

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 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：26800097

研究課題名(和文)弱い重力レンズ効果による銀河団サブハローの質量関数と統計的性質の解明

研究課題名(英文) Weak-gravitational lensing analysis of subhalos in galaxy clusters for revealing its mass function and statistical properties

研究代表者

岡部 信広 (Okabe, Nobuhiro)

広島大学・理学研究科・助教

研究者番号：00436073

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：銀河団は宇宙最大の天体である。銀河団内部にはサブハローと呼ばれる質量密度の濃いつぶつぷの構造がある。このような構造の質量は弱い重力レンズ解析によって測定することができる。一方X線観測によって高温ガスの物理状態を測定することができる。本研究によって、銀河団サブハローに付随する高温ガスを発見し、それが剥ぎ取られている様子が分かった。また、ある銀河団中心部に存在する楕円銀河の付随するサブハローと銀河団全体の質量プロファイルを弱い重力レンズと星力学を使って明らかにした。ある衝突銀河団はサブハローの分布と相対論的電子の存在を示す電波レリックスの分布が似ていることが分かった。

研究成果の概要(英文)：Galaxy clusters are the largest object in the universe. High mass density and clumpy structure, namely subhalos, exist in galaxy clusters. The subhalo masses can be measured by weak-gravitational lensing analysis, and physical properties for hot gas in clusters are by X-ray observations. Our studies based on this funding reveals the following main results. 1) X-ray follow-up observation discovered hot gas associated with subhalos previously discovered by weak-lensing analysis and found a stripping feature. 2) Mass profile for dark subhalo associated with a giant, central elliptical galaxy and the entire region are measured by joint weak-lensing and stellar kinematics analysis. 3) Giant synchrotron radio emission traces the projected mass distribution for one merging cluster.

研究分野：天文学

キーワード：光赤外天文学 弱い重力レンズ効果 銀河団 暗黒物質 宇宙論 X線天文学

1. 研究開始当初の背景

銀河団は宇宙で最大の天体である。暗黒物質が約80%の質量を占め、銀河団ガスや銀河といったバリオンは約20%にしかない。

階層的構造形成モデルに基づけば、小さい天体が最初にでき、それらの衝突合体を経て、より大きな構造へと進化していった。吸収されたより小さい天体は、銀河団の巨大な重力場による潮汐力で破壊され、銀河団のスムーズな質量成分へと変化して行く。小さい天体の中心部の密度は高いため寿命が長く生き残っている場合が多い。このような成分をサブハローと呼ぶ。銀河団サブハローの質量やその統計的性質は銀河団の進化の歴史を表すものであり、Mpcスケール以下での宇宙の構造形成史を明らかにすることができる。小さいサブハローの大きさは比較的小さく、精力的に弱い重力レンズ解析が行われてきていた $0.15 < z < 0.3$ のような中赤方偏移の銀河団では分解することは難しい。Okabe et al. (2014, ApJ)で超近傍にあるかみのけ座銀河団ではサブハローの見かけの大きさが大きくなり、弱い重力レンズ解析でその質量や分布を測定できることを示した。これにより中赤方偏移から、低赤方偏移までターゲットが広がっただけでなく、サブハローのような新しい物理量ができることが明らかになった。

2. 研究の目的

銀河団は、宇宙の構造の進化を明らかにする理想的な実験場の一つである。

(1)サブハローの弱い重力レンズ解析。
銀河団のサブハローの弱い重力レンズ解析を行い、サブハローの統計的性質を明らかにすることを目的とする。

(2)銀河団の質量プロファイルの
主にスムーズな質量成分はNFWモデル(Navarro et al. 1996)と呼ばれる質量プロファイルで記述され、質量と質量集中度の二つのパラメーターで表される。両者の間には関係があり、階層的構造形成モデルを検証することができる。

