

HSCで探る銀河団

岡部 信 広¹・大栗 真 宗²・宮崎 聡³・
見玉 忠 恭⁴・小山 佑 世⁵

〈¹ 広島大学大学院理学研究科 物理学専攻 〒739-8526 広島県東広島市鏡山 1-3-1〉

〈² 東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

〈³ 国立天文台先端技術センター 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

〈⁴ 東北大学大学院理学研究科 天文学専攻 〒980-8578 仙台市荒巻字青葉 6-3〉

〈⁵ 国立天文台ハワイ観測所 650 North A'ohoku Place, Hilo, HI 96720, U.S.A.〉

e-mail: ¹ okabe@hiroshima-u.ac.jp ² masamune.oguri@ipmu.jp ³ satoshi@naoj.org ⁴ kodama@astr.tohoku.ac.jp
⁵ koyama@naoj.org

すばる望遠鏡と Hyper Suprime-Cam (HSC) の組み合わせによる HSC-SSP サーベイは人類史上かつてない広さと深さで宇宙を探索することができます。このサーベイビッグデータは銀河団研究に革命をもたらします。本稿では HSC-SSP でしか達成できない三つのユニークな銀河団探索やそれに基づく銀河団物理の研究についてのレビューをします。

1. はじめに

新たにすばる望遠鏡に取り付けられた主焦点カメラハイパーシュプリームカム (Hyper Suprime-Cam; HSC) による戦略的撮像サーベイ (HSC-SSP) の開始から数年が経ち、その初期成果が報告されました。現在もサーベイや研究が進行中であり、HSC-SSP に関する研究成果が今後も天文月報で紹介されることがあると思いますが、本稿では、重要な研究成果を中心に、銀河団に関する研究成果をなるべく満遍なく網羅するようレビューに努めたいと思います。本稿を通してすばる望遠鏡と HSC を組み合わせた宇宙探査 HSC-SSP がいかにユニークであるかを読者の皆様に伝えられましたら幸いです。

レビューに先立ち、まずは予備知識として銀河団と HSC-SSP 以前の銀河団研究について簡単に触れたいと思います。銀河団は宇宙の大規模構造のフィラメントが交差するような場所に位置する宇宙最大の天体です。質量で言うと、大きいものは

10^{15} 太陽質量にも達し、 10^{14} 太陽質量以上は銀河団、 10^{13-14} 太陽質量は銀河群とおおむね呼ばれます。広い意味で両者をひとくくりにして銀河団と呼ぶこともあります。銀河団の質量の約 85% が目で観ることができない暗黒物質、残りの約 10% が熱くて薄いプラズマ、約 5% が銀河で占められています。暗黒物質を含む質量の分布は重力レンズ解析によって銀河団の力学状態に関係なく測定することができます。弱い重力レンズ研究分野を開拓したのが前主焦点カメラ Suprime-Cam でした¹⁾⁻⁵⁾。プラズマは高温ガスや銀河団ガスとも呼ばれ、X 線衛星によってその温度や密度が観測されてきました。また近年では、宇宙マイクロ波背景放射と銀河団ガスとの逆コンプトン散乱によって黒体放射のスペクトルが歪み、スニアエフ・ゼルドビッチ (SZ) 効果として観測されています。SZ 効果は、銀河団ガスの圧力を視線方向に積分した量が観測され、X 線観測と相補的な役割を演じています。また、光学観測によってメンバー銀河や巨大な楕円銀河などを同定することができます。

銀河団の探査は現在では多波長に渡って行われています。2000年以降の多様な研究で使われた銀河団のカタログの一つが1990年代に行われたROSAT X線衛星の全天サーベイによるカタログで、その数は赤方偏移 z が0.4程度以下で1,700個あまりに達しています^{6),7)}。また2016年には、XMM-Newton衛星を使ったXXLサーベイによって約50平方度で $z \leq 0.6$ にある100個の銀河団が見つかっています⁸⁾。X線フラックスの赤方偏移依存性から、X線では高赤方偏移にある銀河団ほど発見しづらいのが特徴です。また、X線による探査は銀河団中心部のクールコアや銀河団衝突によるX線光度の増大などのバリオン物理によるバイアス問題も内包しています。一方、SZ効果を用いた銀河団ではSZ効果によるCMBスペクトルの変化量赤方偏移依存性はなく、遠い銀河団も原理的に発見することができます。2015年にPlanck衛星では全天で1,300弱の銀河団 ($z \leq 0.7$) を発見しました⁹⁾。地上観測では、同年、角度分解能が高い南極望遠鏡 (SPT) により2,500平方度の観測で700弱の銀河団 ($z \leq 1$) が発見されています¹⁰⁾。アタカマ宇宙論望遠鏡 (ACT) では750平方度で50個弱の銀河団が発見されています¹¹⁾。なおSZ効果を用いた銀河団探査は活動銀河核

(AGN) の電波放射の影響を受ける可能性もあります。光学望遠鏡による銀河団探査は、古くは写真乾板の時代からエイベル銀河団¹²⁾ などが挙げられます。ここ数年では、約1万平方度にわたるスローンデジタルスカイサーベイ (SDSS) のデータを用いて約2万5千個の銀河団 ($0.1 \leq z \leq 0.6$) が¹³⁾、ダークエネルギーサーベイ (DES) によって約300平方度で700強の銀河団 ($0.2 \leq z \leq 0.8$) が発見されています¹⁴⁾。これらは写真乾板のように目で銀河団を発見するのではなく、銀河団の中にある赤い銀河の集団を機械的に発見する方法を用いています。HSC-SSPではどのように発展進歩したのかを2章で紹介したいと思います。赤い銀河とは星形成が止まった銀河のことを指していますが、星形成が起こっている銀河の色は青く観測されます。狭帯域フィルターを用いた、青い銀河と赤い銀河の両方の集団を探すユニークな銀河団探査については3章で紹介します。HSC-SSP以前では上述のようにX線、SZ効果、光学観測を通した銀河団探査が主流でしたが、HSC-SSPでは新たな銀河団探査を行うことができます。それは弱い重力レンズ効果を用いて質量だけを反映して銀河団を見つけ出す方法です。これはSu-prime-Camの時代から筆者の一人である宮崎ら

