

# HSC弱重力レンズ効果による天文学

梅津 敬一<sup>1</sup>・大栗 真宗<sup>2,3,4</sup>・浜名 崇<sup>5</sup>・  
日影 千秋<sup>4</sup>・宮武 広直<sup>6</sup>

〈<sup>1</sup>中央研究院天文及天文物理研究所, <sup>2</sup>東京大学大学院理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター, <sup>3</sup>東京大学大学院理学系研究科物理学専攻, <sup>4</sup>東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構, <sup>5</sup>国立天文台, <sup>6</sup>名古屋大学高等研究院〉  
e-mail<sup>5</sup>: hamana.tk@nao.ac.jp

弱重力レンズ効果は遠方銀河の像が手前の構造の重力によりほんの僅か歪められる現象である。この歪みの情報から手前の構造の重力場を介しその物質分布の測定が可能になり、直接的観測の困難な暗黒物質の分布を探る貴重な手段となっている。弱重力レンズ効果の解析には多くの遠方銀河の精密撮像が要求されるが、Hyper Suprime-Cam (HSC)はその大集光力、広視野および高精度撮像能力により、世界トップレベルの弱重力レンズ効果観測装置である。HSCサーベイの計画策定において弱重力レンズ効果を応用した宇宙論研究が最重要科学テーマの一つと位置づけられ、その解析に適したサーベイ仕様が採用された。本稿においてはまず初めにHSCサーベイにおける現在の弱重力レンズ解析のパイプラインとそれによって作られた弱重力レンズカタログについて紹介する。現在このカタログを用いて、銀河や銀河団あるいは大規模構造による弱重力レンズ効果を利用した研究が多数進行中である。そのうち初期成果について報告する。

## 1. はじめに

弱重力レンズ効果は暗黒物質の分布を直接的に探ることを可能にするので、銀河や銀河団、さらには大規模構造の研究に革新的な進展をもたらした。例えば従来は暗黒物質の分布は銀河の回転速度や銀河団の高温プラズマのX線温度といった観測情報に力学状態の仮定をおくことで推定されてきたが、弱重力レンズ効果を用いた暗黒物質分布の直接的な測定により、その仮定そのものを検証できるようになったのである。HSCサーベイデータを用いて行われた文献1や文献2の研究成果はこの代表的な例である(4章)。また、Cosmic Shear (Cosmic shear) と呼ばれる弱重力レンズ効果による銀河の歪みのパワースペクトルは宇宙の物質分布のパワースペクトルを探る強力な道具となっている。この方法は銀河分布を用いて

物質分布のパワースペクトルを推定する方法と違って銀河と物質分布の関係(いわゆる銀河バイアス)を仮定する必要がないという利点がある。文献3ではHSCサーベイデータからCosmic Shearパワースペクトルを測定し宇宙論パラメータに数パーセントの精度で制限を課すことに成功している(5章)。これら二つの例が示すように弱重力レンズ効果を応用した研究の対象は多様であるが、共通しているのは、暗黒物質分布を直接的に“見る”ことで従来課していた仮定なしで研究対象に迫ることが可能となっている点である。

HSCの先代のSuprime-Camは、すばる望遠鏡の大集光力とその広視野にわたる高精度撮像能力により、弱重力レンズ研究の進展において重要な役割を果たしてきた<sup>4)-6)</sup>。HSCはSuprime-Camの撮像能力を維持しつつその視野が7倍にも拡大されたため弱重力レンズ研究の効率を大いに高め

ることとなった<sup>7)</sup>。HSCの利点を最大限に活用すべく策案されたHSCサーベイは以下の点で弱重力レンズ研究に質的な変化をもたらそうとしている。これまでの弱重力レンズ研究は、数十個程度の既知の銀河団や多波長撮像観測が行われている数平方度程度の特定領域の観測に基づくものが主であった。これは共同利用観測の枠の中で獲得できる観測時間の制約による。ところがHSCサーベイでは最終的には1,400平方度にも及ぶ領域の多バンドデータが得られる。既知の天体や特定の領域ではない、一般の領域の弱重力レンズ効果が測定できるようになるのである。これにより、弱重力レンズ効果を用いて数百Mpcにもわたる暗黒物質の分布図が描けるようになったのである<sup>8)</sup> (3章)。またその中に暗黒物質の巨大な塊である銀河団を見つけ出すことが可能になった (本特集の銀河団記事参照)。従来の、既知の天体の暗黒物質分布を解析するというアプローチに加え、暗黒物質の分布から宇宙の構造を探索するという新たなアプローチが可能になったのである。

