った。また、観測データから推定した宇宙論パラメータの結果（事後確率分布）をプロットする際には、軸の中心値を常にゼロにシフトすることで、宇宙論パラメータの測定値を見ないことにした。最後に、HSCの宇宙論パラメータの測定結果と先行研究を比較しない、あるいは比較したプロットを作らないことにした。このように解析者を目隠しの状態（ブラインド）にすることで、確証バイアスの可能性を排除することができた。事前にリストアップした様々な系統誤差のテストと解析手法のテストのチェック項目をすべてクリアし、解析手法および解析の結果を凍結したのち、最後にアンブラインド（どのカタログが本物か、宇宙論パラメータの中心値はいくらかを明らかにする）することができる。アンブラインドしたあとは解析結果を絶対に変更しないという約束をすることで、最終的に報告する値が確証バイアスを含まないことを保証することができる。HSC-SSPの宇宙論結果は、すばるデータでは初めて本格的なブラインド解析を実行した結果であり、素粒子実験、CMB宇宙論など同レベルの信頼性を保証した結果になっていると言える。

4.3 HSC Y3宇宙論解析の特色

欧米のDESあるいはKiDSの弱重力レンズ宇宙論の結果と比較してHSC Y3の宇宙論解析の特筆すべき違いは、弱重力レンズ宇宙論の最大の懸念の一つである測光的赤方偏移の不定性の取り扱いにある。 $z < 1$ のHSC銀河については、分光データを用いた手法、あるいは正確な赤方偏移情報がある銀河とのクラスタリング測定を用いた手法により、測光的赤方偏移の情報は十分な精度で較正できていると考えられる。しかし一方で、上述したようにHSCの解析では $z > 1$ の高赤方偏移の暗い銀河も用いているが、高赤方偏移の銀河では星形成も活発であり、急激な進化のフェーズにあるため、銀河の色と赤方偏移の関係は十分には調べられていない。そもそも広帯域フィルターによる限定的な銀河の色情報だけでは、完璧な精度で赤

方偏移を推定できないとも考えられる。この事実を認め、HSCのベイズ解析において、 $z \geq 1$ の平均的な赤方偏移について何の仮定も採用しないことにした。具体的には、 $z \geq 1$ に対して、測光的赤方偏移から推定される平均赤方偏移から、 $\Delta z = [-1, 1]$ の系統的なシフトがあることを許した（つまり、平均赤方偏移の事前情報が全くない、という立場を採用した）。これは、 $1+z$ の言葉で数%の精度で平均赤方偏移がわかっているという事前情報を仮定する通常の解析手法とは対照的な立場である。

HSC Y3の解析では、銀河弱重力レンズ信号による測光的赤方偏移の自己較正法 [14] を用いて、 $z \geq 1$ の銀河の平均赤方偏移の系統誤差の問題を解決した。この手法は、異なる赤方偏移ビンにあるSDSSの分光銀河が引き起こす弱い重力レンズ効果の強度を比較することで、HSC銀河の測光的赤方偏移を較正するという手法である（図1）。自己較正法の有効性は銀河弱重力レンズのS/Nに依存しており、HSC Y1の銀河弱重力レンズ解析 [15, 16] では統計精度が足りず事前情報に頼る必要があったが、HSC Y3の3倍のデータ量と 3×2 pt解析でコズミックシアの情報を組み合わせることで、この測光的赤方偏移の自己較正法を活用できた。模擬データを用いた解析手法のテストでも、例えば平均赤方偏移に $\Delta z = \pm 0.2$ 程度の系統誤差があったとしても、この自己較正法によって正しい平均赤方偏移および S_8 の値を復元することも確認した。後で見ると実際にHSC Y3のデータ解析では、ゼロでない Δz が確認されており、これは高赤方偏移の銀河の測光的赤方偏移に系統誤差が残されていることを示唆している。