表1 主な銀河団探査 (観測手法, 探知に使う銀河団構成要素, サーベイ, 発見される銀河団の赤方偏移と数密度)。質量感度は赤方偏移に依存する手法があるため、ここでは発見される銀河団の数密度を参照しています。数密度が多いほど、おおむね質量の低い銀河団や高い赤方偏移まで探知できることを意味します。全天サーベイは銀河面などのマスク処理をしたあとの数密度を記述しています。

手法	観測する構成要素	サーベイ (年)	赤方偏移	数密度 (個数/deg ²)
X線	銀河団ガス	ROSAT (2004–2011) ^{6),7)}	$z \leq 0.4$	~0.05 (1,743/all-sky)
		XXL (2016) ⁸⁾	$z \leq 0.6$	~2 (100/~50)
SZ効果	銀河団ガス	Planck (2015) ⁹⁾	$z \leq 0.7$	~0.04 (1,227/all-sky)
		SPT (2015) ¹⁰⁾	$z \leq 1$	~0.06 (677/2,500)
		ACT (2016) ¹¹⁾	$z \leq 1$	~0.06 (44/755)
光学観測	銀河	Abell (1989) ¹²⁾	$z \leq 0.2$	(4,073/)
	赤い銀河	SDSS (2014) ¹³⁾	$0.08 < z < 0.55$	~3 (26,111/~10,000)
	赤い銀河	DES (2016) ¹⁴⁾	$0.2 < z \leq 0.8$	~3 (787/~300)
	赤い銀河	HSC-SSP/CAMIRA ¹⁷⁾ (2018; 2章)	$0.1 < z < 1.1$	~8 (~2,000/~230)
弱い重力レンズ	質量 (暗黒物質)	HSC-SSP/HSC-HSC (2018; 3章)	$0.4 < z < 1.7$	~10 (数百/27)
		HSC-SSP/WL ³³⁾ (2018; 4章)	$0.1 \leq z \leq 0.6$	~0.4 (65/~160)

が行っていた手法ですが、HSC-SSPで劇的な進展が得られました(4章)。HSC-SSPの登場により、十分な銀河団サンプルを構築できる銀河団探索の手法は各構成要素を観る手法に対して全部出そろったこととなります。それぞれの銀河団探索を表1にまとめますので、各章を読みながらHSC-SSPがいかにか有効なサーベイであるかを読者の皆様に認識していただけたら幸いです。また、発見された銀河団サンプルに対する銀河団物理の研究についても各章で紹介したいと思います。

2. CAMIRA

銀河団のきれいな画像を見てわかることは、銀河団の中には同じような色をもつ赤い銀河がたくさんあるということです。逆に言えば、同じような赤い色をもつ銀河がたくさん集まった領域を探せば、それが銀河団だということです。このような考え方で銀河団を探索する方法は赤色系列(red sequence)銀河団探索法と呼ばれていて¹⁵⁾、現在では可視撮像サーベイにおける銀河団探索の代表的な方法になっています。この方法で銀河団を効率よく同定できるのみならず、赤い銀河の色から銀河団の赤方偏移も精度よく見積もることができます。

HSC-SSPの初年度データにおいて、この赤色系列を用いた銀河団探索法の一つ、CAMIRA¹⁶⁾を用いた銀河団探索を行いました。この探索法はHSC-SSPの準備段階においてHSC-SSPチーム内で銀河団探索方法があまり整備されていないことに危機感を抱いた筆者の一人の大栗が半ば突貫工事的に(?)作ったものですが、スローンデジタルスカイサーベイ(SDSS)のデータに適用したところ、かなり効率よく銀河団を選び出すことができかつ赤方偏移の見積もりの精度も十分高いことがわかりました。

このCAMIRAをHSC-SSPデータに適用すれば銀河団サンプルが得られる、とすんなりいけばよかったのですが実際はさまざまなトラブルがあり

ました。HSC-SSPデータから銀河カタログを作成する部分は自動化されたパイプラインで行われますが、HSC-SSPがこれまでにない規模のサーベイであることもあって、事前に予想しなかったさまざまな問題が勃発しました。特に問題だったのが、銀河団中心部のような天体の密度の高い領域で天体の分離アルゴリズムがうまく働かずその結果測光の精度がととも悪くなる問題で、これはCAMIRAで選ばれた銀河団サンプルを精査している過程で発見された問題でした。ソフトウェアチームの協力によりこの問題を回避するための新しい測光データを足していただき、ようやくそれなりに満足できる質の銀河団カタログが作れるようになりました。

CAMIRAをおよそ230平方度のHSC-SSPデータに適用した結果、赤方偏移0.1から1.1まで約2,000個の銀河団サンプルを構築することができました¹⁷⁾。選ばれた銀河団を特徴づける量として銀河団銀河の数に相当するリッチネスがありますが、リッチネス15以上の条件で銀河団カタログを作成しました。例の一つとして図1に赤方偏移 $z\sim 0.3$ と $z\sim 1.1$ の銀河団の画像を載せています。銀河団の数密度から、このリッチネス15は質量でおおよそ 10^{14} 太陽質量に対応すると見積もられています。分光銀河サンプルやX線銀河団サンプルとの比較によって、CAMIRAによる銀河団サンプルの純度の高さや赤方偏移の精度の高さを確認できました。信頼度の高い可視銀河団サンプルの構築はSDSSでは特に赤方偏移0.3程度まで、ダークエナジーサーベイ(DES)でも赤方偏移0.7程度までに限られていますが、HSC-SSPの深い撮像によって赤方偏移1.1の遠方まで質の良い銀河団カタログを構築できることがわかりました。