HSCサーベイの弱重力レンズ研究には弱重力レンズ解析に必要な個々の銀河の形状情報がカタログとして提供されているという特筆すべき点がある。すなわち、HSCサーベイデータベースには測光データのみならずサーベイ領域全体にわたる弱重力レンズ効果の情報も付加されているのである。これにより研究者はこれまでの弱重力レンズ研究で必須であった画像解析を行うことなく、カタログをダウンロードしたのち直ちに重力レンズ解析を始められるのである。HSCサーベイは弱重力レンズ研究をいわばデータベースサイエンスに変え、その参入の敷居をぐっと下げたのである。弱重力レンズカタログの作成は、文献9に詳しく記述されているが、次章において概要を解説する。

## 2. 弱重力レンズカタログの作成と較正

弱重力レンズ効果は銀河の形状の系統的な歪み

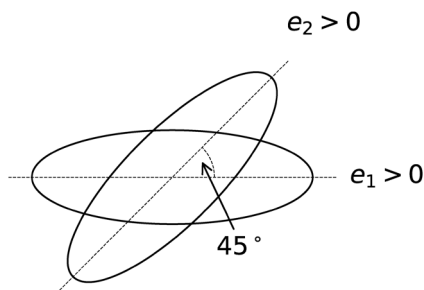


図1 弱重力レンズ効果の解析で用いられる楕円率の定義. 独立な2成分 ( $e_1, e_2$ ) は互いに45度回転した楕円を表す.

として観測される。例えば、銀河団や銀河はその周りの背景銀河の形状をレンズ天体を中心とする円周の接線方向に歪める。弱重力レンズ効果の歪みは楕円率で表され、それは図1に示すように、45度回転した2成分 ( $e_1, e_2$ ) で表される。楕円率は180度回転するともとの楕円に一致する。これは、弱重力レンズ場はスピン2の場であることを示している。この場合は二つの独立な成分をもつが、重力レンズ効果の情報は1成分のみである。2成分を適切に分解することにより、観測情報を重力レンズ情報をもつ成分もたない成分に分けることができ、後者は系統誤差の指標として用いることができる (3章)。

弱重力レンズ効果による歪みは、典型的に銀河固有の歪みの10分の1程度である。よって、個々の銀河の形状を測定するだけでは弱重力レンズ効果を測定することはできない。実際には、銀河固有の形状の向きはランダムであるという仮定の下で、測定された楕円率の平均や2点相関関数といった統計量を測定することで弱重力レンズ信号を取り出すという操作を行う。弱重力レンズ信号は非常に微弱な信号であるので、系統誤差を注意深く調べ上げ、それを十分小さく抑える必要がある。系統誤差の許容値の設定は任意であるが、HSCサーベイ第一期のデータ解析においては、主要研究課題の一つであるコスミックシアパワースペクトル (5章) と銀河-銀河重力レンズ (Mi-

yatake, H., et al., in prep.) の測定で予想される典型的な統計誤差を超えないことを条件とした。この条件を満たすよう、解析手法の改善、あるいは解析アルゴリズムの特性上取り除くことが難しい系統誤差に関しては擬似HSC画像を用いた補正を行った。以下では、弱重力レンズ形状測定で特に重要な、点拡がり関数 (Point Spread Function; PSF), 銀河の内部構造, およびフォトンノイズによる系統誤差の取り扱いについて紹介する。

望遠鏡で見る銀河像は大気揺らぎや光学系の収差により拡がり、歪む。これをPSFという。さらにCCD上でピクセル化されデータとして記録される。弱重力レンズ信号を精度よく測定するには、PSFを正確に決定・補正することが必要である。星は点源であると考えられるので、星像はPSFの応答関数である。HSCの解析パイプラインでは画像中の多数の星像からそれぞれPSFを計測し、それらの空間変動の関数 (PSFの内挿関数) を作り出す機能が備えられている<sup>\*1</sup>。この情報を用いることで、銀河の位置情報からその位置でのPSFを生成することができる。これを用いて各銀河についてPSFの影響を評価し補正する。私たちは、星像とその星の位置で生成されたPSFを比較することによって、PSFの内挿関数がPSFを正確に再現しているか検証し、また星と銀河の形状の相関関数を用いて、銀河像に対するPSF補正が正確に行えているか検証した。両者とも上記の条件を満足していることを確認した<sup>9)</sup>。

HSCサーベイの解析で用いた銀河形状測定アルゴリズムはre-Gaussianizationと呼ばれる、Sloan Digital Sky Survey (SDSS) で用いられた手法である<sup>10), 11)</sup>。Re-Gaussianizationをはじめとする銀河形状測定アルゴリズムの多くは銀河のプロファイルをガウス関数、指数関数やド・ボークルルール則で近似している。しかし、実際の銀河

