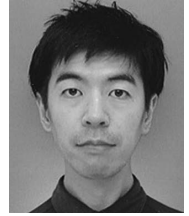


宇宙の標準模型 Λ CDMは本当に正しい？

すばる HSC による精密宇宙論



日影千秋

〈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〉

e-mail: chiaki.hikage@ipmu.jp

宇宙の標準模型 Λ CDM 模型が確立し、早 20 年近く経つが、宇宙のエネルギーの 95% を占める暗黒物質や暗黒エネルギーの正体は依然として不明である。暗黒成分の謎を明らかにするため、すばる望遠鏡に搭載した超広視野カメラ「ハイパー・シュプリーム・カム」による大規模な銀河撮像観測が進行している。宇宙大規模構造による弱い重力レンズ効果「コズミックシア」を測ることで、ダークマターを含む宇宙の全物質の構造形成の様子を詳細に調べることができるようになったのだ。今回、HSC の第一期カタログによるコズミックシアの解析から宇宙の構造の成長度合いを誤差 3.6% の世界最高級の精度で測定した結果を紹介する。またプランク衛星による初期宇宙の観測結果とコズミックシアによる成長後の宇宙の観測結果との食い違いのもつ意味について解説する。

1. 宇宙の中身は暗黒だらけ

2000 年前後の WMAP 衛星による宇宙マイクロ波背景輻射による宇宙初期のゆらぎの観測¹⁾、スローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS) による銀河の空間分布²⁾、Ia 型超新星を用いた宇宙膨張の精密測定^{3,4)} から、冷たい暗黒物質と宇宙項 Λ に基づく「 Λ CDM」が宇宙の標準模型として確立した。 Λ CDM 模型は宇宙のさまざまな観測を、わずか 6 つの物理量「宇宙論パラメーター」で記述できる大変素晴らしい模型である。しかし、宇宙の膨張と構造の成長を記述する模型はできたものの、肝心の宇宙の中身が何なのかは分かっておらず、宇宙の全エネルギーのおよそ 95% が暗黒物質と暗黒エネルギーとよばれる未知の成分となっている。

暗黒物質は通常の原子でできた物質とは異なり、光とほとんどもしくは全く相互作用しないのだが、暗黒物質の重力がないと銀河の回転速度や

重力レンズの観測結果をうまく説明することができない。素粒子論から暗黒物質の理論的な候補は数多く挙げられ、その痕跡を検出する実験が進行しているが、いまだ暗黒物質の正体の特定には至っていない。

暗黒エネルギーは Ia 型超新星の観測による宇宙の加速膨張の発見によって登場した。万有引力をもつ物質だけでは宇宙の膨張を加速させることはできず、膨張の加速を後押しする何かが必要なのだ。アインシュタインが導入した宇宙項によって加速膨張は記述できるのだが、宇宙項の物理的な意味が全く明らかでない。仮に真空に内在するエネルギーとすると、場の量子論から見積もった真空のエネルギーの予想値に比べなんと 120 桁以上も小さく、とてつもない微調整が必要になるのだ。 Λ CDM 模型の基盤となる一般相対性理論に修正を加えることで加速膨張を説明することができるが、現状の観測では宇宙項を含む一般相対性理論との区別はつかず、修正重力理論を支持する

決定的な証拠は見つかっていない。宇宙の中身は依然として暗黒のままなのである。

2. コズミックシア

宇宙の暗黒問題の解決に向けて突破口となるのは、宇宙の膨張の歴史や宇宙の物質の構造が成長する様子をさまざまな観測から精密に調べ、 Λ CDM 模型に破綻がないか徹底的な検証を行うことである。

宇宙の構造の成長を調べる手段として特に最近観測が進んでいるのは、撮像銀河データを用いた弱い重力レンズ効果「コズミックシア」である。銀河の光が我々に届くまでの間に物質の重力によって光の軌道が曲げられ、銀河の形がゆがんで観測される、これが重力レンズ効果である。例えば銀河団のように物質が多く集まった場所の周りでは、銀河の形は円弧状にゆがむ。逆に物質がほとんどないボイドの周りを通る銀河は放射状にゆがむ。銀河の撮像観測によって広い天域にわたる銀河の系統的なゆがみを調べることで、どの方向にどれだけ物質が集まっているかを調べることができる。

コズミックシアを測定することで、重力レンズ効率の重み付きで視線方向に積分した2次元の物質分布の情報が得られる。重力レンズの効率はソース（銀河）と我々のほぼ中間の距離にレンズ（物質分布）があるときに最も高い。そのため銀河のサンプルを赤方偏移によって分けることで、部分的ではあるが3次元の物質分布の情報が得られる。これはトモグラフィック（断層）解析とよばれる手法であり、物質分布の構造が時間とともに成長する様子を調べることができる。

