

氏 名 内海 洋輔

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 1477 号

学位授与の日付 平成 24 年 3 月 23 日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学専攻  
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 Testing  $\Lambda$  Cold Dark Matter Paradigm with Weak  
Lensing

論文審査委員 主 査 准教授 兒玉 忠恭  
教授 家 正則  
准教授 柏川 伸成  
准教授 嶋作 一大 東京大学  
准教授 服部 誠 東北大学

The abundance of clusters of galaxies and its evolution is supposed to be one of the most powerful probes of dark energy. Weak lensing is expected to provide the most straightforward way to collect cluster samples, although the practical application used to be challenging, in particular, in reducing systematic errors. So far, several results from the cluster survey using weak lensing have been published. They have confirmed some of lensing peaks as true clusters by comparing with other X-ray observations and optical observations, but there might be a large amount of contamination by spurious peaks (20-50%). This ambiguity is not allowed because the current goal of precision in measuring cosmological parameters is a level of only a few percent. It is critical to understand the origin of such failures and reduce them.

First of all, we develop a way to quantify the systematic error by using the B-mode signal, since B-mode signal must not be generated by lensing, and it can be used as a measure of the systematic error. Several recipes to reduce the B-mode signal are worked out and evaluated. Then, we found the following two procedures are efficient to suppress the B-mode: (1) refinement of the mosaic CCD warping procedure and (2) the truncation of the outer edge of the smoothing procedure. As a result, the original systematic error is reduced to one fifth.

Because the systematic error on our lensing mass map comes down to a reasonably low level, we can more reliably evaluate a probability to obtain a spurious peak by assuming the statistical error alone. According to the maximum peak signal-to-noise ratio (S/N) distribution on the smoothed noise map, we find that it is possible to achieve a 99% spurious-free catalog when we adopt 4.56 as a detection threshold of the peaks on the S/N map with a smoothing length of 1.5 arcmin.

To verify our expectations, we examine two separated fields: GTO (2 deg<sup>2</sup>) and DLS (1deg<sup>2</sup>). We identify 4 peaks and 3 peaks above the threshold as reliable peaks on GTO and on DLS, respectively. To confirm whether these peaks have corresponding structures, we compare them with two independent observational probes of clusters: the red-sequence on color-magnitude diagram which is a well known feature characteristic to galaxy clusters, and the velocity dispersion obtained by intensive spectroscopic observations. We confirm that all of our reliable lensing peaks have counter-parts of clusters, except for a superposition of less massive groups along the line of sight.

We conclude therefore that we are successful in constructing a reliable weak lensing peak catalog from the imaging observation data alone by monitoring the systematic errors. Based on this reliable catalog, we demonstrate and test the currently favored cosmological paradigm. First, since a ray tracing calculation on the halo catalogs generated by N-body simulation predicts how many peaks will be detected on kappa map, we are able to compare the numbers of peaks as a function of S/N. We find that the observation and the model are in good agreement within error-bars on the peak number counts. Next, we inspect each peak to see whether it is a cluster or not with the redshift distribution and/or the color-magnitude relation. The resulting cluster catalog enables us to know the redshift dependency of cluster abundances. Analytically, it is expected that there is a large discrepancy at low redshift ( $z \sim 0.2$ ) in cluster abundance depending on the adopted cosmology,  $\Lambda$ CDM or SCDM. We find that they are in a reasonable agreement with the  $\Lambda$ CDM based N-body simulation and the theoretical expectation, and also that the value of the distant bin ( $0.6 < z < 0.9$ ) maybe slightly exceeding but still within the cosmic variation in the redshift dependency of cluster abundance. Finally, we try to construct the cluster mass function which shows the number density of clusters as a function of cluster mass. Due to serendipitously found high redshift clusters, our cumulative mass function is enhanced at the entire mass range. But it is acceptable if the cosmic variance is taken into consideration in the cluster mass function. As a result, quantities derived from our weak lensing analysis do not violate any predictions from the standard  $\Lambda$ CDM model.

