

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 19 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800103

研究課題名(和文)弱重力レンズ宇宙論研究のための高精度画像処理法の開発と応用

研究課題名(英文)Development and application of imaging analysis technique for weak lensing study

研究代表者

内海 洋輔 (Utsumi, Yousuke)

広島大学・宇宙科学センター・特任助教

研究者番号：40700018

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題ではすばる望遠鏡用超広視野カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) で得られた撮像データに対して、弱重力レンズ解析を適用し、宇宙の物質分布を明らかにすることで宇宙論への応用の道を切り拓くものである。
得られた宇宙の物質分布の評価を行うことで、画像解析方法の妥当性を検討し改良を行なった。評価された物質分布は独立に得られた銀河分布と比較することで妥当性を確認した。その結果、宇宙の歴史において星形成銀河がどのように進化して来たか知見を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：We apply weak lensing analysis on the imaging data obtained with Subaru / Hyper Suprime-Cam (HSC), to reveal the matter distribution in the universe.
By evaluating the derived matter distribution, we examined the validity of the image analysis technique and made improvements. We also check the validity of the map with the independently obtained 3D galaxy distribution. As a result, we presented the downsizing evolution picture of star-forming galaxy established from other independent studies.

研究分野：観測的宇宙論

キーワード：観測的宇宙論 弱重力レンズ銀河団探査 すばる望遠鏡 画像処理

1. 研究開始当初の背景

宇宙の主要な質量要素はダークマターである。私達は数パーセントのバリオンを頼りにダークマターで支配された宇宙モデルの検証を行って来た。一般相対論から予言される重力レンズ現象を使えば、ダークマター分布の直接観測可能にし、質量光度比の不定性を取り除いた研究が可能になる。

2014年よりすばる望遠鏡は次世代超広視野撮像装置 Hyper Suprime-Cam (HSC) による大規模な撮像探査を実施している。撮像探査により得られるデータは弱い重力レンズを使った宇宙モデルの検証を可能とする。しかし、精密化に伴い、現時点では統計誤差よりも系統誤差が問題となっている。本研究は弱重力レンズ解析法に潜む、系統誤差除去を目指し画像処理手法の確立と検証を行い、応用するものである。

2. 研究の目的

HSCで撮像した生データを、通常の測光観測よりもデータに対する要求が厳しい弱重力レンズ解析に着目して、解析する手法を研究し、確立する。特に CCD チップをどのように配置し、どのような評価すれば良いかに重点を置いて研究する。そして弱重力レンズ解析を適用し、系統誤差が最小化出来ていることを確認し、得られた重力レンズによる質量分布図中に見つかるピークを外部観測と比較することで検証する。本研究により銀河団カタログが得られるので、これをもとに銀河団質量関数や質量光度比を測定して将来の大型撮像探査、特に弱重力レンズ解析による精密な物理量測定の実現への道を切り拓く。

3. 研究の方法

まず本研究の要である「HSCによるデータ取得」を確実にすることに注力した。2014年も引き続き国立天文台ハワイ観測所に赴き、試験観測を始めとする観測を実行し、不具合の把握、および修正作業を行なった。HSCのフィルター交換機構やシャッター部分、内部システムの通信にいくつか問題が見られたが、問題点を明らかにし、対策を行うことで安定的に運用が行える体制を整えた(内海2014 [12])。

試験観測中に得たデータを使い、開発中のパイプラインを使ってデータ解析を実施した。HSCは焦点面を104枚のCCDイメージングセンサーで覆う。配置されたCCD画像を一枚の写真にするためには、CCDの相対位置関係(モザイク規則)を決める必要がある。このモザイク規則の決め方が悪いと重力レンズ信号の信号強度比を損し、系統誤差を混入する(Utsumi et al. 2014 [11])。これを防ぐために、適切なパラメーターを探る試験を繰り返し、開発者に対してフィードバックを行なった。その結果、視野が大きくなり歪曲収差が大きくなって、視野の中心と外側とで

は伸びが大きく違うHSC画像においても良好な重力レンズ質量分布図を作成できることを確認した。

4. 研究成果

HSCで得た撮像画像に対し、弱重力レンズ解析を適用することで質量分布図を得て、その質量分布図から銀河団を検出した。この銀河団サンプルを銀河の二次元分布と色から検出した銀河団カタログと比べ相互に対応していることを確認することができた(Miyazaki et al. 2015)。