もう一つのHSC Y3の特徴は、4つの独立した宇宙論解析を同時に遂行したところにある。本稿で主に紹介しているのは、HSC Y3の 3×2 pt信号の、特に宇宙論的共動距離にして $R \in [3, 30]h^{-1}$ Mpcの信号を使った小スケール解析である [13]。この解析と相補的な立場の解析としてHSC Y3の

$3 \times 2\text{pt}$ の, $R \in [12, 80]h^{-1} \text{Mpc}$ の大スケールの情報を用いた解析がある [17]. この解析では, 構造形成の進化・特性, 銀河バイアス関係について, 摂動的な解析手法を用いることができ, 考え得る銀河バイアス不定性の影響を最も受けにくい手法になっている. 本稿の小スケール解析と比較することで銀河バイアス不定性の影響が小さいことを確認する上で重要な解析になっている.

さらに, これら $3 \times 2\text{pt}$ の手法とは独立に HSC Y3 のコズミックシア・トモグラフィー解析を, 実空間, フーリエ空間のそれぞれで遂行した [18, 19]. コズミックシア・トモグラフィー解析とは, HSC 銀河を 4 つの赤方偏移ビンに分け, 宇宙の物質の空間分布を断層的 (tomographic) に解析す

ることで大規模構造の進化を調べる手法である.

上述の $3 \times 2\text{pt}$ 解析, 実空間・フーリエ空間のコズミックシア・トモグラフィー解析のそれぞれの手法で, 独立なブラインド解析を行った. 日本時間で 2023 年 2 月 17 日の定例リモート会議で HSC メンバーの参加者の前でアンブラインドを行い, 4 つの手法の宇宙論パラメータの測定結果を初めて比較し, すべての手法の S_8 の測定値が統計精度の範囲内で一致することを確認できた! そのリモート会議は興奮に包まれ, 一年以上にもおよぶ重力レンズ解析におけるストレス, プレッシャー, 様々な困難の疲れが吹き飛んだ瞬間だった.

5. 結 果

この章では HSC Y3 の宇宙論解析の結果を示す. ここから示す図は, すべてブラインド解析のあいだに得られたものであり, 中心値はアンブラインドの後に明らかにした. 宇宙論解析の結果を図 3 に示す. 青色が本稿でメインで紹介した HSC Y3 の $3 \times 2\text{pt}$ 解析の小スケール解析の結果で, 灰色の実線が大スケール解析の結果である. 両者の結果はこの図の上でよく一致しており, データの相関 (共有部分) を加味しても二つの結果は統計的に無矛盾であることも確かめた. 鎖線, 破線はコズミックシア・トモグラフィーの実空間, フーリエ空間での解析結果である. $3 \times 2\text{pt}$ とコズミックシア・トモグラフィーのそれぞれから推定した S_8 もよく一致している. Ω_m 方向には 1σ 程度のズレが見られたが, これは統計誤差と比較すると, 有意性が低いことも確認できた.

図 4 に先述の S_8 測定のストレステストおよび内部整合性のテストの結果を示す. このテストでは, 基準となる宇宙論解析のセットアップを少し変更した場合やデータの一部を取り除いた場合でも, S_8 測定には大きな影響がないことを確認した. わかりやすさのために, 類似したテストには水平点線を入れてグループ化してある. 最初のグルー

