

Suprime-Cam 革命！

弱い重力レンズ研究と銀河団多波長研究

岡 部 信 広

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

e-mail: okabe@hiroshima-u.ac.jp



すばる望遠鏡 Suprime-Cam (シュプリームカム) は弱い重力レンズと銀河団の研究を新たな時代へと導きました。その高い撮像性能と広い視野は、弱い重力レンズ研究を劇的に進展させ、銀河団の質量分布の測定をかつてない精度で達成させました。その変革は銀河団ガスを見る X線観測などに大きな影響を与え、Suprime-Cam で得られた弱い重力レンズ質量を中心とした多波長研究の発展へと導きました。本稿では、Suprime-Cam の弱い重力レンズ解析の歴史と功績を感謝を込めて振り返りたいと思います。

1. はじめに

すばる望遠鏡の旧主焦点カメラ・Suprime-Cam が現役から退く際にあたって、天文月報でその歴史や成果を特集することとなりました。弱い重力レンズ研究に関しては、私に白羽の矢が立ちましたので、責任を感じながら振り返っていききたいと思います。すでにいくつかの研究成果は、天文月報¹⁾⁻⁴⁾に報告されています。本稿では、重要な研究成果を網羅するよう努めますが、すでに月報で取り上げられた話題の詳細に関してはこの機会にホームページ等で読み返していただけたら幸いです。また、執筆の都合上、まだ取り上げられていない話題や私自身の研究を中心にほぼ時系列で話が進みますが、梅津敬一氏、高田昌広氏、二間瀬敏史氏、大栗真宗氏、宮崎聡氏、浜名崇氏らといった先駆的研究者の成果もあることを最初に言いつけたいと思います。

まずは、暗黒物質と重力レンズについて簡単にご紹介していきましょう。宇宙マイクロ波背景放射や銀河大規模サーベイなどの近年の観測から、現在の宇宙は、加速度膨張に関係するダークエネ

ルギーが約70%、目に見ることができない暗黒物質(ダークマター)が約25%、目に見えることができる通常の物質(バリオン)が約5%で占められていることが知られています。このように正体不明の未知の物質やエネルギーで宇宙は満たされていることがわかっていますが、宇宙の構造進化の解明には天体の詳細な観測が必要不可欠です。バリオンである分子雲、星、銀河、高温プラズマなどは、電波や光学、X線を通して古くから観測されています。一方で、暗黒物質の存在はバリオンを介した観測から間接的に示唆されてきました。例えば、銀河の回転曲線から見積もられた力学質量や銀河団ガスの静水圧平衡質量が実際に観測されるバリオン質量よりも大きいことなどが挙げられます。しかしながら、これらの観測では、力学状態の仮定を必要とし、目に見ることができない暗黒物質が具体的にどのように分布しているのかを明らかにすることができません。対象天体の力学状態を仮定せず、暗黒物質分布を復元することができる唯一の方法は、重力レンズ解析です。重力レンズ現象は、巨大な重力場の周囲の時空が曲がることにより、背景にある天体の像が

歪んだり、明るさが増したりするような現象です。光源の多重像を作るような現象を強い重力レンズ効果と呼び、銀河団の中心部などの密度の高いところで見られます。また、弱い重力レンズ効果と呼ばれる現象は、シグナルは弱いですが、宇宙の至るところで存在し、宇宙の暗黒物質の地図を描くことを可能にします⁵⁾。弱い重力レンズ観測による宇宙の暗黒物質分布の解明はすばる望遠鏡の Suprime-Cam が開拓し大きくリードしてきた観測分野と言っても過言ではありません。

2. Suprime-Cam 登場以前と以後

次に、弱い重力レンズ解析について、簡単に触れたいと思います。弱いシグナルの重力レンズ効果は、天体の背景にある銀河の形状をわずかに歪ませます。弱い重力レンズ信号を捉えるには宇宙最大の天体である銀河団が最も理想的なターゲットになります。歪みのパターンは、天体を中心に接線方向にコヒーレントに生じます。一方、背景銀河の本来の形の向きがランダムであると仮定すると、多数の銀河のアンサンブル平均を取ること、固有の形状の影響は無視でき、コヒーレントな方向に歪む重力レンズ信号が取り出せます。このことから、弱い重力レンズ解析には、「なるべく多くの銀河を観測すること」と「銀河の形の正確な測定」が必要であるという2点が重要であることがわかります。特に、レンズ信号を最ももっているような銀河の明るさは25-26等級程度で、赤方偏移 $z \sim 1$ 程度にある暗くて小さい銀河です。暗い銀河を効率良く観測するには、すばるのような集光力の高い望遠鏡が必要です。また、多数の銀河を一度に観測するのに広い視野が必要になります。銀河の形状である楕円率を正確に測定するには0.7秒以下のシーイングの良い観測条件も必要となります。口径8.2 mのすばる望遠鏡に搭載された Suprime-Cam は視野28分 \times 34分とほぼ満月の大きさをもつことから、弱い重力レンズ解析を行うのに最適な観測装置であるとわかります。