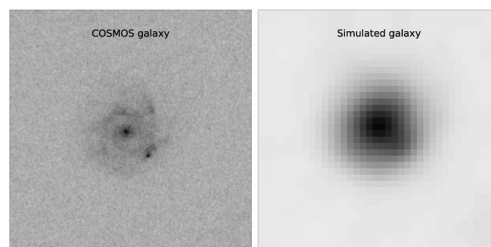


図2 銀河形状測定の較正に用いたシミュレーション画像の例。左はハッブル宇宙望遠鏡による高解像度の画像、右はそれに典型的な地上望遠鏡のPSFを畳み込んだもの (R. Mandelbaum氏提供)。

には内部構造が存在するので、これらの近似の下で楕円率が正確に測定できるとは限らない。また、CCDの各ピクセルにおけるフォトンノイズはポアソン分布に従うが、楕円率はピクセル値に対して線形ではないので、フォトンノイズによるバイアスが生じる。これらの系統誤差は形状測定アルゴリズムに内在するものであるため、別の手段でもってその系統誤差を評価し解析結果を補正する必要がある。このために、私たちは人工的に弱重力レンズ効果を加えた擬似HSC画像を作成し、それに対する形状測定アルゴリズムの応答を調べた<sup>12)</sup>。具体的には、ハッブル宇宙望遠鏡で観測された高解像度の銀河像に弱重力レンズ効果を加えた後、HSCのPSFを畳み込むことによって擬似HSC画像を作成した (図2)。弱重力レンズ信号の入力と出力を比べることによって、信号雑音比 (S/N比) とPSFに対する銀河の解像度の関数として、補正係数を導出した。この補正係数は典型的には銀河の楕円率の10%程度である。

HSCの弱重力レンズカタログには、銀河の形状に加えて、上に述べた補正係数など、弱重力レンズ解析に必要なものがすべて入っている。また、銀河の形状が十分信頼できる銀河のみ選択してある。主な選択基準は以下である (詳細は文献9を参照)。

<sup>\*1</sup> ピクセル内の電荷が増えることによってピクセルを定義するポテンシャルが歪み、星像が大きく観測される効果 (brighter-fatter効果という) は補正済みである。

- 1)  $i$ バンド画像における検出 $S/N$ 比が10以上
- 2)  $i$ バンド AB等級が24.5等よりも明るい
- 3) PSFに対する銀河の解像度の指標が0.3以上
- 4) 形状測定の誤差が0.4以下
- 5) 異なる銀河が重なって写っている可能性を表す指標が十分小さい
- 6) *grizy*すべてのバンドで、仕様の積分時間に達している

条件(6)を満足した領域は約140平方度であった。ユーザーは弱重力レンズカタログをそのまま使うことができる。具体的な弱重力レンズカタログの利用方法は、文献9の付録に記述されている。

弱重力レンズ形状測定に使われた $i$ バンドの観測はシーイングが良いときのみ行われたので、比較的小さい銀河の形状測定が可能である。さらに、すばる望遠鏡の大集光力によって、銀河数密度は約24.6個/平方分と現在米国主導で行われているDark Energy Survey<sup>13)</sup>(DES, 約6.4個/平方分)や欧州主導で行われているKilo-Degree Survey<sup>14)</sup>(KiDS, 約8.9個/平方分)と比べて圧倒的に大きく、測光的赤方偏移の中央値は $z \simeq 0.81$ とDES( $z \simeq 0.59$ )やKiDS( $z \simeq 0.53$ )と比べてより遠方の宇宙の暗黒物質分布の測定が可能である。読者の皆さんにはHSCサーベイ第一期の最大の成果の一つである本カタログをぜひ自身の研究に活用していただきたい。

### 3. 二次元, 三次元広域弱重力レンズ質量分布

前章で述べたように、弱重力レンズの観測量は銀河の形状の歪みである。一方われわれが知りたいのは暗黒物質を含めた物質の質量分布である。両者は重力ポテンシャルを介して互いに関連しているため、弱重力レンズの観測から質量分布に仮定をおくことなく再構築が可能である<sup>15)</sup>。

この質量分布測定は、作成した弱重力レンズカタログ(2章)の系統誤差の有無の確認において重要な役割を果たす。というのは、弱重力レンズによって引き起こされる銀河の形状の歪みのパターンは、質量の超過のまわりで円周に沿って歪むパターン(Eモード)である一方、自由度としてももう一つ渦を巻く歪みのパターン(Bモード)も存在するからである。基本的に重力レンズはEモードのみを生じるため<sup>\*2</sup>、大きなBモードがもし観測されればそれは銀河の形状測定の不定性などに起因する系統誤差のためだと考えられる。