(3)銀河団ガスや銀河のようなバリオン成分と暗黒物質の関係性の解明
銀河団サブハローは衝突前銀河団ガスを持っていた。銀河団ガスは動圧などを受けるため、暗黒物質サブハローよりも寿命が短い。一方、銀河は動圧を受けにくいので、暗黒物質サブハローの分布と同程度になることが予想される。X線、電波、星動力学などの相補的な方法と弱い重力レンズ解析を組み合わせることによって、バリオンと暗黒物質の進化を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

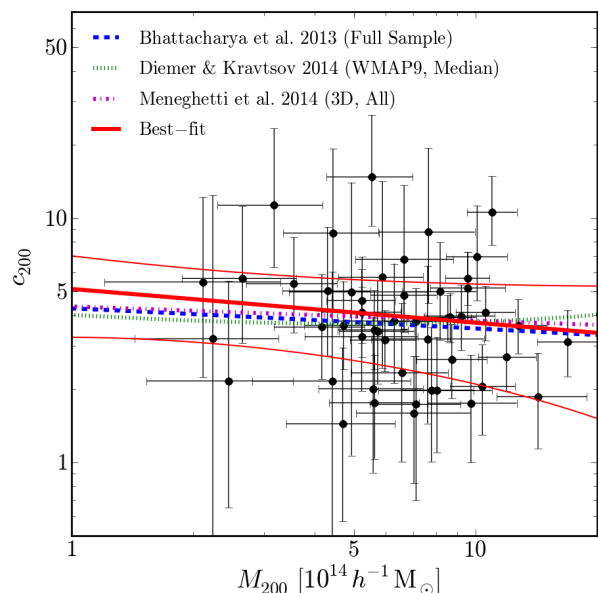
(1)弱い重力レンズ解析
背景銀河に対する弱い重力レンズ効果は銀河団の力学状態によらず、銀河団の質量分布を測定する唯一の方法である。すばる望遠鏡主焦点カメラ(シュプリームカム/S-Cam)の広視野は同研究を行うのに世界で最も有力な観測装置の一つである。 $0.15 < z < 0.3$ にある中赤方偏移にある銀河団の弱い重力レンズ解析は、スムーズな質量成分の構造を明らかにすることができる。また衝突銀河団と言った比較的大きな質量をもつサブハローの分布を調べる理想的なターゲットとなる。 $z < 0.05$ の低赤方偏移にある銀河団は小さいサブハローの見かけの大きさも大きくその構造を分解することができる。両者の特徴をふまえて銀河団の各成分を効率良く明らかにすることができる。

(2)すばる望遠鏡新主焦点カメラ・ハイパーシュプリームカム(HSC)の弱い重力レンズ解析。HSCの視野は前カメラ(S-cam)の約7倍の視野をほこり、低赤方偏移の銀河団を効率よく観測することができる。これにより銀河団サブハローの研究を効率的に行うことができる。本科研費採択期間中に精力的にHSCデータの解析を行った。サンプルは $z < 0.06$ のX線で明るい銀河団22個を選定し、系統的な解析を行っている。同研究結果は今後発表する予定である。

(3)X線、電波、星動力学などの相補的な観測量を組み合わせることにより、暗黒物質優勢下でバリオン成分がどのような物理状態になっているのかを初めて明らかにすることができる。このような方法をジョイント解析と呼び、現在の研究で有力なアプローチの一つとなっている。