現在このユニークな銀河団カタログを利用したさまざまな研究が進行中です。HSC-SSPの面積の広さからこれまでになかなか発見できなかった高赤方偏移の巨大銀河団を見つけつつあり、これから遠方巨大銀河団をより深く理解するためのX

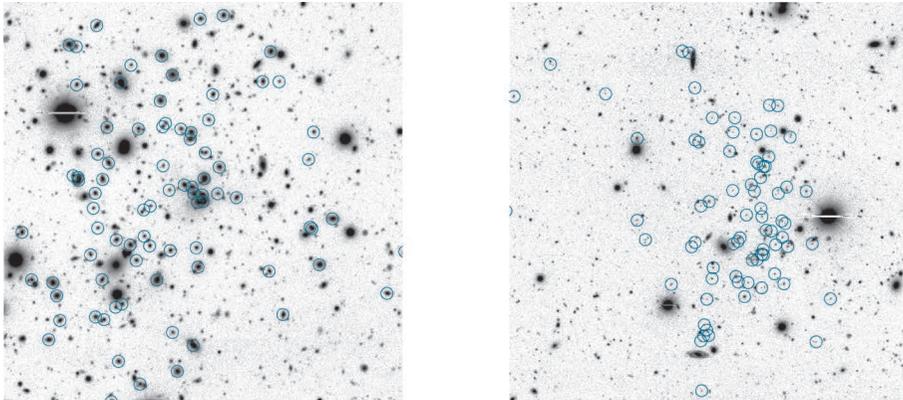


図1 CAMIRA アルゴリズムで発見された銀河団の例. いずれも $2' \times 2'$ の領域の画像で, 左図は赤方偏移 $z \sim 0.3$, 右図は赤方偏移 $z \sim 1.1$ の銀河団領域です. 青い円はメンバー銀河を示しています.

線, 電波, 分光の追観測が進行中です. またこの銀河団サンプルは強い重力レンズの探索にも活用されています¹⁸⁾.

また特筆すべきこととして, HSCの質の高い撮像データを利用することで, 銀河団内の銀河の分布や性質がどのように進化してきたかを, これまでにない精度で調べることができるようになりました. 例えばHung-Yu Jian氏, 西澤淳氏, Yen-Ting Lin氏らが主導して行った一連の研究によって, 銀河の赤方偏移と環境の両方の関数として銀河の星形成効率がどう変化するか¹⁹⁾, 赤い銀河と青い銀河の割合が銀河団中心から外側にかけてどう変化するか²⁰⁾, また銀河団の中心銀河の星質量が赤方偏移とともにどう進化したか²¹⁾といった問題にこれまでにない精度で答えることができました. これは深さと広さの両方を兼ね備えたHSC-SSPデータだからこそなし得た研究と言えるでしょう.

3. 狭帯域フィルターで探る遠方銀河団 (HSC-HSC)

銀河団は現在でこそ星形成活動が極めて低い早期型銀河(楕円銀河とレンズ状銀河)が占めていますが, 時代を遡るとそれらの銀河もまだ形成途上に差し掛かり, 星形成活動が活発な銀河団の割

合は急速に増えてきます^{22), 23)}. したがって遠方銀河団を探す際に, 前章のような方法で赤い銀河の集団だけを追いかけていたのでは星形成活動が低く古い銀河団を選択的に探していることになり, 星形成活動が高く若い銀河団を見逃してしまうこととなります. HSC-SSPのDeepとUltraDeepのサーベイでは広帯域の通常のフィルター(grizy)に加え, 複数の狭帯域でのフィルター(NB816, NB921他で, それぞれ8,160 Å, 9,210 Åを中心波長とし幅が100-150 Å程度)での深い撮像観測も行われています. これらの狭帯域フィルターで観測した銀河の等級は, 星形成銀河の電離領域から放出される各種の輝線(水素のH α 輝線や酸素の[O II]や[O III]輝線など)がたまたま入り込んだときに, 連続光を観測する広帯域フィルターに比べて相対的に明るくなります. したがってそのような銀河を探すことによって, それぞれのフィルターと輝線に応じた特定の赤方偏移にある星形成銀河を網羅的に探すことができます. この特徴を利用して輝線を放出する星形成銀河をさまざまな赤方偏移において探し同定し, そしてそれらが天球上で集中している場所を探すことによって, 星形成活動の高い銀河団候補を見つけます. この狭帯域による輝線銀河探索方法(line emitter法またはblue cloud法)と, 前章のよう

な赤く古い銀河の集団を探す従来の赤色系列 (red sequence) 法とを組み合わせることによって、さまざまな進化段階の銀河団を極力バイアスなく選出することができます。

筆者の児玉や小山らはこの二つの方法を組み合わせたハイブリッドな銀河団探査をHSC-HSCプロジェクト (Hybrid Search for Clusters with HSC) と命名し推進しています。現在精力的に遠方銀河団探査を行っているところですが、これまでに見つかった候補天体をいくつか紹介します。図3 (後述) や本HSC特集の銀河についての田中賢幸氏²⁴⁾の記事中の図にさまざまな赤方偏移にある輝線銀河 (星形成銀河) の天球上の分布の例を示していますが、このような分布図から銀河が特に集中している領域を探し出します。見つかった遠方銀河団候補の二つの例を図2に示します。一つは輝線銀河だけでなく赤い銀河も一緒に強く群れている領域で、古い銀河と形成途上の若い銀河とが共存している銀河団と考えられます。もう一方は輝線銀河では顕著な集中が見られるものの、赤い銀河は一般フィールド領域と変わらない