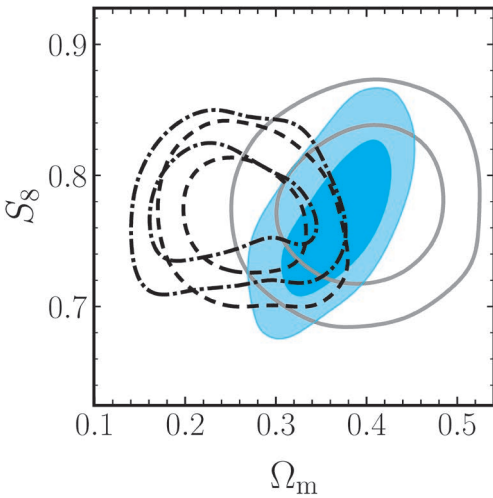


図3 HSC Y3 の宇宙論解析から得られた ΛCDM の宇宙論パラメータの測定結果. x 軸は現宇宙の全エネルギーに対する物質の割合 (Ω_m), y 軸は現宇宙の構造形成の進化の度合いを特徴づけるパラメータ (S_8) である. 青色の等高線が本稿で解説した $3 \times 2\text{pt}$ の小スケール解析から得られた制限, 灰色の実線は $3 \times 2\text{pt}$ の大スケール解析で得られた制限, 破線がコズミックシアのフーリエ空間における解析による制限, 鎖線がコズミックシアの実空間における解析による制限を示す. それぞれの解析について, この 2 次元パラメータ空間の事後確率分布における 68%, 95% の信用領域を示す.

プは宇宙論解析に使う信号の組み合わせを変えたものであり、上から順に3×2pt解析の結果（基準の解析）、銀河弱重力レンズ効果とクラスタリングのみを使った結果、コズミックシアのみを使った結果を示す。これらの一致は3つのプローブがそれぞれΛCDMのなかで矛盾ない観測データになっており、3×2ptとして安全に組み合わせやすいことを示している。次のグループは銀河クラスタリングと銀河弱重力レンズのスケールカットを基準と異なるスケールにした場合の結果である。例えば一つ目は最小スケールカットを w_p と $\Delta\Sigma$ のそれぞれに対して $R_{\min}=4, 6 h^{-1}\text{Mpc}$ にした場合である。大スケールの信号ほど銀河バイアスの不定性を受けにくいため、スケールカットを基準から徐々に大きくして行った時に結果が変わらないということは、基準の結果が銀河バイアス不定性の影響を大きく受けていないことを示唆する。3つ目のグループは銀河クラスタリングと銀河弱重力レンズの信号に使われているSDSS銀河サンプルの3つの赤方偏移ピンのうち、1つの銀河サンプルを取り除いた場合の解析結果である。これらの結果から、特定のSDSS分光銀河サンプルに系統誤差が含まれていないことを確認できた。4つ目のグループは、観測由来の誤差や銀河の固有形状の相関^{*3}などの系統誤差を無視して解析した場合の結果である。HSC Y3の3×2ptでは銀河形状測定における系統誤差補正の不定性、コズミックシアに対するPSF漏れ出しの効果、銀河形状の固有相関の効果は無視しても大きな違いは見られなかった。一方で、上述した高赤方偏移の銀河の平均赤方偏移の系統誤差を無視した場合、つまり測光的赤方偏移の値をそのまま使った場合、測定した S_8 の大きなシフトが見られた。このテストでは基準解析と同じデータベクトルを使っているため、 S_8 の中心値のシフトは図4の見た目から推定される

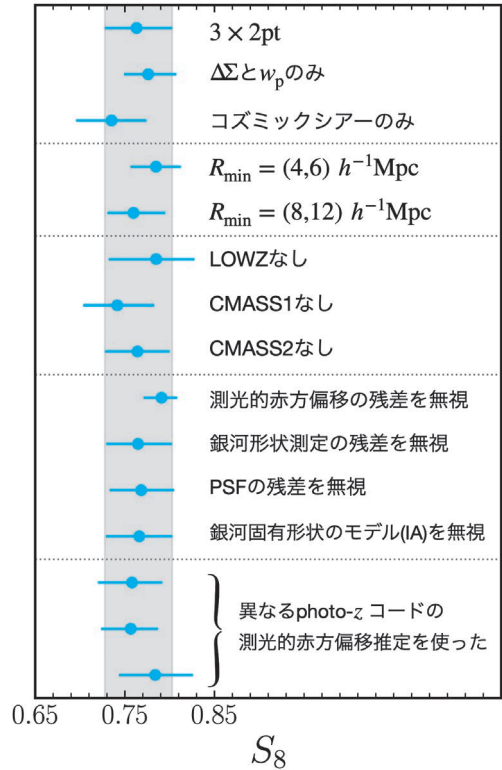


図4 HSC Y3の3×2pt解析による S_8 測定のプロバスタの検証結果。基準である解析3×2ptから、解析セットアップを変えるストレステスト、データの一部を取り除くテストを行った（本文参照）。誤差棒は68%信用区間を示す。比較のために基準解析の信用区間を灰色で示す。