4. 研究成果

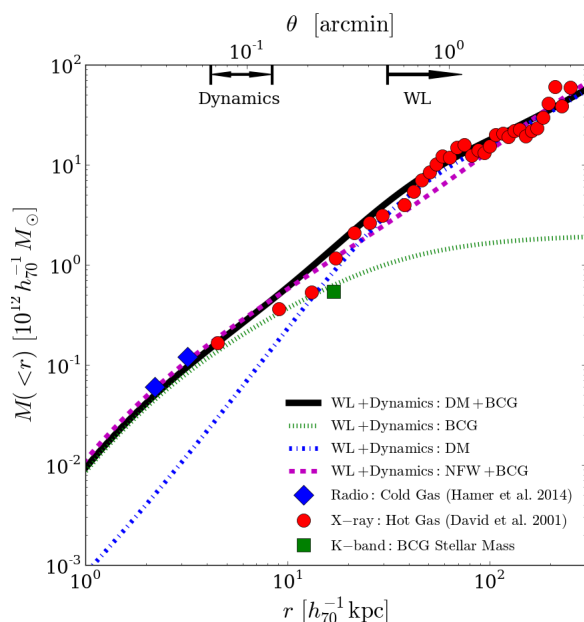
(1)質量と質量集中度の相関関係が階層的構



造形成モデルに基づく理論予言と一致することを初めて確認した(Okabe & Smith 2016)。

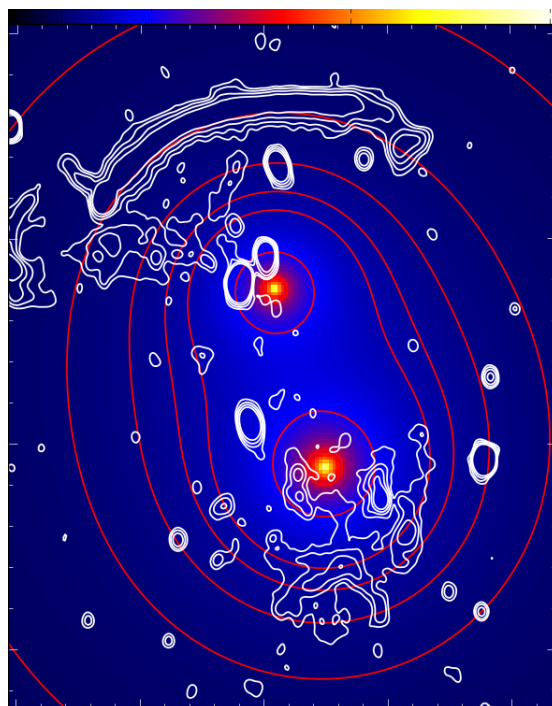
赤方偏移 $0.15 < z < 0.3$ にある銀河団のうちX線光度から選んだ50個の銀河団を系統的に解析を行った。銀河団の質量プロファイルは、質量と質量集中度の二つのパラメーターで記述される。質量集中度は中心部の集中度合いを表す。階層的構造形成モデルに基づけば、質量の小さい天体が最初に形成され、大きい天体が後に形成される。銀河団の核となる密度は、宇宙の臨界密度に比例する。宇宙膨張を考えるとより昔の宇宙ほど臨界密度が大きいことから、質量が小さいほど、質量集中度が高くなる相関が期待される。このような相関を調べる唯一の方法が背景銀河に対する弱い重力レンズ効果のみである。我々は50個の銀河団のサンプルを定義し、弱い重力レンズ解析を系統的に行った。これにより観測結果と質量集中度の関係が理論予言と一致することを発見した。なお、解析手法では、40%程度の系統誤差を1%に押さえる方法を開発した。これは、仮に銀河形状カタログにレンズ信号の情報を持たない銀河団銀河を含んでしまうと、レンズ信号を過小評価、最終的に銀河団質量集中度を過小評価する系統誤差である。我々はレンズ信号と測光赤方偏移、色の三つの独立した情報を用いることにより、背景銀河のみのカタログを作成することに成功した

(2)Hydra A銀河団($z \sim 0.05$)に対し星動力学と弱い重力レンズ(WL)解析のジョイント解析を行い、銀河団の中心部にある巨大な楕円銀河に付随するサブハローから銀河団の質量プロファイルを数kpcからMpcまでの幅広い領域で、質量分布を明らかにした(Okebe et al. 2016, MNRAS)。ジョイント解析により暗黒物質質量と星質量を分解することができた。また、電波観測による力学的質量と、X線