まず、弱重力レンズカタログから銀河の赤方偏移の情報をつかうことなく質量分布を再構築した<sup>8)</sup>。弱重力レンズは歪みを受ける銀河とわれわれ観測者の間のすべての質量分布がその効果に寄与するため、再構築された質量分布は銀河と観測者の間の質量分布を重みをつけて積分した、いわば視線方向に射影した二次元質量分布である。実際の暗黒物質分布に対応するEモード質量分布に加えて、Bモード質量分布も作成し、Bモード分布がEモード分布に比べて十分小さく、したがって銀河の形状測定が問題なくできていることを確認した。また同じHSCサーベイで観測された銀河の星質量分布とも比較し、再構築された暗黒物質分布が銀河の星質量分布とおおむね良い相関を示すことも確認した。この質量分布の重要な応用として質量の情報から選択される銀河団サンプルの構築があるが、この応用については本特集の銀河団の研究をまとめた記事に譲ることにする。

弱重力レンズ解析では上で述べたように基本的には視線方向に射影した二次元質量分布が得られる。奥行き方向の情報も復元し三次元的な質量分布を弱重力レンズ解析から得ることはできるのだろうか? 答えはいエスである。視線方向に射影した二次元質量分布を異なる赤方偏移の銀河に対して測定し、その結果を組み合わせれば三次元的

\*2 これは重力ポテンシャルがスカラーポテンシャルであることに起因する。

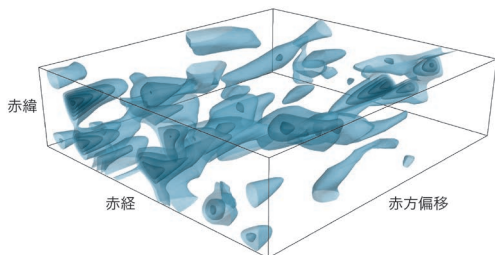


図3 HSCサーベイ初年度データの一部，VVDS領域の三次元重力レンズ質量分布．約20平方度の領域に対して奥行きは赤方偏移およそ1まで再構築した質量分布を示している．文献8の図を改変．

な質量分布が再構築できる<sup>16)</sup>．弱重力レンズカタログに収められている遠方銀河すべてについて分光して赤方偏移を測るのは不可能なので，実際には測光的赤方偏移を使う．

図3に再構築した三次元質量（暗黒物質）分布を示す．二次元の場合と同様に，HSCサーベイで観測された三次元の銀河の星質量分布と比較し，三次元質量分布の再構築ができていることを確認した．三次元質量分布の再構築は十分な数密度の銀河を用いた弱重力レンズ解析が必須であり，そのためこれまでではごく狭い天域での解析に限られていた<sup>17)</sup>．広さと深さを兼ね備えたHSCサーベイの解析によって，これまでよりも大幅に広い天域で三次元質量分布の再構築が可能になったが，これはHSCサーベイの威力を如実に示す好例の一つである．

#### 4. プランクSZ効果銀河団の弱重力レンズ質量測定

銀河団は典型的な質量が $10^{14}$ 倍太陽質量，最大のものでは $10^{15}$ 倍太陽質量を超える宇宙で最大の自己重力系である．その質量関数（質量の関数としての個数密度）は宇宙の密度パラメータ（ $\Omega_m$ ）と密度揺らぎの振幅パラメータ（ $\sigma_8$ ）に敏感であるため，これらを定める強力な手段となっている<sup>18), 19)</sup>．その一方，質量関数は銀河団質量に対

し指数関数的に依存するため，銀河団質量の正確な決定が非常に重要となっている．

従来の銀河団サンプルは可視光やX線の観測データをもとに作られていたが，近年ではSunyaev-Zel'dovich (SZ) 効果を用いたサンプルが作られている<sup>20)</sup>．SZ効果は，銀河団内の高温電離電子が宇宙背景放射（CMB）の低エネルギー光子と逆コンプトン散乱をすることで，CMBのスペクトルを変形させる現象である．CMBマップ中から銀河団SZ効果に特徴的なシグナルを見いだすことで銀河団を検出するが，この検出効率をよく理解されており宇宙論研究に適したサンプルである．

プランクミッションはそのCMB全天サーベイデータから1,000個を超えるSZ銀河団を検出した<sup>21), 22)</sup>．しかし，その銀河団計測により得られた $\sigma_8$ の制限値は，プランクのCMBのパワースペクトルから得られたそれ<sup>23)</sup>と無視できないレベルで異なっていた．この違いの原因については，銀河団物理，素粒子物理，はたまた観測装置の影響とさまざまな観点からの検討が盛んになされている<sup>24)-26)</sup>．