いほど少ないのが特徴的です。つまりこれは銀河団の進化段階が若く形成途上の銀河が占めていて、古い成熟した銀河はまだできていないものと考えられます。このような天体こそが従来の赤い銀河系列を用いた方法だけでは取りこぼしてしまう新種の面白い銀河団で、銀河団の形成過程とそれに連携した銀河の形成と進化を探るためには決して見逃せない貴重な天体です。

このように、HSC-HSCプロジェクトの重要な特徴として、狭帯域フィルターを用いることで銀河団に付随する輝線銀河を広い視野にわたって「漏れなく」選出できるという点が挙げられます。サーベイであることから幅広い領域のデータを取得ことができ、銀河団の中心部分だけでなくその周辺に広がるフィラメント状の大規模構造を一度に捉えることもできます。また、狭帯域フィルターのデータによって各銀河の輝線強度が直接測定できるため、これを星形成率に焼き直し、銀河の星形成活動がさまざまな環境下でどのような影響を受けているかを詳細に調べることができま

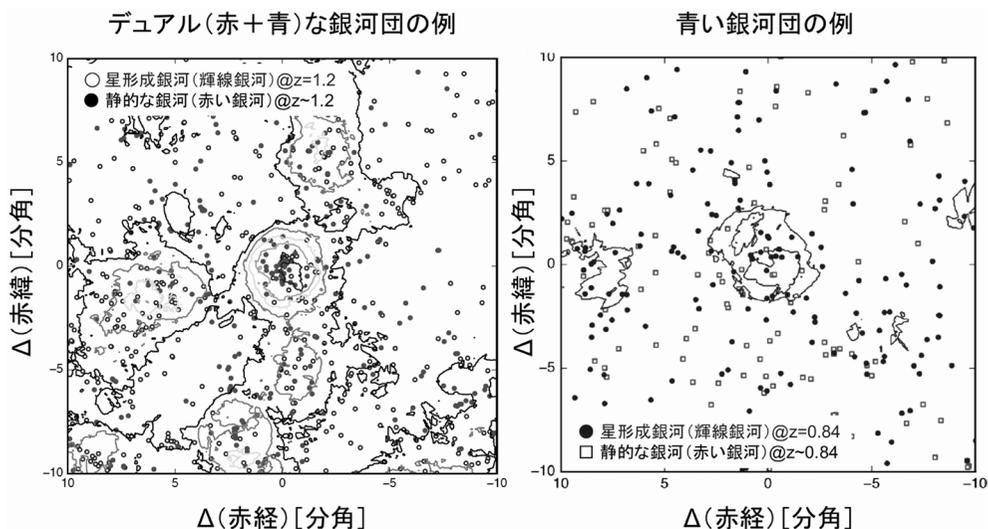


図2 HSC-HSCで見つかった二つの異なる性質の遠方銀河団候補の例。左の銀河団は輝線銀河 (星形成銀河) でも赤い銀河 (古い銀河) でも共に密度超過が見られる比較的成熟した銀河団であるのに対し、右の銀河団は輝線銀河では密度超過があるが赤い銀河では超過はなく、星形成活動が活発な進化段階の若い銀河団であると考えられます。

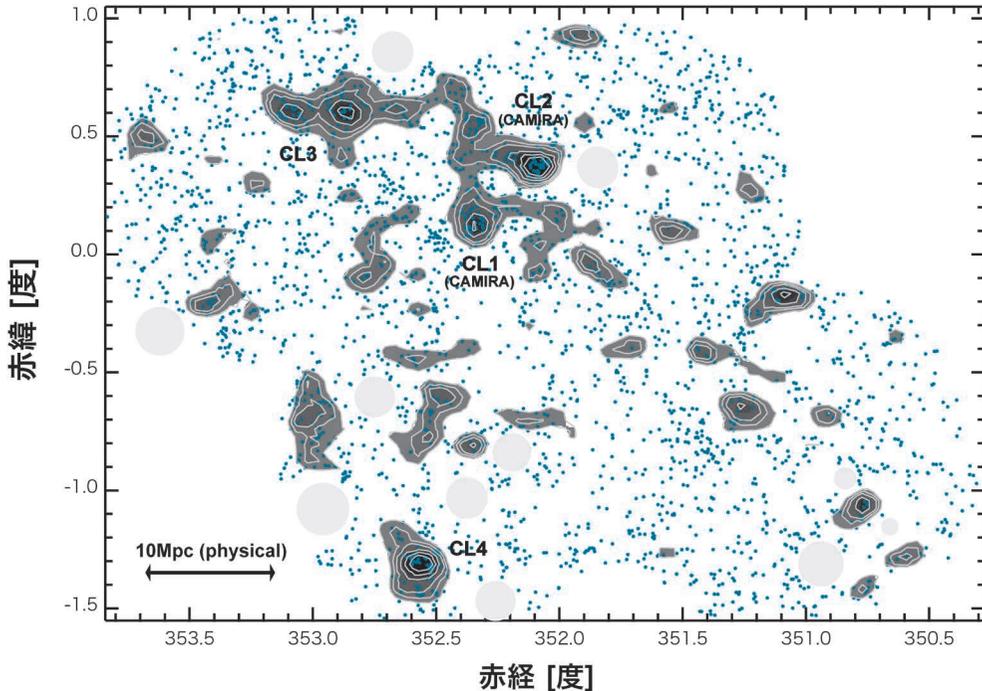


図3 HSC Deep領域の一つ、DEEP2-3領域に広がる赤方偏移0.4の大規模構造。測光的赤方偏移で選択された銀河の分布を等高線で、狭帯域フィルター(NB921)で選択された約3,000個のH α 輝線銀河を青い点で示しています。CL1/CL2と印をつけた二つの近接銀河団を中心に、サーベイ領域全体に広がる巨大な構造が見取れます。図中の薄い灰色の円は明るい星をマスクした領域。