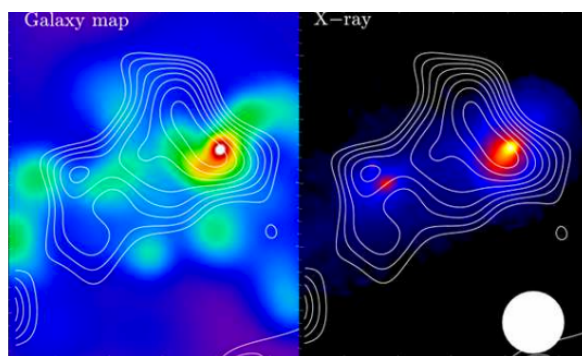


よる静水圧平衡質量がWL質量と一致することが分かった。また、K-bandから見積もられた星質量と我々が見積もった星質量が一致することも分かった。

(3) 衝突銀河団CIZA J2242.8+5301($z \sim 0.19$)の弱い重力レンズ解析を行い、質量の大きなサブハローの2次元質量分布を復元した(Okabe et al. 2016 PASJ)。また、フィラメント状の巨大なシンクロトロン放射(電波レリック)の分布の曲率と質量分布が一致していることが分かった。これにより、相対論的電子の加速プロセスが銀河団衝突によってもたらされる示唆が得られた。



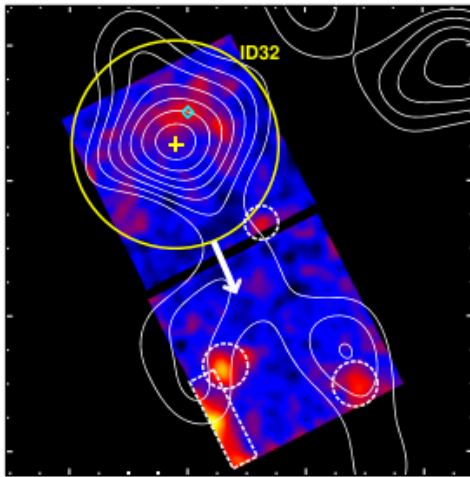
(4)Shapley Supercluster($z \sim 0.05$)の中心部での弱い重力レンズ解析を行い、超銀河団での銀河団・銀河群(サブハロー)の質量分布を復元した。同領域で、質量分布と銀河分布、X線分布が一致していることを明らかにした。



(5)銀河団ガスの中心部から外縁部までの密

度、温度、圧力、エントロピープロファイルと、弱い重力レンズ(WL)質量をジョイントフィットをセルフコンシテントに行った(Okabe et al. 2014 PASJ)。これにより銀河団ガスプロファイルがユニバーサルな形を持つことが分かってきた。特に外縁部のエントロピーがフラットになる原因が温度の低下にあり、ガスサブハローではないことを明らかにした。本研究はすばる望遠鏡のWL質量とすざくX線衛星の外縁部観測によって初めてもたらされた結果である。外縁部ガスの観測は長時間の露出が必要であり、サンプルが4つしかない。今後の研究によってサンプル数が増えることが期待される。

(6) 弱い重力レンズ解析で発見されたかみのけ座銀河団($z \sim 0.02$)のサブハローのX線フォローアップ観測を行い、サブハローに付随した銀河団ガスを発見した(Sasaki et al. 2015)。



すざくX衛星による銀河団ガスのイメージ(赤が高密度銀河団ガスを示す)。白等高線が射影された銀河団サブハローの質量分布。サブハローに付随した銀河団ガスを発見し、さらにそれが動圧を受けている状況を発見した。相補的なX線フォローアップ観測により弱い重力レンズ解析によるサブハロー探索の結果を強く指示するものとなった。なお、図のサブハローは銀河団外縁部に位置しており、低く安定したX線バックグラウンドを持つすざく衛星によって初めて観測可能になった。

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 19 件)