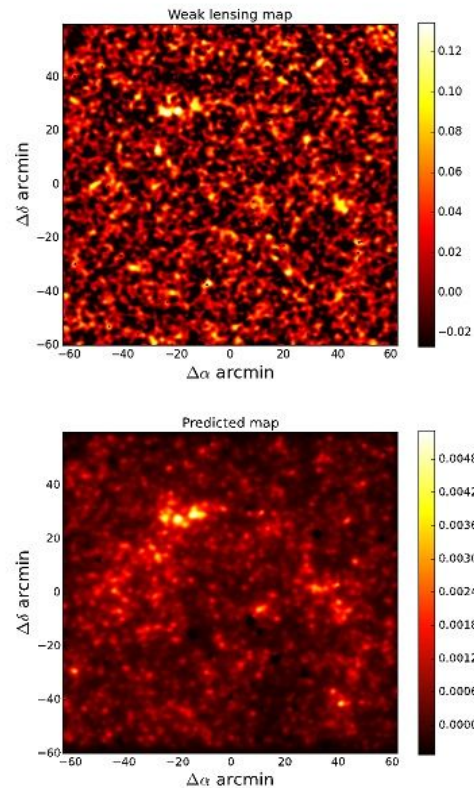


図1: 弱重力レンズ解析で明らかにした質量分布図(上)と銀河の三次元分布から明らかにした仮想的な質量分布図(下)

さらに銀河団よりも信号強度の弱い構造についても着目して研究した。米国のグループによって取得された銀河の三次元分布を元に、銀河をたよりに仮想的な質量分布を作成した(図1)。この銀河サンプルは $R=20.6$ の深さまで全ての銀河を分光したもので、この深さは重力レンズで検出するほぼ全ての銀河が観測できていることが期待される。得られた重力レンズ質量分布と銀河質量分布の相互相関関数をとったところよく一致していることがわかり、銀河団のみならず、より質量の小さな構造からも重力レンズ信号を得ていることを確認した。3次元の銀河分布を持っているので奥行きごとに銀河分布をわけて、銀河を星形成中の銀河と星形成をやめた銀河に分けて、それぞれ弱重力レンズ質量分布にどのように影響しているかを

調べた。その結果、弱重力レンズ質量分布図に影響を与えやすい銀河の距離が $z=0.3$ (50 億光年程度) であり、 $z=0.5$ (70 億光年程度) まで観測できていることがわかった。銀河の種別についてみると星形成銀河は $z=0.3$ よりも $z=0.5$ のほうが質量分布図と一致度が高いことを示した (図 2)。これは重い星形成銀河から順に星形成をやめていくダウンサイジング描像を支持するものである (Utsumi et al. 2016)。

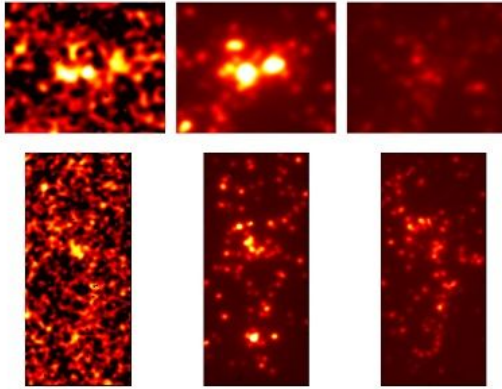


図 2: $z=0.3$ の質量分布図 (上段) と $z=0.5$ の質量分布図 (下段)。左は弱重力レンズ解析によって得たもの、真ん中は星形成をやめた銀河から得た質量分布図、右は星形成銀河から得た質量分布図。遠方の $z=0.5$ の星形成銀河質量分布図が $z=0.3$ のものよりはっきりしている様子がわかる。

本研究を通して HSC で得た撮像画像を使って、弱重力レンズ解析が行えることを確認した。得られる信号は実際に天体由来の信号であることも確認した。HSC は深く高い撮像性能をもつので、ほかの観測システムに比べると多数の背景銀河が検出できる。このことから HSC 撮像データを元にした質量分布図は、広域に渡って観測が可能なシステムの中では最も解像度の高い質量分布図を得ることができることを実証した。実際に、競合するグループは 20 分角 (Vikram et al. 2015) の解像度を得ているところ、HSC では 1 分角の解像度を得ることができる。 $z=0.3$ の距離において銀河団の大きさは数分角なので、弱重力レンズ質量分布図から銀河団を探索することが可能であることが実証できた。

重力レンズ信号の振幅は測定に使う背景銀河の距離に強く依存し、質量測定に影響を与える。今後は重力レンズ信号の振幅に着目し、銀河三次元分布と比較することで検証を行い、弱重力レンズ信号を使って銀河団カタログを作成し、宇宙論に制限を与えられるように研究を進めていきたい。