この威力を実証するパイロット的研究として、HSC Deep領域の一つであるDEEP2-3領域に見つかった赤方偏移0.4の超銀河団を紹介いたします^{25), 26)}。

図3にはDEEP2-3領域において測光的赤方偏移で $z=0.4$ にあると期待される銀河の分布(等高線)と狭帯域フィルターで確認されたH α 輝線銀河(青点)をプロットしています。CL1/CL2と印をつけた二つの銀河団が中心に鎮座し(これらは上述のCAMIRA銀河団としても同定されています)、その周辺には約50メガパーセク以上に及ぶ巨大な構造が広がっています。この領域のH α 輝線銀河(約3,000天体)について詳細に解析を行ったところ、高密度環境の星形成銀河ほど色が赤く、星質量が大きく、また星形成率が高いという傾向が見えてきました。銀河団環境に赤い銀河(星形成をしていない銀河)が多く存在すること

は近傍宇宙ではよく知られた事実ですが、星形成銀河に限った場合でも同じような傾向があることがわかったのです。これは銀河団環境に進化段階の進んだ銀河が多く存在していることを示しており、銀河団という環境が銀河の進化(とりわけ銀河の星形成活動)を加速していることを間接的に示しているのかもしれません。

今後HSC-SSPの進行と相まってHSC-HSCもともに進展していき、最終的には27平方度にわたり $0.4 < z < 1.7$ の赤方偏移に数百個もの新しい遠方銀河団が見つかるかと期待しています。そしてこの大量の銀河団候補は、現在製作中のすばるの超広視野主焦点分光器PFS(Prime Focus Spectrograph)を用いて分光フォローアップ観測を行うことを計画しています。視野的にも戦略的にも極めて相性の良いパワフルな組み合わせです。で

すのでPFS-PFS (Panoramic Follow-up Spectroscopy with PFS for HSC-HSC) とシンメトリックにプロジェクトを命名し、相乗効果を狙いながら大々的に推進しようとしています。

4. 弱い重力レンズ信号で発見された銀河団

重力レンズによる光の屈折は背景天体の像をレンズの光軸から外側に押し出し、光軸を中心に描いた円の接線方向に像を歪めます²⁷⁾。背景天体とレンズが光軸上にそろえるなどの条件が整うと、円弧上に大きく引き伸ばされた天体像が観測されます。これを強い重力レンズ効果と呼びます。視線線にある銀河の質量が遠方のクエーサーの像を変形した結果観測されるアインシュタインリングはこの代表例です。一方、強い重力レンズ効果のような大きな像変形は観測されなくても、質量集積があれば背景の銀河は上記の変形を受けています。これを弱い重力レンズ効果とよびますが、多数の銀河の形状を平均して重力レンズ効果による変形量を推定します。変形量の2次元分布からレンズ天体の2次元質量分布を推定することが可能になります。

銀河団をレンズ源とした弱い重力レンズ効果を初めて観測したのは当時米ベル研究所にいたTony Tyson氏のグループ²⁸⁾です。口径4 mという大望遠鏡に高感度なCCDを搭載し、遠方の銀河の形状を精度よく計測することで初めて可能になりました。その後Nick Kaiser氏とGordon Squires氏²⁹⁾が2次元質量分布図を高速に計算する方法を提案しました。これらにより、銀河団中の物質の分布やその質量を、銀河団の力学状態や質量光度比を仮定をすることなくより直接的に調べることが可能になりました。

次にやってみたくなるのは、弱い重力レンズ効果を用いて物質地図を作成して、そこから逆に銀

河団を探すことです。この宇宙では光を出さない暗黒物質が光を出す通常の物質より7倍程度多いと思われていますから、光より質量を頼りに天体を探すほうが自然に思われるからです。当然ながらTyson氏のグループは取りかかっていた³⁰⁾。ただ、これを実際に行うのは困難でした。銀河団は希な天体ですから、それを探そうとすると、広い天域にわたって暗い銀河の形状測定を精密に行う必要があったからです。私たちのグループも、2001年に立ち上げつつあったすばる望遠鏡の主焦点カメラSuprime-Camで、そのGTO時間(装置開発者に与えられる観測時間)を使って銀河団探査を始めました³¹⁾。当時WMAP衛星が発表した σ_8 (物質分布のポワースペクトルの強度)が銀河団観測から推定されていた値より高かったため、光やX線では暗いが重い銀河団の存在が示唆されていたからです^{*1}。

すばるSuprime-Camは大口径・広視野・高い結像性能という特性を兼ね備えていて、弱い重力レンズ効果による銀河団探査に威力を発揮してくれました。8 mという大口径を活かして深く撮像し、形状測定に使える遠方銀河数の密度を上げれば、得られる物質分布図の解像度が上がるからです。実際、分光フォローアップによりそれまでに知られていなかった銀河団を発見し³²⁾、X線や光を用いた従来の手法と相補的であることを示しました。また、銀河団検出の精度を検証したりしてきましたが、宇宙論へのインパクトは限定的でした。観測する視野が20平方度程度と狭く、銀河団のサンプル数が少なかったからです。

そこで、Suprime-Camの後継機として、宮崎らはより広視野のHSCを開発することにしました。弱い重力レンズの観測をするには高い結像性能が重要です。視野を拡大しても結像性能を落とさないよう、光学系・機械系にさまざまな工夫が必要でした。その結果得られたHSC-SSPのデー