① Jaffé, Yara L.; Verheijen, Marc A. W.; Haines, Chris P.; Yoon, Hyein; Cybulski, Ryan; Montero-Castaño, María; Smith, Rory; Chung, Aeree; Deshev, Boris Z.; Fernández, Ximena; van Gorkom, Jacqueline; Poggianti, Bianca M.; Yun, Min S.; Finoguenov, Alexis;

Smith, Graham P.; Okabe, Nobuhiro,”BUDHIES - III: the fate of H I and the quenching of galaxies in evolving environments”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, Volume 461, 2016, Issue 2, p.1202-1221
DOI:10.1093/mnras/stw984

② Sasaki, Toru; Matsushita, Kyoko; Sato, Kosuke; Okabe, Nobuhiro, “X-ray observations of a subhalo associated with the NGC 4839 group infalling toward the Coma cluster”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, Volume 68, 2016, Issue 5, id.85 15 pp
DOI: 10.1093/pasj/psw078

③ Smith, G. P.; Mazzotta, P.; Okabe, N.; Ziparo, F.; Mulroy, S. L.; Babul, A.; Finoguenov, A.; McCarthy, I. G.; Lieu, M.; Bahé, Y. M.; Bourdin, H.; Evrard, A. E.; Futamase, T.; Haines, C. P.; Jauzac, M.; Marrone, D. P.; Martino, R.; May, P. E.; Taylor, J. E.; Umetsu, K.”LoCuSS: Testing hydrostatic equilibrium in galaxy clusters”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 査読有, Volume 456, 2016, Issue 1, p.L74-L78
DOI: 10.1093/mnras/slv175

④ Okabe, Nobuhiro; Smith, Graham P.”LoCuSS: weak-lensing mass calibration of galaxy clusters” Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, Volume 461, 2016, Issue 4, p.3794-3821
DOI: 10.1093/mnras/stw1539

⑤ Ziparo, Felicia; Smith, Graham P.; Okabe, Nobuhiro; Haines, Chris P.; Pereira, Maria J.; Egami, Eiichi, “LoCuSS: exploring the selection of faint blue background galaxies for cluster weak-lensing” Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, Volume 463, 2016, Issue 4, p.4004-4018
DOI:10.1093/mnras/stw2192

⑥ Medezinski, Elinor; Umetsu, Keiichi; Okabe, Nobuhiro; Nonino, Mario; Molnar, Sandor; Massey, Richard; Dupke, Renato; Merten, Julian”Frontier Fields: Subaru Weak-Lensing Analysis of the Merging Galaxy Cluster A2744” The Astrophysical Journal, 査読有, Volume 817, 2016, Issue 1, article id. 24, 16 pp.
DOI:10.3847/0004-637X/817/1/24

⑦ Okabe, N.; Umetsu, K.; Tamura, T.; Fujita, Y.; Takizawa, M.; Matsushita, K.; Fukazawa, Y.; Futamase, T.; Kawaharada, M.; Miyazaki, S.; Mochizuki, Y.; Nakazawa, K.; Ohashi, T.; Ota, N.; Sasaki, T.; Sato, K.; Tam, S.