これまで、宇宙の大規模構造の成長は、SDSS のバリオン音響振動分光サーベイ（BOSS）⁵⁾ などに代表される銀河の赤方偏移サーベイを通して調べるのが一般的であった。しかし、銀河はダークマターの密度の高い場所に選択的に形成されるが、銀河の分布とダークマターの分布との間には

複雑な銀河形成過程に由来する不定性「銀河バイアス」があり、両者の間にはずれがある。これに対して、物質の重力によって生じるコズミックシアはダークマターを含むすべての物質の分布を直接調べることができる点で非常にユニークな観測量であり、また強力な宇宙論的指標である。

コズミックシアは2000年初頭に複数のグループによって独立に検出された⁶⁾⁻⁸⁾。しかし、コズミックシアを用いた宇宙論解析を行ううえで決定的に困難なことは、コズミックシアのシグナルが非常に小さいことである。銀河の像は真円ではなく、もともと30%程度の楕円率をもっているが、コズミックシアによるゆがみはその楕円率をわずか1%変える程度の大変小さい効果である。コズミックシアを検出するためには、なるべく多くの銀河の形を測定してその平均的なゆがみを測らなくてはならない。また精密な宇宙論解析のためには、なるべく広い天域にわたって観測する必要がある。つまり広さと深さの両方を兼ね備えた銀河撮像観測が必要である。さらに、コズミックシアによるわずかなゆがみを精確に測定するには、望遠鏡に由来するわずかな形のゆがみや大気のふらつき（シーイング）に伴う系統誤差をきちんと補正しなくてはならない。従来の撮像性能では、コズミックシアを検出することはできても、精密な宇宙論解析、例えばプランク衛星の宇宙マイクロ波背景放射観測に匹敵するほどの精密な解析を展開するには不十分であった。

3. すばるハイパー・シュプリーム・カム

すばる望遠鏡に搭載した超広視野カメラ「ハイパー・シュプリーム・カム（HSC）」を用いた銀河撮像観測計画が進行している。すばる望遠鏡の8.2メートルの大口径を活かした優れた集光能力と超広視野カメラHSCの撮像性能を活用することで、広さと深さを兼ね備えたかつてない大規模な銀河撮像観測が可能となったのだ⁹⁾。

HSCによる戦略枠計画（HSC-SSP; 以下HSC）が採択され、2014から2019年にわたって300夜の観測が与えられた。HSCは観測領域の広さと深さの異なる3つの階層からなる。重力レンズ効果を用いた精密宇宙論を目的とするWide（ $r\sim 26$ 等、1400平方度）、銀河形成の進化の理解を目的とするDeep（ $r\sim 27$ 等、27平方度）、高赤方偏移天体の観測や宇宙の再イオン化機構の理解を目指すUltradeep（ $r\sim 28$ 等、3.5平方度）の3つであり、宇宙の歴史の包括的な理解を目指す観測計画である。2017年2月28日にはHSCの約60夜分の観測データが一般公開された¹⁰⁾。また2018年初頭にはHSCの初期データに基づく40篇もの論文が日本天文学会PASJの特集号として出版されるなど、インパクトの大きい科学成果を数多く上げている。詳しい内容については、HSC特集号の記事をご覧ください^{11),12)}。

今回、コズミックシアの解析には、2016年前半期までに観測した約140平方度の撮像データに基づく銀河形状カタログを用いた¹³⁾。先にも述べたように、コズミックシアの測定には多くの銀河の形を精確に測定する必要がある。そのためには、光学系や大気の影響による像の広がり（PSF: 点像分布関数）の補正を行わなくてはならない。また銀河が視線方向に重なるブレンディングによって銀河の形状がならされる効果も補正しなくてはならない。そのためにハッブル望遠鏡によるシーイングのない撮像データと比較することで、銀河の明るさや解像度ごとにブレンディングの補正をどの程度行わなければならないかを見積

もっている。弱重力レンズチームは、長い時間をかけてさまざまな系統誤差の確認を行い、銀河形状カタログが求められるサイエンスの精度に達していることを検証したのである。

そして、銀河の形状カタログによるコズミックシアの解析から物質分布の再構築が行われた¹⁴⁾。銀河カタログと比較したところ、ダークマターの密度の濃いところには銀河が多数見付き、両者の間に強い相関があることが確かめられた。銀河はダークマターが集まったところに形成されることをはっきりと示すものである。また銀河の測光距離をもとにしたトモグラフィック解析を行い、かつてない広さと深さを合わせもつダークマターの空間地図を作ることに成功した。