ここで注意すべきはSZ銀河団の質量推定法である．プランクチームは，SZシグナルと銀河団質量の経験的スケールリング則を使い，SZシグナルから銀河団質量を求めた．このスケールリング則の決定には，X線衛星XMM-Newtonの観測データから静水圧平衡を仮定して推定された銀河団質量が使われている．しかし，この方法は銀河団ガスが静水圧平衡にあるという仮定による不定性を伴っている．この不定性を定量化する指標として，経験的に求められたSZ銀河団質量（ $M_{\text{Planck}}$ ）と真の値（ $M_{\text{true}}$ ）の間に一定の比を仮定した関係

$$1 - b_{\text{SZ}} = M_{\text{Planck}} / M_{\text{true}}, \quad (1)$$

が用いられている．プランクチームは，その初期成果報告では $b_{\text{SZ}} \sim 0.2$ を採用している<sup>21)</sup>．これは，銀河団の数値シミュレーションの結果から期待さ

れる値 (0.1–0.15)<sup>27),28)</sup> と同程度である。一方、上記のプランク SZ 銀河団計測から得られる  $\sigma_8$  がプランク CMB のそれと一致するためには、 $b_{SZ}=0.42\pm 0.04$  でなければならない<sup>21),29)</sup>。これは、上記の  $b_{SZ}\sim 0.2$  とはおおよそ  $2\sigma$  の違いがある。

弱い重力レンズ現象を利用することで銀河団の質量を直接的にかつ力学状態の仮定を課すことなく求めることができるので、SZ 銀河団の質量推定を検証する有力な手段となっている。しかしながら、これを目的とした研究の最近の結果は混沌としている。 $b_{SZ}=0.3\text{--}0.4$  を得るものもあれば<sup>30)–32)</sup>、 $b_{SZ}=0.1\text{--}0.2$  を得るものもある<sup>33)</sup>。ただし、これらの研究ではそれぞれ十数個のプランク SZ 銀河団を解析しているが、サンプルの重複は少なく、典型的な質量や赤方偏移が異なるため、 $b_{SZ}$  の違いが弱重力レンズ解析の系統誤差に由来するのか、サンプルの違いに由来するのか定かではない。

さて、いよいよ HSC サーベイの出番である。第一期弱重力レンズカタログでカバーされている 140 平方度の領域には 5 個のプランク SZ 銀河団がある。文献 1 では、これら銀河団の弱レンズ解析を行いその質量を求め  $b_{SZ}=0.2\pm 0.14$  という結果を得た。ここで解析した銀河団は先行研究のターゲットに比べ比較的低質量であるため、先行研究で得られた比較的大きなバイアス値 ( $b_{SZ}=0.3\text{--}0.4$ ) と矛盾するとは結論づけられない。また、プランク SZ 銀河団計測と CMB それぞれから求めた  $\sigma_8$  の食い違いを解決する  $b_{SZ}=0.42\pm 0.04$  とも統計的に有意な食い違いがあるとは言えない。

そういうわけで、謎は未解決のままである。SZ 質量の精密な検証には、はるかに多くのサンプルが必要であることは言うまでもない。HSC サーベイが完了した際には、現在の 10 倍のおおよそ 50 個のサンプルが得られる。 $b_{SZ}$  に対するエラーが統計誤差リミットであるとすれば、その決定精度は現在の 10% から 3% 程度まで改善される。実はこれは、現在の弱重力レンズ解析による

銀河団の質量決定精度の系統誤差の典型的な値である約 10% より小さい<sup>1),2)</sup>。したがって、重力レンズ解析の系統誤差を現在よりもより厳密にコントロールする必要がある<sup>34)</sup>。統計誤差リミットの決定精度が達成されれば、 $S/N$  比  $\sim 50$  の精度で  $b_{SZ}$  を制限することができ、プランク SZ 銀河団計測による  $\sigma_8$  の制限を現在の 10% 精度からより良いものへ更新することができるであろう。また、 $b_{SZ}$  の銀河団質量や赤方偏移への依存性を調べるのが可能になり銀河団の進化への知見が得られると期待される。