- I.,"Central mass profiles of the nearby cool-core galaxy clusters Hydra A and A478" Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, Volume 456, 2016, Issue 4, p.4475-4487
DOI:10.1093/mnras/stv2916
- ⑧ Okabe, Nobuhiro; Akamatsu, Hiroki; Kakuwa, Jun; Fujita, Yutaka; Zhang, Yuying; Tanaka, Masayuki; Umetsu, Keiichi,"Radio relics tracing the projected mass distribution in CIZA J2242.8+5301" Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, Volume 67, 2015, Issue 6, id. 1149 pp.
DOI: 10.1093/pasj/psv085
- ⑨ Terukina, Ayumu; Yamamoto, Kazuhiro; Okabe, Nobuhiro; Matsushita, Kyoko; Sasaki, Toru, "Testing a generalized cubic Galileon gravity model with the Coma Cluster", Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 査読有, Issue 10, 2015, article id. 064.
DOI:10.1088/1475-7516/2015/10/064
- ⑩ Haines, C. P.; Pereira, M. J.; Smith, G. P.; Egami, E.; Babul, A.; Finoguenov, A.; Ziparo, F.; McGee, S. L.; Rawle, T. D.; Okabe, N.; Moran, S. M."LoCuSS: The Slow Quenching of Star Formation in Cluster Galaxies and the Need for Pre-processing" The Astrophysical Journal, 査読有, Volume 806, 2015, Issue 1, article id. 101, 23 pp.
DOI:10.1088/0004-637X/806/1/101
- ⑪ Sasaki, Toru; Matsushita, Kyoko; Sato, Kosuke; Okabe, Nobuhiro, "Suzaku Observations of Subhalos in the Coma Cluster" The Astrophysical Journal, 査読有, Volume 806, 2015, Issue 1, article id. 123, 12 pp.
DOI:10.1088/0004-637X/806/1/123
- ⑫ Niikura, Hiroko; Takada, Masahiro; Okabe, Nobuhiro; Martino, Rossella; Takahashi, Ryuichi "Detection of universality of dark matter profile from Subaru weak lensing measurements of 50 massive clusters" Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, Volume 67, 2015, Issue 6, id. 10324 pp
DOI: 10.1093/pasj/psv090
- ⑬ Umetsu, Keiichi; Sereno, Mauro; Medzinski, Elinor; Nonino, Mario; Mroczkowski, Tony; Diego, Jose M.; Ettori, Stefano; Okabe, Nobuhiro; Broadhurst, Tom; Lemze, Doron, "Three-dimensional Multi-probe Analysis of the Galaxy Cluster A1689" The Astrophysical Journal, 査読有, Volume 806, 2015, Issue 2, article id. 207, 27 pp.
DOI: 10.1088/0004-637X/806/2/207
- ⑭ Kobayashi, Masato I. N.; Leauthaud, Alexie; More, Surhud; Okabe, Nobuhiro; Laigle, Clotilde; Rhodes, Jason; Takeuchi, Tsutomu T."Can we use weak lensing to measure total mass profiles of galaxies on 20 kpc scales?" Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, Volume 449, Issue 2,2014, p.2128-2143
DOI:10.1093/mnras/stv424
- ⑮ Merluzzi, P.; Busarello, G.; Haines, C. P.; Mercurio, A.; Okabe, N.; Pimblett, K. J.; Dopita, M. A.; Grado, A.; Limatola, L.; Bourdin, H.; Mazzotta, P.; Capaccioli, M.; Napolitano, N. R.; Schipani, P. "Shapley Supercluster Survey: Galaxy evolution from filaments to cluster cores" Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有 Volume 446, Issue 1, 2014, p.803-822
DOI: 10.1093/mnras/stu2085
- ⑯ Okabe, Nobuhiro; Umetsu, Keiichi; Tamura, Takayuki; Fujita, Yutaka; Takizawa, Motokazu; Zhang, Yu-Ying; Matsushita, Kyoko; Hamana, Takashi; Fukazawa, Yasushi; Futamase, Tasushi; Kawaharada, Madoka; Miyazaki, Satoshi; Mochizuki, Yukiko; Nakazawa, Kazuhiro; Ohashi, Takaya; Ota, Naomi; Sasaki, Toru; Sato, Kosuke; Tam, Sutieng"Universal profiles of the intracluster medium from Suzaku X-ray and Subaru weak-lensing observations", Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有 66,Issue5, 2014, id.9914 pp
DOI: 10.1093/pasj/psu075
- ⑰ Rawle,T.D.;Altieri,B.;Egami,E.;Perez-Gonzalez,P.G.;Richard,J.;Santos,J.S.;Valtchanov,I.;Walth,G.;Bouy,H.;Haines,C.P.;Okabe,N. "Starformation in the massive cluster merger Abell2744" Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有 Volume 442, Issue 1, 2014, p.196-206
DOI: 10.1093/mnras/stu868
- ⑱ Martino, Rossella; Mazzotta, Pasquale;Bourdin, Hervé; Smith, Graham P.; Bartalucci, Iacopo; Marrone, Daniel P.; Finoguenov, Alexis; Okabe, Nobuhiro,"LoCuSS: hydrostatic mass measurements of the high-LX cluster sample - cross-calibration of Chandra and XMM-Newton" Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, Volume 443,