よりも大きな統計的優位度があることに注意されたい。前節で議論したように、これは高赤方偏移のHSC銀河の測光的赤方偏移に系統誤差が残っていることを示唆している。最後のグループは測光的赤方偏移の推定方法を変えた場合の結果である。HSC Y3では3つの測光的赤方偏移の推定手法があり、このどれを使っても宇宙論パラメータの測定結果には大きな違いが見られなかった。

HSC Y3の研究が始まった当初は、基準となる解析セットアップは本稿で紹介した解析セット

^{*3} 重力レンズを受ける前の銀河の固有形状は、宇宙の大規模構造が作る潮汐力場によって系統的なパターン（相関）を持っており、Intrinsic Alignment (IA) と呼ばれる。

アップとは異なっており、模擬データを用いた様々な解析セットアップのテスト、比較、検証を通じて最終的な基準のセットアップに帰着した。特に測光的赤方偏移の系統誤差の取り扱いについては、 S_8 測定 of 統計精度を犠牲にしたとしても、 S_8 の真の値を確実に統計誤差の範囲内で捉える手法を用いるという方針に基づき、その手法の採用に至った。この結果、先行研究と比較してより信頼性の高い、ロバストな結果を得られたと考えている。

6. 宇宙論的示唆

図5にHSCと他の宇宙論観測の結果の比較を示す。まずHSC Y3の結果は米国のDES[20]、欧州のKiDS[21]による弱い重力レンズ解析の結果とよく一致している。弱い重力レンズ信号は一般的に宇宙論パラメータ S_8 に感度を持っていると言われるが、これは実際のサーベイや宇宙論の信

号の組み合わせ方によって異なる。図5からわかるように、DESやKiDSと比較してHSCの結果は S_8 と Ω_m に右斜めの縮退を持っているが、これはHSC Y3の $3 \times 2pt$ 解析における銀河クラスタリングと弱い重力レンズ信号の相対的な S/N 比の違いや小スケールの宇宙論パラメータへの依存関係に由来している。

HSCとPlanck衛星 [22] の結果のあいだには不一致が見られるが、定量的には 2.5σ 程度の統計的有意性（偶然であれば、100回に1回程度の頻度）で不一致があることがわかった。コズミックシア・トモグラフィーの結果でもPlanck衛星の結果と 2σ 程度の不一致が確認された。HSC Y3の結果自体の S_8 不一致は発見に対応する 5σ レベルには達しておらず、統計的に偶然に起こった可能性を棄却できない。それでも、DESやKiDSのような独立な弱重力レンズ効果解析の結果、あるいはSDSS銀河クラスタリングの宇宙論解析でも同程度の不一致が報告されており、 S_8 不一致問題はますます確からしくなっている。

S_8 の不一致は物理的には何を示唆しているのだろうか？ Planck CMB観測による S_8 の結果は、ビッグバンから約38万年後の宇宙のデータから示唆される Λ CDM 模型を現宇宙まで進化させた、つまり外挿した結果である。HSC Y3は現宇宙の S_8 をより直接的に測定しており、これが真であれば、実際の宇宙では、CMBが示唆する Λ CDM の予言よりも宇宙の大規模構造が成長していないことを意味する。したがって S_8 の不一致問題を解決するためには、CMB観測の予言よりも大規模構造の成長を阻害したり、遅らせたりするような物理が必要になる。例えば、時間変化する暗黒エネルギー、質量を持つニュートリノの効果などが考えられる。あるいは暗黒物質の性質の違いによる可能性もある。暗黒物質が複合成分からなり、その一部が質量が非常に軽いアクシオン（例えば 10^{-25} eV 程度の質量）である場合、アクシオンは波の性質を有し、その波長より短いスケールでは