## 5. コスミックシアパワースペクトルによる宇宙論パラメータ推定

宇宙大規模構造による重力レンズ効果によって、遠方銀河の見かけの形が系統的にゆがむ現象を「コスミックシア」と呼ぶ。コスミックシアによる銀河の楕円率の変化は 1% 程度と非常に小さいが、たくさんの銀河を使い、天球面上での系統的なゆがみを相関関数やパワースペクトルなどの統計量を使って測ることで、宇宙の質量分布の統計情報を引き出すことができる。コスミックシアの特長は、暗黒物質を含む宇宙の質量分布そのものを直接調べることができる点にある。銀河分布を用いた宇宙論解析で問題となる銀河分布と質量分布の間にある「銀河バイアス」の不定性がなく、コスミックシアは宇宙の質量密度揺らぎのクリーンな指標と言える。コスミックシアで得られる情報は、3次元質量分布をレンズ効率の重みを付けて視線方向に射影した2次元の平面情報である。このレンズ効率は銀河の赤方偏移分布によって決まるのだが、銀河サンプルを測光赤方偏移によって分割し、レンズ効率の異なるサブサンプルに分けて解析することで、宇宙構造の時間成長の情報を引き出すことができる。これはトモグラフィック（断層）解析と呼ばれるもので、宇宙項  $\Lambda$  および冷たい暗黒物質 (cold dark matter; CDM) と一般相対論に基づく標準的「 $\Lambda$ CDM」宇宙モ

デルの検証やダークエネルギーのパラメータを測定するうえで重要となる。

コスミックシアの大きさは、 $\Omega_m$ と $\sigma_8$ の宇宙論パラメータに強く依存する。特に両パラメータを組み合わせた $S_8 = \sigma_8 (\Omega_m/0.3)^\alpha$  ( $\alpha$ は0.5程度)の大きさに非常に敏感で、かつ他の宇宙論パラメータや系統誤差の影響も受けにくいいため、宇宙論解析の強力な手法の一つである。DESやKiDSによるコスミックシアの初期成果では、 $\Lambda$ CDMモデルのもとで $S_8$ の値が3-5%の精度で求められている<sup>35),36)</sup>。ところが、DESやKiDS、さらに以前の「Canada-France-Hawaii Telescope Lens Survey (CFHTLenS)」のコスミックシア解析で得られた $S_8$ の値はどれも、プランク衛星による宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の温度・偏光揺らぎから推定された値<sup>23)</sup>に比べて2-3 $\sigma$ 程度の統計精度で低い値となっている。この食い違いは系統誤差の取り扱いが不十分である可能性もあるし、矛盾があると断定するには統計精度が不十分である。しかし今後観測・解析の両面で精度が上がり、食い違いが決定的なものとなれば、 $\Lambda$ CDMモデルに代わる新たな宇宙モデルが必要となり、現代宇宙論への影響は極めて大きい。

2章で述べたように、HSCサーベイは、DESやKiDSに比べてより暗い遠方の銀河までコスミックシアの測定に利用することができる。銀河の数密度が増えるほどコスミックシアのS/N比が上がるため、HSCサーベイによるコスミックシアの解析は世界的にもたいへん注目を集めている。ただ統計精度が上がるにつれて、系統誤差の影響をより一層慎重に評価しなくてはならない。コスミックシアの系統誤差の要因として、測定量と理論モデルに関する不定性が考えられている。前者には、PSF補正の不十分さなどによる銀河形状測定の系統誤差や、測光的赤方偏移分布の系統誤差などがある。このうち銀河形状測定に由来する系統誤差については2章で述べたとおり統計誤差より小さくなっていることが確認されている。後者

には、宇宙大規模構造の潮汐作用で銀河の形がもともと相関をもつ「Intrinsic alignment; IA」効果がある。特に、明るく赤い銀河ではIA効果が実際に検出されており、コスミックシアの解析ではIAの影響を差し引く必要がある。またメガパーセクスケール以下の小スケールの質量密度揺らぎは、星形成やガス冷却、超新星や活動銀河核によるフィードバックなどバリオン物理の影響を受けることが理論的に示唆されている。最先端の宇宙論的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を正確に予測することは困難であり、バリオン物理の影響が無視できるスケール範囲に限定した解析をしなくてはならない。

さまざまな系統誤差による不定性がある中で宇宙モデルの僅かな綻びを調べるにあたって、我々はブラインド (目隠し) での宇宙論解析を行った。具体的には、真のカタログとは別に、偽の銀河形状の補正值を含めたカタログを2つ別に用意する。真のカタログがどれかを明らかにせず、さらに求めたパラメータ制限域の中心値も隠すことで先行研究の結果との比較はしないで最後まで解析を行うのだ。そして、目隠しを外した後 (アンブラインド) は、結果の変更や追加の解析はできない。ブラインド解析は先行研究による先入観を避けるうえで非常に重要であり、結果の信頼性を大きく高めるものとなる。しかし、アンブラインド後の修正が許されないため、慎重に慎重を重ねて解析を進めなくてはならない。われわれは、本当の結果を知ることなしに、1年間以上に及びさまざまな系統誤差のテストを行ってきた。