すばるHSCとは別の銀河撮像観測計画も進行している。チリのパラナル天文台にある2.6mのVLT掃天望遠鏡（VST）を用いた欧州グループによるKilo-degree survey（KiDS）¹⁵⁾、チリのセロトロロ天文台にある4mのブランコ望遠鏡を用いた米国グループによるDark Energy Survey（DES）¹⁶⁾である。表1はコズミックシア解析に用いた各サーベイの第一期カタログKiDS-450、DES Y1、HSC Y1を比較したものである。まず注目すべき点は、すばるにおけるシーイングは世界で最も良く、極めて鮮明な画像が得られることである。さらにHSCの優れた結像性能のおかげで、コズミックシア測定に利用できる銀河の数密度はKiDS、DESより3倍も高く、より暗く遠方の銀河の形を精確に測ることができる。コズミックシアの測定に利用できる銀河の数密度が高いほ

表1 KiDS-450, DES Y1, HSC Y1のコズミックシア観測のまとめ。各観測のサーベイ領域、典型的なシーイングの大きさ、銀河数密度、ソース銀河の赤方偏移範囲を比較したものである。HSCはKiDSやDESに比べ、サーベイ領域は小さいものの銀河数密度は高く、ソース銀河の赤方偏移も高い。なお、最終計画のサーベイ領域は観測の進行状況によって変わること留意する。

観測	シーイング	サーベイ領域（最終計画）	銀河数密度	ソース銀河の赤方偏移の範囲
KiDS-450	0.7秒角	450平方度（1,500平方度）	6.9平方分角 ⁻¹	0.1 < z < 0.9
DES Y1	0.94秒角	1,321平方度（5,000平方度）	5.1平方分角 ⁻¹	0.2 < z < 1.3
HSC Y1	0.6秒角	137平方度（1,400平方度）	16.5平方分角 ⁻¹	0.3 < z < 1.5

ど銀河の元々の形のゆがみの影響は統計的に小さくなり、コズミックシアをより高精度で測定することができる。またコズミックシアの平均的な大きさは視線方向の物質分布の積分量で決まるので、より遠方の銀河ほどコズミックシアのシグナルは高くなるうえ、より過去の構造の成長具合を調べることができる。これはHSCの高い撮像性能によってなせるものであり、他の観測にはないHSCのユニークな特長である。

4. HSCによる宇宙論解析の初期成果

4.1 コズミックシアのパワースペクトル

本稿ではコズミックシアのパワースペクトルを用いた宇宙論解析について紹介する¹⁷⁾。パワースペクトルは、ゆらぎの振幅の大きさを波数ごとに分けたフーリエ空間での統計量であり、密度ゆらぎを解析するうえで最も基本的な統計量のひとつである。2次元球面上で表されるコズミックシアのパワースペクトルは、銀河形状のゆがみの大きさを多重極子 l ($=2\pi/\text{見込み角}\theta$) の関数で表したものとなる。パワースペクトルは宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background: CMB) や銀河数密度場の解析では必ず用いられるが、コズミックシアの解析にはあまり使われなかった。主な理由は、コズミックシアの観測領域は多くの明るい星によってマスクされた複雑な形状をしていることにある。マスク入りの密度場を直接フーリエ変換をすると、マスク場との畳み込みが起きて本来のパワースペクトルが得られないのだ。今回、CMBの解析で用いられている擬似スペクトル法を用いて、複雑なマスクを含むコズミックシアの場において擬似パワースペクトル法が適用できることをHSCのモックカタログを使って確かめた¹⁸⁾。モックカタログは全天のレイトレーシングシミュレーション¹⁹⁾から作成したものである¹⁴⁾。天球面上のソースの位置は実際の銀河のそれと同一であり、赤方偏移は個々の銀河の測光データから推定した赤方偏移確率分布

にしたがって割り当てている。銀河形状の測定誤差や銀河が元々もつ楕円率の大きさも観測と同じであり、楕円の向きはランダムに回転させて観測のシアパターンを消す代わりに、シミュレーションのシアパターンを含めている。実際の観測データに非常に近い精巧なモックカタログに擬似スペクトル法を適用し、シミュレーションに入力したパワースペクトルや宇宙論パラメータがきちんと再現できることを確かめた。

4.2 ブラインド解析

宇宙論解析を行うにあたって、確証バイアスを取り除くためブラインド解析を行った。確証バイアスとは、自身が欲する結果を支持する証拠ばかりを意識的に集めてしまう心理的なバイアスのことである。客観的な成果を出すことを旨とする科学者にブラインド解析がなぜ必要なのか疑問に思う人もいるかもしれない。しかし、途中段階の結果を知りながら解析を進めていったときに、先行研究あるいは自身が正しいと思っていることと同じ結果であるかそうでないかで、その後の解析の進め方にどうしても違いが出るものである。ブラインド解析は医学の分野などで使われる手法である。例えば、新薬の効能があるかを確かめるために、医師にも患者にも新薬を投与したかを伝えず、数値の変化のみで評価することが行われている。このブラインド解析の手法をすばるHSCの宇宙論解析に初めて用いた。