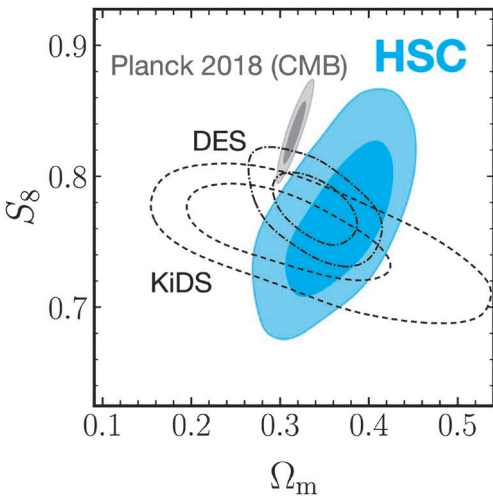


図5 HSC Y3の $3 \times 2pt$ 解析結果と他の宇宙論観測の結果の比較。青がHSC Y3 $3 \times 2pt$ の小スケール解析の結果（図3の青色と同じ）で、破線、鎖線は米国のDES[20]、欧州のKiDS[21]の弱い重力レンズ解析の結果である。灰色はPlanck衛星によるCMBの角度異方性の観測結果である [22]。HSCの結果とPlanckの結果のあいだには統計的有意性で約 2.5σ の違いがある。

物質分布の非一様性を滑らかにする効果を及ぼし、 S_8 を小さくすることができる。このように S_8 不一致が真であれば、宇宙の標準模型 Λ CDMを超える新しい物理の発見に繋がる可能性があり、その科学的重要性は極めて高いと言える。

7. 今後の展望

HSC-SSPサーベイの観測自体は2021年12月にすでに約1,100平方度のデータ取得を完了しており、今後はHSC-SSPサーベイの最終データから弱い重力レンズ効果を測定し、宇宙論解析を行う予定である。 S_8 測定 of 統計精度の改善が確実である。さらに、2025年からすばる主焦点多天体分光器Prime Focus Spectrograph (PFS) [23]による分光銀河サーベイが開始する予定である。PFSはHSCと相補的であり、HSC-SSPと全く同じ天域について、赤方偏移で $0.6 < z < 2.4$ にある、約400万個の輝線銀河の分光サーベイを行う。この分光赤方偏移データを用いることで、HSC Y3解析で示唆された測光的赤方偏移の系統誤差を観測的に確認し、またその影響を除去し、HSC重力レンズ宇宙論の統計精度を格段に改善できる。さらに、SDSSの研究成果から明らかのように、すばるHSC撮像データとPFS分光データの統合解析から、高精度かつロバストな精密宇宙論を実行することができる。今後の数年で S_8 不一致問題の真偽に決着をつけることができ、真であれば、宇宙の新しい物理に迫ることができる。ニュートリノ質量の測定など、すばるデータ主導で様々な宇宙論研究を確実に展開できるだろう。

今回のHSC Y3の宇宙論研究では、著者の杉山をはじめとする若手研究者が大活躍した。また2023年4月3日にHSC Y3の研究結果を全世界にウェビナーで発信したが、そこでも解析を主導した若手研究者が研究成果を発表した。このように誰にでもチャンスがあり、興味、やる気があれば、すばるHSC・PFSのデータでエキサイティングな研究をリードできる。この記事を読んで少

しでも興味を持った方は、この機会にHSC・PFS共同研究への参加を検討して頂きたい。

最後に今後10年のタイムスケールの欧米主導の究極的な広天域銀河サーベイにより、宇宙論研究の展望も極めて明るいことにも言及したい。欧州ESAのEuclid宇宙望遠鏡は打ち上げが無事成功し、2025年からは米国Vera C. Rubin天文台におけるLegacy Survey of Space and Time (LSST)の観測が開始する。さらに、米国NASAのRoman宇宙望遠鏡も打ち上げが2026年頃に予定されている。これらの大型プロジェクトには日本の参加も決まっており、日本の研究者に対して門戸が開かれている。HSC-SSPの経験が活かされることは間違いなく、またこれら銀河サーベイとPFSの多天体分光能力は相補的であり、大きな期待が寄せられている。今後の大規模銀河サーベイ宇宙論の研究、また派生する学際研究分野において、多くの日本の研究者が存分に活躍できることを目指し、また期待したい。