*1 その後WMAP衛星の σ_8 は下方修正されてしまい、その当時では銀河団観測との矛盾は解消しました。

々は極めてユニークなもので、銀河団を検出できる解像度を有する物質分布図(図4)では160平方度と世界最大のものが得られました³³⁾。物質分布図上のピークを第2章で述べたCAMIRA銀河団等を使って光学同定したところ、有意度(S/N)が5.1より高い39個についてはそのすべてに光学対応天体があることがわかりました。そのうち4個のピークについては二つ以上の銀河団が対応し、重力レンズ効果による銀河団探索では視線方向にたまたま重なったものもピークとして観測されていることを確認しました。光学対応天体がない最大ピークはS/N=5.06で、次に対応天体が見つからないS/N=4.77のピークとの間には18個のピークがあり、この間にあるピークにはすべて対応天体がありました。シミュレーションによると有意度5で偽のピークが得られる確率はあまり高くないはずなので、そのフォローアップ観測が楽しみな天体です。

また、ROSAT衛星で受かっている同じような

X線銀河団と本研究で発見された銀河団のX線光度を比べてみると、本銀河団はX線銀河団に比べ半分程度暗いことがわかりました。X線衛星XMM-Newtonで1万秒と比較的深く撮像した領域(XXLフィールド⁸⁾)をHSC-SSPでも観測しており、これまで出版されたXXL銀河団カタログにはない銀河団も検出されました。XXLの研究者の協力を得てその銀河団の性質の詳細を調べようとしています。

さらに、物質分布図上のピークはどのような質量や赤方偏移の銀河団が検出されるかといった選択関数の定義が容易で、宇宙論的シミュレーションとの比較の信頼性が高いことが知られています。私たちの今回の結果は、Planck衛星が2015年に公表している σ_8 ⁹⁾に基づくピーク予想よりは、統計的な有意度は限定的ではあるものの、数が少ないことがわかりました。「宇宙論は精密計測の時代に入った」と言われて久しいのですが、 σ_8 のような基本的なパラメータの計測にまだ決着

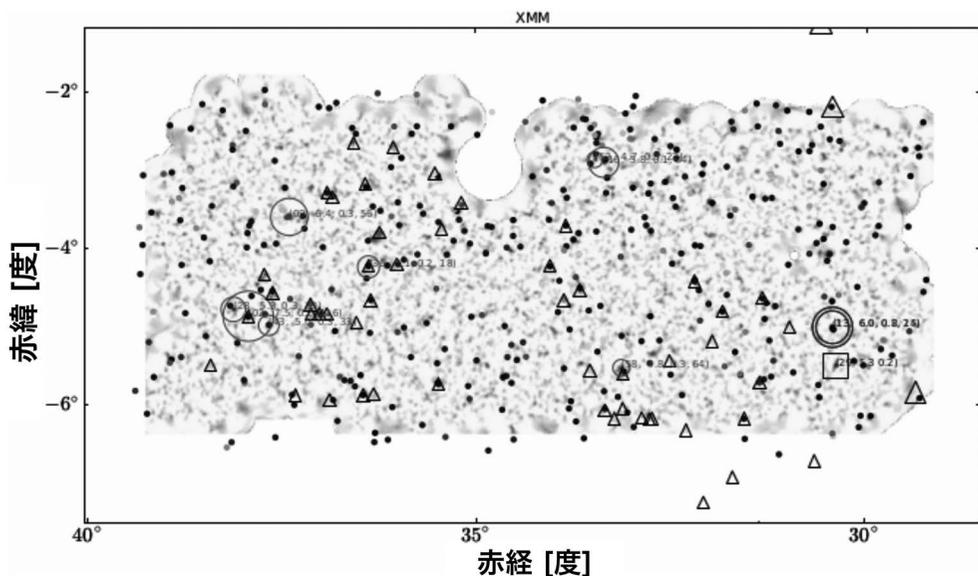


図4 質量分布図(XXLフィールド)³³⁾。背景マップが質量分布を表します。黒いほどS/N値が高いです。小さい点がCAMIRA銀河団、円がCAMIRA銀河団の質量分布のピークを表します。複数のCAMIRA銀河団とマッチしている場合は複数の円で表します。弱い重力レンズ銀河団がCAMIRA銀河団とマッチしない場合は四角で表します。大きい三角形がMCXC銀河団⁷⁾、小さい三角形がXXL銀河団⁸⁾です。

がついていないわけですから、いろいろとおもしろいことが残っていそうです。

弱い重力レンズ効果を用いて作られる物質分布図ですが、実は、分布のコントラストを示しています。物質が集中しているところはピークとして観測され、逆に少ないところは凹み（トラフと呼びます）が観測されます（背景銀河が接線方向ではなく、動径方向に向く）。これは大規模構造のボイドに対応します。実際には一つのボイドだけでは弱い重力レンズ効果で検出できるほどのトラフ信号を出せないことが知られていて、観測されているトラフは複数のボイドの視線方向上の重なりだと考えられています。私たちの分布図にも S/N 比が5を超すトラフが2個検出されていて、宇宙の低密度な領域の例を提供してくれました。低密度（で大スケール）な領域での一般相対論の検証など、宇宙論的にはおもしろい研究に使えると考えています。

また、私たちの2平方度にわたるGTO領域における質量分布図に興味をもったMargaret Geller氏のグループが、口径6.5 m望遠鏡の300天体同時分光器Hectospecを用いて、分光サーベイを行ってきています³⁴⁾。Hectospecによる分光サーベイはすばるなどの弱い重力レンズ探査と相性が良く、弱い重力レンズ源として質量分布図に寄与するほとんどの銀河の距離を測定することができます。銀河の三次元分布と質量を与えれば質量分布への寄与が計算できるので、銀河分布から予想される物質分布を構築することもできます。そして無バイアスな銀河分布から構築した物質分布を比べたところ、ピークに限らず全体的な構造やトラフの部分も含めて物質の分布がよく相関していることがわかりました。また物質の分布と銀河の分布の相関の程度は銀河の種類に応じて変化することもわかりました³⁵⁾。これらの共同研究はHSC-SSPにも引き継がれており、GTO領域を起点とした50平方度にわたる領域で観測が進んでいます。他にない高い解像度の質量分布図と