本研究を通して、世界で一番深い超広視野

観測が効率的に行えるようになった。その結果、稀な天体の探査や広く広がった天体の探査が容易になった (Yoshida et al. 2017 [1]; 内海洋輔 2017 [2]; Chan et al. [4] 2016; Matsuoka et al. 2016 [5]; Morokuma et al. 2016 [6]; Tanaka et al. 2016 [7]; Toba et al. 2015 [8]; Okamoto et al. 2015 [9])。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 12 件)

1. Yoshida, M., Utsumi, Y., Tominaga, N., Morokuma, T., Tanaka, M., Asakura, Y., Matsubayashi, K., Ohta, K., Abe, F., Chimasu, S., Furusawa, H., Itoh, R., Itoh, Y., Kanda, Y., Kawabata, K. S., Kawabata, M., Koshida, S., Koshimoto, N., Kuroda, D., Moritani, Y., Motohara, K., Murata, K. L., Nagayama, T., Nakaoka, T., Nakata, F., Nishioka, T., Saito, Y., Terai, T., Tristram, P. J., Yanagisawa, K., Yasuda, N., Doi, M., Fujisawa, K., Kawachi, A., Kawai, N., Tamura, Y., Uemura, M., and Yatsu, Y., J-GEM follow-up observations of the gravitational wave source GW151226*, Publications of the Astronomical Society of Japan, refereed, 69, 2017, 9, 10.1093/pasj/psw113
2. 内海洋輔, 重力波光赤外線対応現象フォローアップ用チベット望遠鏡 HinOTORI の開発, 天文月報, 査読なし, 110, 1, 2017, 30, http://www.asj.or.jp/geppou/content/s/2017_01.html
3. Utsumi, Y., Geller, M. J., Dell'Antonio, I. P., Kamata, Y., Kawanomoto, S., Koike, M., Komiyama, Y., Koshida, S., Mineo, S., Miyazaki, S., Sakurai, J., Tait, P. J., Terai, T., Tomono, D., Usuda, T., Yamada, Y., and Zahid, H. J., A Weak Lensing View of the Downsizing of Star-forming Galaxies, The Astrophysical Journal, refereed, 833, 2016, 156, 10.3847/1538-4357/833/2/156
4. Chan, J. H. H., Suyu, S. H., More, A., Oguri, M., Chiueh, T., Coupon, J., Hsieh, B.-C., Komiyama, Y., Miyazaki, S., Murayama, H., Nishizawa, A. J., Price, P., Tait, P. J., Terai, T., Utsumi, Y., and Wang, S.-Y., Galaxy-scale Gravitational Lens Candidates from the Hyper Suprime-Cam Imaging Survey and the Galaxy And Mass Assembly Spectroscopic Survey, The