ブラインドはカタログと解析の2つの段階で行った。カタログ段階では、銀河形状の値の異なる3つのカタログを用意した。正しい値が入っているカタログは1つで、残りの2つにはランダムに（どいっても不自然ではない範囲で）割り振られた偽の値が入っている。そしてどのカタログが本物かを明らかにせず解析を進める、つまり通常の3倍の計算を行うのである。本物のカタログを知るには、解析者本人と、解析には携わっていないカタログの責任者の2つのパスワードが必要であり、独りでは本物のカタログがどれかは分から

ない仕組みになっている。解析段階では、コズミックシアの測定結果の振幅や宇宙論パラメータの中心値を隠す（0にシフトする）プログラムを実装した。中心値が分かってしまうと、たとえ真のカタログを明らかにせずとも、結果に解析が左右される危険があるからである。中心値を伏せているので他の結果との比較はブラインド中には行うことができない。結果をブラインドしたまま、系統誤差の解析を徹底的に行い、解析の基準となるセットアップを決めるのである。これは想像以上にストレスのたまる作業である。

4.3 系統誤差

コズミックシアの解析において、以下に述べるさまざまな系統誤差の影響を考慮した。

(1) PSFモデル化の不定性

銀河の形状測定にはPSFの補正が必要であるが、PSFをきちんとモデル化できていないと、それに伴う余分な銀河形状の相関が生まれる。そこで、PSFの較正に使わずに残しておいた星のサンプルと銀河との形状の相関を調べ、PSFモデル化の不定性に由来する相関の大きさを調べたところ、コズミックシアへの影響が十分小さいことを確かめた。

(2) 測光的赤方偏移測定の系統誤差

コズミックシアの大きさはソース銀河の赤方偏移によるため、理論と比較する際にはソース銀河全体の赤方偏移分布の情報が必要である。しかし全ての撮像銀河について分光観測を行うことは実質的に不可能なため、5つの広帯域バンドの測光情報から赤方偏移を見積もる必要がある。COSMOSフィールドの銀河の赤方偏移を30の広・狭帯域バンドから測定したデータをもとに、HSCの測光データに重み付けし直すことでソースの赤方偏移分布を求めた。

(3) 銀河形状と宇宙大規模構造の相関

銀河の形はもともと（重力レンズ効果を受ける前から）宇宙大規模構造のフィラメント構造や潮汐場と相関「Intrinsic Alignment (IA)」があるこ

とが知られている。特に楕円銀河のIAは強く、例えば銀河団内では潮汐場の効果で系統的に銀河団中心方向に向き、銀河団中心の周りで放射状の形状相関があることが知られている。コズミックシアによる銀河のゆがみは円弧状の相関であるため、IAとは逆の相関である。今回、IAが宇宙大規模構造の潮汐場に比例することを仮定し、比例係数の大きさや時間成長のパラメータをフリーパラメータとして理論モデルに組み込んだ。

(4) バリオンの物理

コズミックシアのパワースペクトルの理論モデルを構築するにあたって、ダークマターとバリオンを含む全物質ゆらぎのパワースペクトルの情報が必要である。バリオンの物理、特に活動銀河核（AGN）による強力な放射やジェットの影響（AGNフィードバック）は、周りのガスを加熱し星形成を阻害するため、暗黒物質のみを含む場合に比べて小スケールの物質ゆらぎがならされることが理論的に示唆されている。最新の流体シミュレーションをもってしてもバリオン物理の影響は定量的に理解されておらず、理論的な不定性が大きい。そこで本解析では、バリオン物理の影響が十分小さいと考えられる1 Mpc以上のスケールに限定した解析を行った。またAGNフィードバックの影響を含めたパワースペクトルのモデルを仮定しても、最終的な結果に有意な影響を及ぼさないことを確かめた。

4.4 コズミックシアの測定成果

HSCの第1期形状カタログから測定したコズミックシアの結果が図1である。コズミックシアによる銀河の形のゆがみのパターンは、湧き出すEモードと渦状のBモードに分けられる。コズミックシアのゆがみは主にEモードであり、Bモードは特殊な宇宙モデルを仮定しない限り観測では検出できないほど小さい。むしろ銀河の形状を測定する際に何らかの系統誤差が含まれているとBモードのゆがみが生まれるため、Bモードは系統誤差の検査に使われる。今回、Eモードのゆがみ