謝辞

本稿で紹介した研究成果はすばるHSCのさまざまな共同研究者の協力によって実現したものです。HSCの開発チーム、ソフトウェアチーム、データベースチーム、弱い重力レンズチーム、測光的赤方偏移チームの皆様に感謝します。また執筆の機会を下さった西澤淳さんに感謝します。

参考文献

- [1] Miyazaki, S., et al., 2018, PASJ, 70, S1
- [2] 宮崎聡, 2019, 天文月報, 112, 80
- [3] Aihara, H., et al., 2018, PASJ, 70, S4
- [4] 高田昌広, 2019, 天文月報, 112, 89
- [5] 日影千秋, 2019, 天文月報, 112, 720
- [6] Nishizawa, A. J., et al., 2020, arXiv e-prints, arXiv:2003.01511
- [7] Rau, M. M., et al., 2023, MNRAS, 524, 5109
- [8] Zhang, T., et al., 2023, MNRAS, 518, 709
- [9] Li, X., et al., 2022, PASJ, 74, 421
- [10] Nishimichi, T., et al., 2019, ApJ, 884, 29
- [11] 西道啓博, 2022, 日本物理学会誌, 77, 656

[12] More, S., et al., 2023, Phys. Rev. D, 108, 123520
 [13] Miyatake, H., et al., 2023, Phys. Rev. D, 108, 123517
 [14] Oguri, M., & Takada, M., 2011, Phys. Rev. D, 83, 023008
 [15] Sugiyama, S., et al., 2022, Phys. Rev. D, 105, 123537
 [16] Miyatake, H., et al., 2022, Phys. Rev. D, 106, 083520
 [17] Sugiyama, S., et al., 2023, Phys. Rev. D, 108, 123521
 [18] Li, X., et al., 2023, Phys. Rev. D, 108, 123518
 [19] Dalal, R., et al., 2023, Phys. Rev. D, 108, 123519
 [20] Abbott, T. M. C., et al., 2022, Phys. Rev. D, 105, 023520
 [21] Heymans, C., et al., 2021, A&A, 646, A140
 [22] Planck Collaboration, et al., 2020, A&A, 641, A6
 [23] Takada, M., et al., 2014, PASJ, 66, R1

Weak Lensing Cosmology with Subaru HSC Data

Sunao SUGIYAMA, Masahiro TAKADA and Hironao MIYATAKE

<¹Department of Physics and Astronomy, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA 19104, USA>

<^{1,2,3}Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (WPI), The University of Tokyo Institutes for Advanced Study (UTIAS), The University of Tokyo, 5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8583, Japan>

<³Kobayashi-Maskawa Institute for the Origin of Particles and the Universe (KMI), Nagoya University, Furo-cho, Nagoya, 464-8602, Japan>

Abstract: The Λ CDM model, which remarkably well describes various observational data of the universe, has recently faced a tension between the cosmological parameters S_8 measured from cosmic microwave background radiation and galaxy surveys, known as the “ S_8 tension”. In this study, we conducted a precise and robust test of the S_8 tension using the Subaru HSC Year 3 wide-field imaging galaxy survey data for gravitational weak lensing cosmological analysis. Introducing a new analysis method that is more robust against the photometric redshift uncertainties compared to previous research, we measured S_8 with an accuracy of about 5%. The HSC Y3 results support the S_8 tension with a statistical significance of approximately 2.5σ . This article presents the cosmological analysis of HSC Y3 and the cosmological interpretations of the S_8 tension.