深い赤方偏移探査により、私達の銀河団カタログの検証、重力レンズピークの検証や、重力レンズ質量と力学的質量の比較等、研究の展開が期待されています。

弱い重力レンズ効果を最初に観測したTyson氏らもHSCより大規模なLSST計画を立ち上げ、私達を追いかけてきています。弱い重力レンズ効果に重要な結像性能がどこまで達成されるかはまだわかりませんが、設計どおりであればHSCの強力なライバルになることは間違いないでしょう。ここ数年が勝負のときです。

5. 多波長研究

銀河団の構成要素である暗黒物質、銀河団ガス、銀河の物理量を統計的に比較し赤方偏移依存性を調べることは銀河団の進化を知るうえで重要な情報になります。このような研究を多波長・多手法研究と呼び、現在では当該分野で標準となっているアプローチです。また、これらの研究の一部は銀河団を使った宇宙論パラメータへの制限への応用に使われたりします。

HSC-SSPでは先述のとおり銀河団の質量とメンバー銀河の星質量や光度を測定することができます。一方で、銀河団ガスの物理量はX線やSZ効果を通してのみ観測されます。そのため多波長研究には外部のX線データやSZデータの取得が必要不可欠になります。

私達はHSC-SSPの観測がスタートした時点で、特定の銀河団に対して深いX線データの取得が必要であると考えました。サーベイデータが十分出そろっていない段階でHSC-SSPのサーベイ領域内のX線データをどのように集めるかが課題になるのですが、まずはROSATで発見されたX線で明るい銀河団に対して静水圧平衡質量を測定することを目的にXMM-Newton衛星の観測提案を提出し、2期にわたってデータを取得しました。静水圧平衡質量を測定するためには、複数の半径でX線スペクトルの測定を行い温度を測定する必要

があるため、それなりの深いX線データが必要になります。そのため、すべての銀河団でスケージング則などを介さないで静水圧平衡質量を直接求めることはできません。X線で明るい銀河団を選択的に選び弱い重力レンズ質量と比較することで、乱流やバルク運動などに起因する静水圧平衡からのズレなどを精度よく検証することができます。XMM-Newton衛星の解析はX線バックグラウンドや粒子バックグラウンドが非常に複雑なため、それらを差分する方法ではなく、複数の半径でのスペクトルを同時フィットすることで観測領域に渡る複数のバックグラウンドをモデリングする手法が最新とされています³⁶⁾。これらの解析は容易ではありませんが、広島大学の学生の宮岡敬太氏が精力的に研究活動を行い、X線解析スクリプトXCASE (XMM Cluster Analysis Software with ESAS) を完成させました。同スクリプトは今後大量に出てくる銀河団を系統的に解析するための基本解析ツールとして、その後のHSC-SSPのX線研究にも採用されています。宮岡氏はHSC-SSPのデータを用いてガスフラクション(総質量に対するガス質量)やバリオンフラクション(総質量に対するガス質量と星質量)、静水圧質量質量と弱い重力レンズ質量の比などの研究を行いました³⁷⁾。

Elinor Medezinski氏はPlanck衛星で発見された銀河団に対して弱い重力レンズ質量とPlanck衛星のスケージング則を介した質量の比較を行いました^{27), 38)}。また、宮武広直氏はHSC-SSPのサーベイ領域とオーバーラップしているACTPol (ACTのアップデート版) で発見された銀河団に対して質量の比較(質量バイアス)を行いました³⁹⁾。これらのサンプル銀河団はまだ10個にも満たないため質量バイアスの精度はよくありませんが、今後サンプルが増えると十分な精度を得られる期待に満ちた結果となっています。なお、いずれの研究でも、弱い重力レンズ解析はRachel Mandelbaum氏ら弱い重力レンズワーキンググ

ループの形状測定カタログ⁴⁰⁾を用いて、銀河団銀河を除いたバックグラウンド選定⁴¹⁾を行っています。

多波長観測研究はこれだけにとどまりません。HSC-SSPのプロジェクトによって、高赤方偏移の銀河団、青い銀河団、弱い重力レンズで発見された銀河団など今までなかったユニークなサンプルがあります。これに対して、太田直美氏、三石郁之氏ら複数の日本のX線研究者を中心にX線フォローアップ観測と解析が進行中です。北山哲氏や岡部らによってALMA電波望遠鏡やグリーンバンク望遠鏡MUSTANG-2の高角度分解能のSZ観測なども進行中です。Yen-Ting Lin氏らによって銀河団銀河の可視光分光観測が行われる予定です。これらの多波長フォローアップ観測は各観測ターゲットができるだけオーバーラップするよう工夫しています。このように、新しく発見された銀河団に対してHSC-SSP銀河団チームメンバー各自のリーダーシップによって研究が行われております。また、新たにメンバーになった方々にも円滑かつ迅速に研究ができる土壌も整っていると考えています。

外部とのコラボレーションとして、25平方度ほどを共有するXXLプロジェクトとの共同研究も複数行っています。HSC-SSPとXXLとの共同会議はすでにマドリッドと広島で2回行われ、具体的に研究が進んでいます。また、XXLプロジェクトは2018年10月に、解析を拡張 $z \leq 1$ にある365個の銀河団発見の報告をしました⁴²⁾。

2019年3月打ち上げ予定のスペクトルXG (SXG) 衛星に搭載されるeROSTIAによる全天X線サーベイ(ドイツ側)との共同研究も行われる予定です。eROSITAは全天で10万個もの銀河団を発見するため、今後の研究が非常に楽しみです。また、ACTPolのSZ効果観測によって劇的にSZ効果銀河団の数が増えることが期待されます。ACTPolとHSC-SSPの共同研究も今後ますます活発になります。