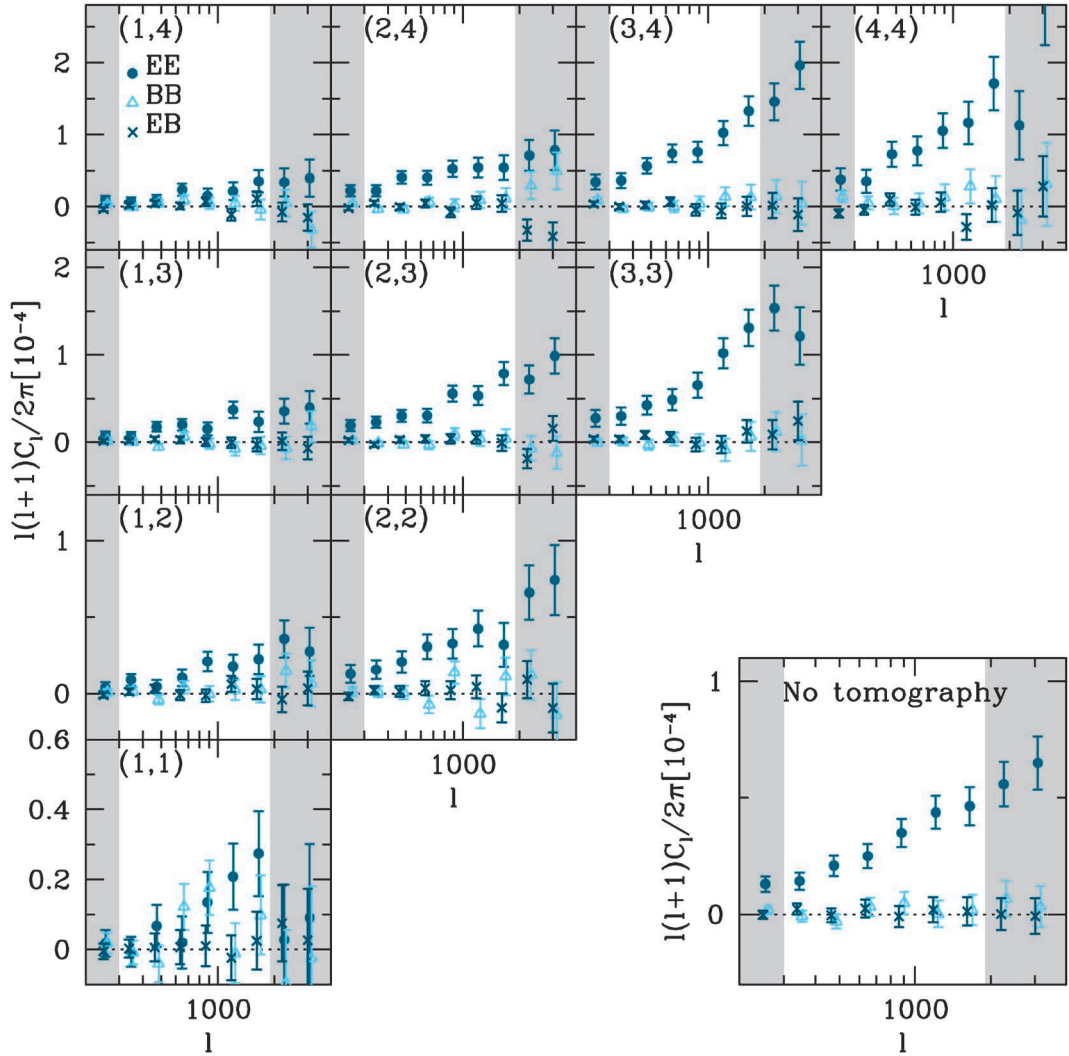


図1 コズミックシアパワースペクトル。銀河サンプルを4つに分けたトモグラフィック解析を行っており、図の左下は赤方偏移が最も低いサンプル同士のパワースペクトル、図の右上にいくほど赤方偏移が高いサンプル同士のパワースペクトルである。また異なる赤方偏移のサンプル同士のクロススペクトルについての測定も行った。図の右下は全ての銀河を用いたノントモグラフィック解析でのパワースペクトルの結果である。図の丸、三角、バツ印は、それぞれEモード（湧き出し）パワー、Bモード（渦状）パワー、EモードとBモードのクロススペクトルである。コズミックシアによって生じるEモードは信号雑音比16で受かっており、その他のモードは有意に検出されていない。図の網掛け部分は、系統誤差が効く可能性を考慮し、コズミックシアの解析には用いなかったスケールの範囲である。

のパワースペクトルは信号雑音比が16ではっきりと検出することができた。また理論モデルとも非常によくフィットし、高赤方偏移の銀河ほど重力レンズのシグナルが大きくなることも確かめられた。一方、BモードのパワースペクトルやEモー

ドとBモードの相関スペクトルは受かっておらず、系統誤差の心配もないことがわかった。

コズミックシアは、全エネルギーに対する物質の割合 Ω_m と宇宙の構造の凸凹度合いを表す σ_8 を組み合わせた $S_8 \equiv \sigma_8 (\Omega_m / 0.3)^\alpha$ ($\alpha \sim 0.5$) で定義さ