- Astrophysical Journal, refereed, 832, 2016, 135, 10.3847/0004-637X/832/2/135
5. Matsuoka, Y., Onoue, M., Kashikawa, N., Iwasawa, K., Strauss, M. A., Nagao, T., Imanishi, M., Niida, M., Toba, Y., Akiyama, M., Asami, N., Bosch, J., Foucaud, S., Furusawa, H., Goto, T., Gunn, J. E., Harikane, Y., Ikeda, H., Kawaguchi, T., Kikuta, S., Komiyama, Y., Lupton, R. H., Minezaki, T., Miyazaki, S., Morokuma, T., Murayama, H., Nishizawa, A. J., Ono, Y., Uchi, M., Price, P. A., Sameshima, H., Silverman, J. D., Sugiyama, N., Tait, P. J., Takada, M., Takata, T., Tanaka, M., Tang, J.-J., and Utsumi, Y., Subaru High-z Exploration of Low-luminosity Quasars (SHELLQs). I. Discovery of 15 Quasars and Bright Galaxies at $5.7 < z < 6.9$, The Astrophysical Journal, refereed, 828, 2016, 26, 10.3847/0004-637X/828/1/26
 6. Morokuma, T., Tanaka, M., Asakura, Y., Abe, F., Tristram, P. J., Utsumi, Y., Doi, M., Fujisawa, K., Itoh, R., Itoh, Y., Kawabata, K. S., Kawai, N., Kuroda, D., Matsubayashi, K., Motohara, K., Murata, K. L., Nagayama, T., Ohta, K., Saito, Y., Tamura, Y., Tominaga, N., Uemura, M., Yanagisawa, K., Yatsu, Y., and Yoshida, M., J-GEM follow-up observations to search for an optical counterpart of the first gravitational wave source GW150914, Publications of the Astronomical Society of Japan, refereed, 68, 2016, L9, 10.1093/pasj/psw061
 7. Tanaka, M., Wong, K. C., More, A., Dezuka, A., Egami, E., Oguri, M., Suyu, S. H., Sonnenfeld, A., Higuchi, R., Komiyama, Y., Miyazaki, S., Onoue, M., Oyamada, S., and Utsumi, Y., A Spectroscopically Confirmed Double Source Plane Lens System in the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program, The Astrophysical Journal, refereed, 826, 2016, L19, 10.3847/2041-8205/826/2/L19
 8. Toba, Y., Nagao, T., Strauss, M. A., Aoki, K., Goto, T., Imanishi, M., Kawaguchi, T., Terashima, Y., Ueda, Y., Bosch, J., Bundy, K., Doi, Y., Inami, H., Komiyama, Y., Lupton, R. H., Matsuhara, H., Matsuoka, Y., Miyazaki, S., Morokuma, T., Nakata, F., Oi, N., Onoue, M., Oyabu, S., Price, P., Tait, P. J., Takata, T., Tanaka, M. M., Terai, T., Turner, E. L., Uchida, T., Usuda, T., Utsumi, Y., Yamada, Y., and Wang, S.-Y., Hyper-luminous dust-obscured galaxies discovered by the Hyper Suprime-Cam on Subaru and WISE, Publications of the Astronomical Society of Japan, refereed, 67, 2015, 86, 10.1093/pasj/psv057
 9. Okamoto, S., Arimoto, N., Ferguson, A. M. N., Bernard, E. J., Irwin, M. J., Yamada, Y., and Utsumi, Y., A Hyper Suprime-Cam View of the Interacting Galaxies of the M81 Group, The Astrophysical Journal, refereed, 809, 2015, L1, 10.1088/2041-8205/809/1/L1
 10. Miyazaki, S., Oguri, M., Hamana, T., Tanaka, M., Miller, L., Utsumi, Y., Komiyama, Y., Furusawa, H., Sakurai, J., Kawanomoto, S., Nakata, F., Uruguchi, F., Koike, M., Tomono, D., Lupton, R., Gunn, J. E., Karoji, H., Aihara, H., Murayama, H., and Takada, M., Properties of Weak Lensing Clusters Detected on Hyper Suprime-Cam's 2.3 deg² field, The Astrophysical Journal, refereed, 807, 2015, 22, 10.1088/0004-637X/807/1/22
 11. Utsumi, Y., Miyazaki, S., Geller, M. J., Dell'Antonio, I. P., Oguri, M., Kurtz, M. J., Hamana, T., and Fabricant, D. G., Reducing Systematic Error in Weak Lensing Cluster Surveys, The Astrophysical Journal, refereed, 786, 2014, 93, 10.1088/0004-637X/786/2/93
 12. 内海洋輔, Hyper Suprime-Camと過ごした7年間, 天文月報, 査読なし, 107, 4, 2014, 224, http://www.asj.or.jp/geppou/content/s/2014_04.html
- 〔学会発表〕(計 4件)
1. 内海洋輔ほか, チベットロボット三色撮像カメラ(HinOTORI): 輸送と建設, 日本天文学会, 2016/9/15, 愛媛大学(愛媛県松山市)
 2. 内海洋輔ほか, チベットロボット三色撮像カメラ(HinOTORI): 光学性能評価他, 日本天文学会, 2015/3/20, 大阪大学(大阪府豊中市)
 3. 内海洋輔ほか, チベットロボット三色撮像カメラ(HinOTORI): 仕様評価, 日本天文学会, 2014/9/11, 山形大学(山形県山形市)
 4. 内海洋輔ほか, チベットロボット三色撮像カメラ(HinOTORI): 最終デザイン, 日本天文学会, 2013/9/11, 東北大学(宮城県仙台市)

〔その他〕

ホームページ等

1. <https://www.hiroshima-u.ac.jp/news/37496>
2. https://www.subarutelescope.org/Pressrelease/2017/01/30/j_index.html
3. <https://www.hiroshima-u.ac.jp/en/news/37497>
4. <https://www.subarutelescope.org/Pressrelease/2017/01/30/index.html>
5. <http://anela.mtk.nao.ac.jp/hscblog/builder/>
6. <http://hinotori.hiroshima-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内海 洋輔 (Utsumi Yousuke)

広島大学宇宙科学センター特任助教

研究者番号：40700018