図4は、測光赤方偏移が0.3から1.5の範囲にあるHSC弱重力レンズカタログの銀河サンプルを四つのトモグラフィックビンに分けてコスミックシアを測定した結果を示したものである。相互相関を含めたコスミックシア全体のS/N比は約16に達しており、十分な統計精度でコスミックシアは検出されている。 $\Lambda$ CDMに基づく理論モデルとのフィットも良く、系統誤差によって生じる

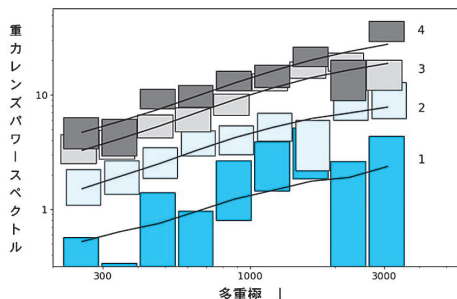


図4 HSCの第一期弱重力レンズカタログのコスミックシアパワースペクトルの測定結果. 測光赤方偏移が0.3から1.5の銀河を赤方偏移範囲を均等にして四つのトモグラフィックビンに分けたもので、番号が大きいほど高赤方偏移のビンを表す. 実線は、理論モデルのベストフィットである.

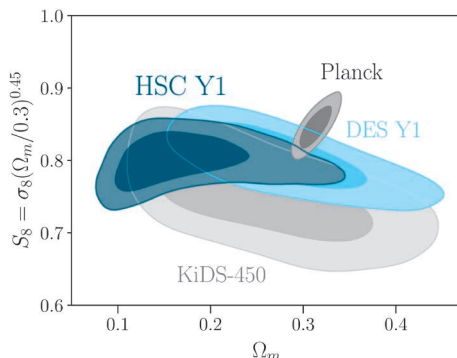


図5 HSCの第一期データのコスミックシア解析から得られた  $(\Omega_m, S_8)$  平面上での制限図 (68, 95%の信頼区間)<sup>3)</sup>. 参考のため、DES<sup>35)</sup>, KiDS<sup>36)</sup>の先行結果とプランクCMB<sup>23)</sup>の結果も掲載した.

Bモードのシグナルも検出されていない. 上記で述べたさまざまな系統誤差が $S_8$ 値におよぼす影響も、現カタログの統計誤差と比較して有意でないことも確かめた. 図5は  $(\Omega_m, S_8)$  平面での測定結果である<sup>3)</sup>.  $S_8$ の測定値は $0.800^{+0.029}_{-0.028}$  ( $\alpha=0.45$ の場合)であり、相対誤差は $0.029/0.8 \approx 0.036$ , すなわち3.6%というこの手法では世界最高級の精度で $S_8$ の値を決定することができた. 本結果は、DESやKiDSの先行結果と統計誤差の範囲で一致しており、プランク衛星による宇宙背景放射



図6 HSC弱重力レンズワーキンググループの集合写真. 2018年5月プリンストンにて.

の結果との矛盾も見られなかった. しかし、統計的有意性は不十分であるものの、今回得られた $S_8$ の値は、DESやKiDSと同様、プランクより $2\sigma$ 程度小さい値であった. これは、 $\Lambda$ CDMモデルには含まれていない宇宙の構造形成を抑制する何らかの機構 (例えばダークエネルギーの時間進化など) が働いているのかもしれない. 本解析で用いたHSCの第一期カタログは全計画の11%程度の領域であり、最終的には現在の数倍の統計精度の向上が期待できる. その頃には、低赤方偏移の重力レンズサーベイと高赤方偏移のプランク衛星の間に見られる $S_8$ 値の食い違いが有意なものか明らかになるであろう.  $\Lambda$ CDMモデルを超える新たな宇宙モデルが必要となるのか、それとも、かつてない精度で $\Lambda$ CDMモデルの検証が行えるのか、今後の展開にぜひ注目していただきたい.