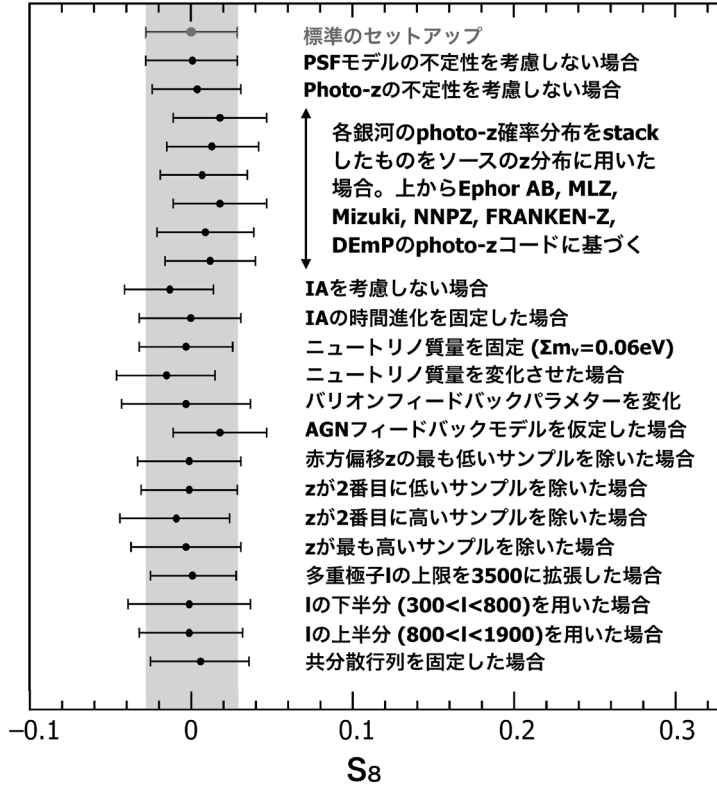


図2 S_8 のロバスト性を示した図. コズミックシアを用いた宇宙論解析に関わるさまざまな系統誤差が S_8 の統計誤差(網掛け部分)よりも有意でないことを示している. ブラインド解析中は, S_8 の中心値は伏せて解析を進めている.

れる物理量を高い精度で決定することができる。 S_8 は現在の宇宙の物質分布の構造の成長度合いを表す物理量である。標準的なセットアップのもとでHSCのコズミックシアパワースペクトルから測定した S_8 の結果が図2の最上部である。解析段階のブラインドでは、中心値は0にシフトしていることに注意したい。前章で述べたさまざまな系統誤差の影響が S_8 の測定値に大きな影響がないことを示した。例えばPSFモデル化の不定性を考慮しなかったり、測光的赤方偏移分布の推定方法を変えたり、IAのモデルを変えたり、ニュートリノ質量を変化させたり、AGNフィードバックのモデルを仮定するなどしても、 1σ の統計誤差の範囲に比べて有意な違いが出ないことを確かめた。またトモグラフィー解析に使うサンプルの一

つを外して解析した場合や、解析するスケールの範囲を変えても結果がほとんど変わらないことも確認した。

5. ついにアンブラインド

コズミックシアのパワースペクトルの解析を開始してから約2年をかけ、ついにアンブラインドすることになった。伏せていた宇宙論パラメータの中心値を明らかにし、定例のオンラインミーティングで共同研究者が見守るなか、ついにどのカタログが本物か明らかになったのである。

得られた結果が図3である。 S_8 の値を誤差3.6%と世界最高級の精度で測定することに成功した。まだ計画最終段階の11%のデータにも関わらず、これだけの高い精度を実現できたのは、すばる

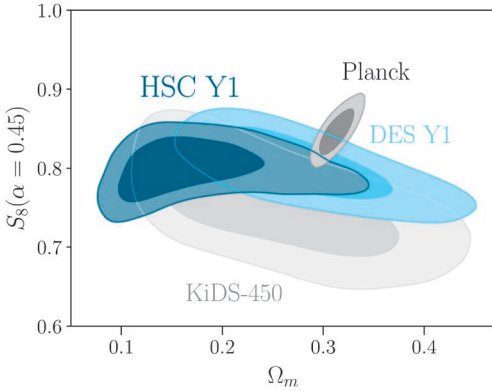


図3 S_8 と Ω_m 平面上での測定結果. 比較のためDES Y1, KiDS-450のコズミックシアとプランク衛星の宇宙背景放射観測 (CMBレンズの情報含まない) による測定結果を載せた.