このようにHSC-SSPサーベイの影響は可視光だけでなく、X線・電波と幅広いだけでなく、複数の巨大な国際共同研究にも発展してきています。これは日本人が第一線で研究活動を行うことができることを意味しており、非常に幸運なことと考えます。

競争相手であるDESやSPT-3G (SPTの最新版)も今後続々と銀河団を発見していきます。一時代前は代表的な銀河団に対しての研究が単発で行われてきましたが、研究の世界情勢は変わりつつあります。多波長・多手法のビッグデータを組み合わせることによって、銀河団の詳細な物理の解明、銀河団を用いた宇宙論パラメータへの制限、銀河団の探知方法によるバイアスなどの研究が今後精力的に行われるでしょう。

6. さいごに

HSC-SSPは、高赤方偏移や低質量銀河団まで含むCAMIRAカタログ、青い銀河を含むHSC-HSCカタログ、弱い重力レンズ信号発見された銀河団カタログと、他のサーベイが作ることが困難である三つのユニークな銀河団カタログを作ることができます。これらに基づいた新しい銀河団の側面に対して、私たちはさまざまなアプローチで研究を行ってきました。このような多様な先駆的研究はHSC-SSPがもつ広く深いサーベイデータの威力を物語っています。本稿はサーベイの初期成果についてレビューを行いました。今後も計画どおりにサーベイが進行し、さらに発展した研究成果を天文月報で報告できたらと思います。また本稿を読んで、まだ参加していない研究者や学生の皆様に興味をもっていただき、サーベイに積極的に参加していただけたら幸いです。

謝辞

本稿のHSC-SSPの科学的成果はHSC開発チームやソフトウェアチームなどのさまざまな研究者・技術者の粉骨砕身の努力・貢献によってもたらされたものです。ここで改めて感謝いたします。

参考文献

- 1) 高田昌広, 2008, 天文月報, 101, 756
- 2) 大栗真宗, 2011, 天文月報, 104, 30
- 3) 岡部信広, 2014, 天文月報, 107, 422
- 4) 岡部信広, 2018, 天文月報, 111, 18
- 5) 宮崎聡, 2018, 天文月報, 111, 168
- 6) Bohringer, H., et al., 2004, A&A, 425, 367
- 7) Piffaretti, R., et al., 2011, A&A, 534, A109
- 8) Pacaud, F., et al., 2016, A&A, 592, A2
- 9) Planck Collaboration, 2015, A&A, 581, A14
- 10) Bleem, L. E., et al., 2015, ApJS, 216, 27
- 11) Sifón, C., et al., 2016, MNRAS, 461, 248
- 12) Abell, G. O., et al., 1989, ApJS, 70, 1
- 13) Rykoff, E. S., et al., 2014, ApJ, 785, 104
- 14) Rozo, E., et al., 2016, MNRAS, 461, 1431
- 15) Gladders, M., D., & Yee, H. K. C., 2000, AJ, 120, 2148
- 16) Oguri, M., 2014, MNRAS, 444, 147
- 17) Oguri, M., et al., 2018, PASJ, 70, S20
- 18) 大栗真宗, 2019, 天文月報, 112, 167
- 19) Jian, H.-Y., et al., 2018, PASJ, 70, S23
- 20) Nishizawa, A. J., et al., 2018, PASJ, 70, S24
- 21) Lin, Y.-T., et al., 2017, ApJ, 851, 139
- 22) Butcher, H., & Oemler, A. Jr., 1984, ApJ, 285, 426
- 23) Shimakawa, R., et al., 2014, MNRAS, 441, L1
- 24) 田中賢幸, 2019, 天文月報, 112, 161
- 25) Koyama, Y., et al., 2018, PASJ, 70, S21
- 26) Hayashi, M., et al., 2018, PASJ, 70, S17
- 27) 梅津敬一ほか, 2019, 天文月報, 112, 117
- 28) Tyson, J. A., et al., 1990, ApJ, 349, L1
- 29) Kaiser, N., & Squires, G., 1993, ApJ, 404, 441
- 30) Wittman, D., et al., 2001, ApJ, 557, L89
- 31) Miyazaki, S., et al., 2002, ApJ, 580, L97
- 32) Hamana, T., et al., 2009, PASJ, 61, 833
- 33) Miyazaki, S., et al., 2018, PASJ, 70, S27
- 34) Kurtz, M. J., et al., 2012, ApJ, 750, 168
- 35) Utsumi, Y., et al., 2016, ApJ, 833, 156
- 36) Snowden, S. L., et al., 2008, A&A, 478, 615
- 37) Miyaoka, K., et al., 2018, PASJ, 70, S22
- 38) Medezinski, E., et al., 2018, PASJ, 70, S28
- 39) Miyatake, H., et al., 2018, arXiv180405873
- 40) Mandelbaum, R., et al., 2018, PASJ, 70, S25
- 41) Medezinski, E., et al., 2018, PASJ, 70, 30
- 42) Adami, C., et al., 2018, A&A, 620, A5

Studies of Galaxy Clusters using the Subaru HSC-SSP survey

Nobuhiro OKABE¹, Masamune OGURI², Satoshi MIYAZAKI³, Tadayuki KODAMA⁴ and Yusei KOYAMA⁵

¹*Department of Physical Science, Hiroshima University, 1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8526, Japan*

²*Department of Physics, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan*

³*National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

⁴*Astronomical Institute, Tohoku University, 63 Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8578, Japan*

⁵*Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan, National Institutes of Natural Sciences, 650 North A'ohoku Place, Hilo, HI 96720, USA*

Abstract: Thanks to a combination of the Subaru telescope and Hyper Suprime-Cam (HSC), the HSC-SSP survey enables us to observe unprecedentedly deep and wide Universe. The big data of the survey revolutionize studies of galaxy clusters. This article overviews three unique cluster-finding methods and their relevant physics revealed by the HSC-SSP survey.