Since our current data is limited, it is hard to constrain the cosmological parameters tightly due to statistical errors. However, we are now building a new wide-field camera, Hyper Suprime-Cam (HSC), on Subaru which will provide us with sharp images over thousand square degrees of the sky in multi pass-bands. By applying the new techniques in the image reduction procedure and the weak lensing analysis procedure, which are developed in this thesis, we will be able to make robust measurements of the cosmological parameters in the near future.

銀河団のような重い天体があると、その背景にある銀河からやってくる光がその重力によって光路が曲げられ、銀河の形が歪められることを一般的に重力レンズ効果というが、そのうち広い範囲に比較的弱く影響し、多くの背景銀河の形を統計的に楕円状に歪める効果を、弱い重力レンズ効果とよぶ。この効果を受けた画像から逆問題を解いて質量分布を求める手法は、宇宙に存在する銀河団を、銀河団の力学的状態や銀河の進化段階などによらず、無バイアスに質量の塊として検出できる優れた方法である。従って、この方式で見つけた銀河団の数統計解析を行なうことによって、宇宙の大規模構造形成を左右する宇宙論的パラメータ、特にダークエネルギーの状態方程式にも制限を与えることができると期待される。しかし観測によって得られる画像には、装置光学系による歪みや、大気差、画像の足し合わせなどに起因する天体の形の人工的な歪みが複雑に重なっており、銀河団の誤検出を生むことがある。従って、このような系統誤差による不定性を如何に小さく抑え込めるかが、弱重力レンズ解析によって精密な宇宙論を議論する上で最も大きな課題となっている。

このような背景の中、出願者は本論文で、観測データ処理および弱重力レンズ解析に独自の工夫を加えることによって、系統誤差を大幅に軽減し、かつ誤差を正確に見積もることに成功し、それを正しく考慮し、高い確度で銀河団を検出する方法を確立した。そして実際にすばる望遠鏡で取得した広視野撮像データに弱重力レンズ解析を適用することによって、3平方度の領域に7つの銀河団を同定した。このサンプルについて、N体シミュレーションから予測される検出期待個数と比較した結果、ピーク統計 (S/N の関数としての検出個数)、赤方偏移分布、質量関数の全てにおいて、現在の標準宇宙モデルである WMAP 衛星の結果で較正された  $\Lambda$ CDM モデルと整合的な結果を得た。そして、将来すばる望遠鏡の Hyper Suprime-Cam によって 1000 平方度レベルの探査を行なった場合には、ダークエネルギーの状態方程式のパラメータ  $w$  を現状の2倍程度良い 7%の精度で決めることができる可能性を示唆した。

本論文は8章からなっており、3章で新しく開発した画像処理方法が詳しく述べられ、天体の位置合わせの精度を高めることによって系統誤差を大幅に軽減できることが述べられる。続く4章では、それを適用することで、Bモードという重力レンズでは起こり得ない画像の歪み成分の混入を軽減できることを示し、その上で誤検出の恐れのない銀河団抽出法を考案したことが述べられる。5章では実際の観測データに見つかった銀河団が、分光データによる銀河の赤方偏移分布の集中や、色等級図上での銀河系列の密度超過などの独立な手法でも確認されたことが述べられる。そして6章では、この銀河団サンプルを、標準的な宇宙論モデルから予測される期待個数などと比較して整合的であることが述べられる。7章では、出願者自身が大きく貢献してすばる望遠鏡に開発中である、次世代超広視野カメラ Hyper Suprime-Cam による大規模探査によって、弱重力レンズ効果による銀河団の数統計から宇宙論、特にダークエネルギーのパラメータにどこまで制限を与えられるかが見積られる。

このように本論文は、次世代の精密宇宙論の時代を見据え、それに耐えるように、弱い重力レンズ効果の解析手法を独自のアイデアで改善し、系統誤差を減らすことに成功し、

さらに実際の観測データに基づいて先駆的な解析を行なったものであり、その意義と将来への発展性を大いに認めるものである。また、観測データの解析、結果の取りまとめ、議論など、論文作成の一連の過程において、出願者が主体的に研究を行っていることが認められる。これにより審査委員会は、全員一致で本論文が博士論文として十分な価値を有していることを認め、合格であると判断した。