HSCの撮像性能があつてこそである. またアンブラインド後に初めて他の観測結果とも比較した. 観測している天域が違うにも関わらず, DESやKiDSの観測結果と 1σ の誤差の範囲で一致していた. ダークマターのエネルギー密度 Ω_m の測定値が小さいのが気になる人もいるかと思われる. もともとコズミックシアの測定のみでは, Ω_m と σ_8 を独立に決定することが困難なため, Ω_m の測定誤差は非常に大きい. 実際, WMAP9の宇宙論に基づくHSCのモックカタログを使い, 観測と同じかそれ以下の小さな Ω_m が得られる確率を見積もったところ, 約4%になることが分かった. つまり珍しいことではあるが, 不自然なほど Ω_m が小さいわけではないのである.

プランク衛星のCMB観測に基づく結果との比較も行ったところ, プランクよりもHSCの S_8 の値が約 2σ 小さいことが分かった. つまり, HSCで測定した宇宙の構造形成の度合いが, プランクの予想に比べて進み具合が遅かったことを意味する. ベイズ統計に基づいて両観測が Λ CDM模型のもとで矛盾がないか調べたところ, HSCとプランクとの間にはっきりとした矛盾は見つからなかった. しかし, KiDSやDES同様, 3つの重力レンズ観測全てがプランクより S_8 の値が小さい

のは偶然と言えるだろうか? 3つの観測は違う天域を観測しており, また独立のグループが測定したものである. それらの結果がすべてプランクよりも小さいとすると, 偶然と捉えるのはもはや難しいかもしれない. さらにスニヤエフ・ゼルドビッチ (SZ) 効果で検出した銀河団の数の統計から推定される σ_8 と Ω_m の組み合わせもプランクより 3σ レベルの有意性で小さいことが指摘されており²⁰⁾, どうも構造形成の進み具合がプランクの予想に比べて遅いのである.

6. プランク衛星と重力レンズサーベイの食い違いは何を意味するのか?

HSCのコズミックシアの結果はHSC全計画の11%に基づくものである. すでにHSC計画の半分以上の観測が終了しており, 現状の数倍の統計精度の向上が期待できる. 現状の S_8 の値のままで, Planckとの食い違いを 5σ レベルではっきりさせるためには, 少なくとも1,100平方度程度のサーベイ領域は必要である. もちろんそれに伴って系統誤差の取扱いをさらに慎重に進めていかなくてはならない. 特に測光的赤方偏移の不定性については, 波長帯を増やし精度を上げるなどさらなる改善に努めなくてはならないであろう. そして今後観測データが増え, プランクとの食い違いが決定的になったとしたら, それは何を意味するのだろうか?

一つはダークエネルギーが宇宙項ではなく, 時間依存する可能性である. ダークエネルギーの割合が過去の宇宙で宇宙項よりも大きい, つまりダークエネルギーの状態方程式のパラメータ w が -1 よりも大きい場合には, 構造の成長が遅れ, 重力レンズの測定結果との矛盾はなくなる. なお弦理論の立場ではダークエネルギーが定数(宇宙項)である宇宙は不安定であり, w が -1 よりも大きいほうが自然であるとの予想が示されている²¹⁾. 今後, 重力レンズ観測とともにさまざまな観測を組み合わせ w の値を精密に測定する

ことは、弦理論の立場からも大変重要である。また、ニュートリノ質量がプランク衛星の結果から制限される値より大きい可能性も考えられる。高速で飛び回るニュートリノ質量が大きいほど、小スケールの構造がならされ、 S_8 が小さくなるからである。現在ニュートリノ振動の実験から、3世代のニュートリノ間の質量の差は高い精度で測られているものの、ニュートリノ質量の総和については強い制限が得られていない。コズミックシアの観測からは統計誤差は大きいもののニュートリノ質量の総和が0.4 eV程度と比較的大きな値であることを示唆している。今後の銀河クラスターリングの観測などからニュートリノ質量を決定することは、天文・素粒子物理の両面において非常に重要である。宇宙論的スケールでの一般相対論の重力法則が破れている可能性もある。一般相対論を修正した重力模型の中には、実質的な重力定数の値 G_{eff} が万有引力定数 G よりも小さくなるものがあり、大スケールの構造の形成速度が遅くなる。いずれにせよ、 Λ CDMモデルのもとでプランクと重力レンズの両観測を記述することができなければ、 Λ CDMモデルにはない新しい物理が必要であり、暗黒物質や暗黒エネルギーの謎の解明にもつながる。

本稿では、宇宙の構造の成長度合い S_8 について、プランク衛星による宇宙初期の観測結果とコズミックシアによる成長後の宇宙の観測との間の食い違いについて述べた。宇宙の膨張率についても、近傍のセファイド型星などを用いた近傍宇宙の観測で測られた現在の宇宙膨張率 $H_0=73.24\pm 1.74$ km/s/Mpc²²⁾と、プランク衛星による宇宙背景放射の観測から求められた H_0 の値 67.4 ± 0.5 km/s/Mpc²³⁾との間には 3.5σ の食い違いがある。 H_0 と S_8 の食い違いの関係性も大変興味深いテーマである。