Issue 3, 2014, p.2342-2360
DOI:10.1093/mnras/stu1267

- ⑬ Mulroy, Sarah L.; Smith, Graham P.; Haines, Chris P.; Marrone, Daniel P.; Okabe, Nobuhiro; Pereira, Maria J.; Egami, Eiichi; Babul, Arif; Finoguenov, Alexis; Martino, Rossella “LoCuSS: the near-infrared luminosity and weak-lensing mass scaling relation of galaxy clusters” Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, Volume 443, Issue 4, 2014, p.3309-3317
DOI:10.1093/mnras/stu1387

〔学会発表〕 (計 9 件)

- ① 宮岡敬太、岡部信広、北口貴雄、深沢泰司、大栗真宗、HSC Cluster Members, “Subaru/HSCサーベイ領域にある重量級銀河団のX線観測による質量推定 II” 日本天文学会 2017年春季年会,2016年03月15日～2016年03月15日,九州大学、日本
- ② Nobuhiro Okabe, “NECSUS:Subaru/HSC Weak-lensing Analysis of Very Nearby Galaxy Clusters ”The 6th Subaru International Conference, ”Panoramas of the Evolving Cosmos”, 2016年11月28日～2016年12月02日, Hiroshima,Japan
- ③ Keita Miyaoaka, Nobuhiro Okabe, Takao Kitaguchi,Yasushi Fukazawa, Masamune Oguri and HSC Cluster members, “X-ray mass measurement of massive galaxy clusters in the HSC SSP survey region”, The 6th Subaru International Conference, ”Panoramas of the Evolving Cosmos”, 2016年11月28日～2016年12月02日, Hiroshima,Japan
- ④ 岡部 信広, “LoCuSS & NECSUS: Cluster Weak-lensing Studies” 第5回観測的宇宙論ワークショップ (招待講演) 2016年11月24日～2016年11月26日, 広島大学、日本
- ⑤ Nobuhiro Okabe, “Joint X-ray and Subaru/HSC Weak-lensing Analysis of Very Nearby Galaxy Clusters”, Hotspots in the XMM sky: Cosmology from X-ray to Radio, 2016年06月15日～2016年06月18日, Mykonos Island,Greece
- ⑥ 岡部信広&G.P.Smith, “LoCuSS:Weak-lensing mass calibration of galaxy clusters” 日本天文学会2016年秋季年会, 2016年09月14日～2016年09月16日, 愛媛大学、日本
- ⑦ 宮岡敬太、岡部信広、北口貴雄、深沢泰司、大栗真宗、HSC Cluster Members, “Subaru/HSCサーベイ領域にある重量級

銀河団のX線観測による質量推定” 日本天文学会 2016年秋季年会,2016年09月14日～2016年09月16日,愛媛大学、日本,

- ⑧ Nobuhiro Okabe, “Subaru Weak-lensing Mass Measurements for Galaxy Clusters”Astroparticle View of Galaxy Clusters (招待講演), 2015年03月24日～2015年03月26日, Hiroshima Univ., Japan.
- ⑨ Nobuhiro Okabe, “A Comparison of Weak-lensing and X-ray masses of Galaxy Clusters” , TheX-rayUniverse2014 (招待講演) 014年06月16日～2014年06月19日, Trinity College Dublin, Ireland

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://theo.phys.sci.hiroshima-u.ac.jp/okabe/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

岡部 信広 (OKABE, Nobuhiro)

広島大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：00436073

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：

(4)研究協力者

()