## 謝辞

本稿で紹介した成果は多くの方々のサポートなしではなしえませんでした. HSCという素晴らしい装置を完成させたHSC開発チーム、特にPI宮崎聡氏に感謝します. すばる望遠鏡の安定運用を支えている国立天文台ハワイ観測所スタッフに感謝します. 高品質のデータ提供を実現させたHSC-SSPデータ解析ソフトチームおよびデータベースチームに感謝します. 数多くの助言をいた



いただいたHSC弱重力レンズワーキンググループメンバーに感謝します(図6)。最後にHSCサーベイを実現させたHSC戦略枠プログラムメンバー全員に感謝します。

### 参考文献

- 1) Medezinski, E., et al., 2018a, PASJ, 70, S28
- 2) Miyatake, H., et al., 2018a, ApJ, submitted (arXiv:1804.05873)
- 3) Hikage, C., et al., 2018, PASJ, submitted (arXiv:1809.09148)
- 4) Umetsu, K., et al., 2014, ApJ, 795, 163
- 5) Okabe, N., & Smith, G. P., 2016, MNRAS, 461, 3794
- 6) 岡部信広, 2018, 天文月報, 111, 18
- 7) Miyazaki, S., et al., 2015, ApJ, 807, 22
- 8) Oguri, M., et al., 2018, PASJ, 70, S26
- 9) Mandelbaum, R., et al., 2018, PASJ, 70, S25
- 10) Hirata, C., & Seljak, U., 2003, MNRAS, 343, 459
- 11) Mandelbaum, R., et al., 2005, MNRAS, 361, 1287
- 12) Mandelbaum, R., et al., 2018, MNRAS, 481, 3170
- 13) Zuntz, J., et al., 2018, MNRAS, 481, 1149
- 14) Kuijken, K., et al., 2015, MNRAS, 454, 3500
- 15) Kaiser, N., & Squires, G., 1993, ApJ, 404, 441
- 16) Hu, W., & Keeton, C. R., 2003, PRD, 66, 063506
- 17) Massey, R., et al., 2007, Nature, 445, 286
- 18) Bahcall, N. A., & Fan, X., 1998, ApJ, 504, 1
- 19) Voit, G. M., 2005, Rev. Modern Phys., 77, 207
- 20) Umetsu, K., 2003, Astronomical Herald, 96, 7, 374
- 21) Planck Collaboration, et al., 2014, A&A, 571, A29
- 22) Planck Collaboration, et al., 2016c, A&A, 594, A27
- 23) Planck Collaboration, et al., 2016a, A&A 594, A13
- 24) Mahdavi, A., et al., 2013, ApJ, 767, 116
- 25) Donahue, M., et al., 2014, ApJ, 794, 136
- 26) Rozo, E., et al., 2014, MNRAS, 438, 49
- 27) Nagai, D., et al., 2007, ApJ, 655, 98
- 28) Rasia, E., et al., 2012, New Journal of Physics, 14, 055018
- 29) Planck Collaboration, et al., 2016b, A&A, 594, A24
- 30) von der Linden, A., et al., 2014, MNRAS, 443, 1973
- 31) Hoekstra, H., et al., 2015, MNRAS, 449, 685
- 32) Penna-Lima, M., et al., 2017, A&A, 604, A89
- 33) Smith, G. P., et al., 2016, MNRAS, 456, L74
- 34) Medezinski, E., et al., 2018b, PASJ, 70, S30
- 35) Troxel, M. A., et al., 2018, PRD, 98, 043528
- 36) Hildebrandt, H., et al., 2017, MNRAS, 465, 1454

### Astronomical Sciences with Weak Lensing Data from HSC Survey

K. UMETSU<sup>1</sup>, M. OGURI<sup>2,3,4</sup>, T. HAMANA<sup>5</sup>,  
C. HIKAGE<sup>4</sup> and H. MIYATAKE<sup>6</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Astronomy and Astrophysics, Academia Sinica (ASIAA),*

<sup>2</sup>*Research Center for the Early Universe, The University of Tokyo,*

<sup>3</sup>*Department of Physics, The University of Tokyo,*

<sup>4</sup>*Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (Kavli IPMU, WPI), The University of Tokyo,*

<sup>5</sup>*National Astronomical Observatory of Japan,*

<sup>6</sup>*Institute of Advanced Research, Nagoya University*

Abstract: Weak gravitational lensing is a phenomenon that a light ray path from a distant galaxy is deflected by action of the gravity of foreground structures, and its image is deformed very tiny. Measurement of the lensing deformation enable us to estimate, in other words "to see," unseen dark matter distribution of lensing structure via its gravitational potential field. Weak lensing is now considered as a useful tool to explore the dark matter distribution of the universe. Since an analysis of weak lensing effects requires a precise imaging of a large number of distant galaxies, Hyper Suprime-Cam is the world top-level instrument for observation of weak lensing phenomena thanks to its great light gathering power, and precise imaging over a wide field-of-view. The cosmology using weak lensing effects was regarded as one of the most important science cases in HSC-SSP survey, and its survey design was optimized for it. In this article, we first introduce the current pipeline of HSC-SSP weak lensing shape measurement, and its product, the weak lensing shape catalog. Many studies using the catalog are underway. Some initial results published in PASJ HSC-survey special issue are presented.