コズミックシアだけでなく、銀河クラスターリングや宇宙マイクロ波背景放射やコズミックシアとの相互相関情報を含めることでさらに精密な S_8

の測定ができるようになるだろう。HSCとともにSuMIReプロジェクト(Subaru Measurements of Imaging and Redshifts)の一翼を担う超広視野分光計画PFS(Prime Focus Spectrograph)が、2021年の科学運用を目指し、順調に計画が進行している。PFSによって、かつてない広い赤方偏移範囲($0.6 < z < 2.4$)で宇宙の膨張と構造形成の時間進化を追うことができ、Planckとの食い違いについてよりはっきりしたことが言えるだろう。またPlanck, BOSS, HSC, PFSを全て組み合わせることでニュートリノ質量を0.02 eVの統計誤差で測定できると予想されており、プランクとの食い違いがダークエネルギーによるものなのか大質量ニュートリノによるものなのかを区別することもできるだろう。すばるHSC, PFSは将来行われるLSSTやEuclidの試金石であり長いスパンでも極めて意義のあるプロジェクトである。 Λ CDMに代わる宇宙模型が必要となるのか、ダークマター・ダークエネルギーの素性がついに明らかになるのか、今後の進展にぜひご注目していただきたい。

謝辞

本稿で述べた成果はさまざまな支援のもとでなし得たものです。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、弱重力レンズチーム、測光的赤方偏移チームのメンバーに感謝いたします。また本稿執筆を支援して頂きいつもお世話になっている高田昌広さん、また執筆の機会を与えてくださり貴重なコメントをしていただいた編集委員の岡部信広さんに感謝いたします。

参考文献

- 1) Spergel, D. N., et al., 2003, ApJS, 148, 175
- 2) Tegmark, M., et al., 2004, Phys. Rev. D, 69, 103501
- 3) Riess, A. G., et al., 1998, Astron. J., 116, 1009
- 4) Perlmutter, S., et al., 1999, ApJ, 517, 565
- 5) Alam, S., et al., 2017, MNRAS, 470, 2617
- 6) Wittman, D. M., et al., 2000, Nature, 405, 143
- 7) Bacon, D. J., et al., 2000, MNRAS, 318, 625

- 8) van Waerbeke, L. et al., 2000, *Astron. Astrophys.* 358, 30
- 9) 宮崎聡, 2019, *天文月報*, 112, 80
- 10) Aihara, H., et al., 2018, *PASJ*, 70, S8
- 11) 高田昌広, 2019, *天文月報*, 112, 89
- 12) 梅津敬一, 大栗真宗, 浜名崇, 日影千秋, 宮武広直, 2019, *天文月報*, 112, 117
- 13) Mandelbaum, R. et al., 2018, *PASJ*, 70, S25
- 14) Oguri, M. et al., 2018, *PASJ*, 70, S26
- 15) Hildebrandt, H. et al., 2017, *MNRAS*, 465, 1454
- 16) Troxel, M. A. et al., 2018, *Phys. Rev. D*, 98, 043528
- 17) Hikage, C. et al., 2019, *PASJ*, 71, 43
- 18) Hikage, C., et al., 2011, *MNRAS*, 412, 65
- 19) Takahashi, R., Hamana, T., Shirasaki, M., Namikawa, T., Nishimichi, T., Osato, K., Shiroshima, K., 2017, *ApJ*, 850, 24
- 20) Ade, P. A. R., et al., 2016, *A&A*, 594, A24
- 21) Obied, G., et al., 2018, *arXiv: 1806.08362*
- 22) Riess, A. G. et al., 2016, *ApJ*, 826, 56
- 23) Aghanim, N. et al., 2018, *arXiv: 1807.06209*

Is Λ CDM really true? Precision cosmology from cosmic shear analysis using Subaru Hyper Suprime-Cam

Chiaki HIKAGE

Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe, UTIAS, the University of Tokyo 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8583, Japan

Abstract: About 20 years have already passed since the Λ CDM standard cosmological model was established. Although Λ CDM well describes the observed history of cosmic expansion and the growth of matter structure, the major ingredients in the Universe, i.e., dark matter and dark energy, remain unknown. Subaru Hyper Suprime-Cam (HSC) galaxy imaging survey enables us to measure cosmic weak gravitational lensing effect, i.e., cosmic shear, with unprecedented accuracy to uncover the mystery of the dark components. This article presents the latest work on cosmic shear analysis using Subaru Hyper Suprime-Cam first-year data. I also review a notable tension of cosmological parameters between the Planck survey and cosmic shear surveys, which may indicate some hint for physics beyond Λ CDM.