それでは具体的に Suprime-Cam 登場以前と以後でどれほど違うのかを見ていきましょう。

Suprime-Cam 登場前の弱い重力レンズ解析⁶⁾は口径2-3メートル級の望遠鏡を用いて、一つバンドで2時間以上の観測を行い、おおむね24-25等級までの銀河が観測されています。シーイングも0.8-1秒程度とあまり望ましくない条件で行われているのがほとんどです。特に0.8-0.9秒よりシーイングが悪くなると、私たちが使っている方法では形状測定の精度が急激に悪くなることが知られています。また、視野は7分 \times 7分程度の大きさで、赤方偏移 $z \sim 0.2$ 程度の銀河団の半分程度の大きさしか網羅できません。8メートル級の望遠鏡を用いても若干観測が行われていますが^{7), 8)}、背景銀河の数密度が1平方分当たり10個以下であったり、小さい望遠鏡のデータと組み合わせる必要があったりとの問題があります。何より視野が Suprime-Cam の約20分の1しかないという決定的な問題があります。また、ハッブル宇宙望遠鏡でも観測されていますが、Suprime-Cam の200分の1程度しか視野がなく、銀河団のごく中心部しか観測できません。

Suprime-Cam の場合、その広い視野と高い集光力のおかげで、30分程度の短い観測時間で $z \geq 0.2$ の銀河団のビリアル半径を1回で網羅できます。26等級までの銀河が簡単に撮像され、その数密度は1平方分あたりに30-40個にも達します。典型的なシーイングも0.7秒と形状測定に申し分ない条件になっています。また主焦点に設置される Suprime-Cam の撮像性能は中心部から視野の端まで高く維持されており、正確な形状測定に向いていることも特筆すべき特徴です。Suprime-Cam 時代のデータに慣れてしまうと、これが一般的になってしまっていて、その重要性を忘れてしまいがちになりますが、改めて振り返ってみると、Suprime-Cam が弱い重力レンズ研究の世界を劇的に変えたのかがわかります。これは、宮崎聡氏らをはじめとする開発チームの先見性や技術の高さを物語っ

ています。Suprime-Camによる一連の研究の変革を一言で表現しようと思ひ、本稿では“Suprime-Cam 革命”という言葉を採用させていただきます。

3. 東北大二間瀬研究室

Suprime-Camを使った弱い重力レンズ解析の歴史を振り返る際にやはり触れておくべきことがあります。弱い重力レンズの分野では東北大の二間瀬研究室出身の多くの宇宙論研究者が活躍されております。当時は宇宙論とすばる望遠鏡とはゆかりもなかったように思えますが、現在ではすばる望遠鏡を語るうえで切っても切り離せません。1995年に二間瀬先生（ここではあえて先生で呼びたいと思います）が弘前大学から東北大天文学専攻に移動され弱い重力レンズの研究を本格的に開始されました。また、同時期に赴任された服部誠先生が山田科学振興財団から支援をいただき、重力レンズで著名なピーター・シュナイダー氏、ジャンポール・クナイブ氏、ルードビック・ヴァン・ワエベク氏を東北大に招聘し、強弱重力レンズの基礎を勉強したと聞いております。今聞いても著名な研究者の方々を招聘されており、驚くべきことだと思います。その当時から、すばる望遠鏡のファーストライトを念頭に、弱い重力レンズの研究が二間瀬先生の指導の下で行われてきました。日本の早い時期から弱い重力レンズの研究を行ってきたことが、Suprime-Camを用いた弱い重力レンズ解析の成功に導いたと言えるでしょう。また、今や弱い重力レンズ解析は当たり前ものになっておりますが、初期運用の時代にはその意義や重要性が認識されていなかったことを振り返ってみると（若い学生さんは驚くかもしれません）、その先見の明には敬服するしかありません。

4. 衝突銀河団の暗黒物質分布とバリオン分布

さて、私がそもそも弱い重力レンズ解析をやり

始めたのは修士1, 2年頃に読んだ論文がきっかけとなっています。2000年以降にチャンドラX線衛星やXMMニュートンX線衛星の高い角度分解能で銀河団ガスの数々の複雑な構造が発見されました。特にコールドフロントと呼ばれる接触不連続面は温度が2倍程度違うガスがほぼ圧力平衡で接触しています。不連続面の厚さは平均自由行程程度と非常に薄いです。これをわかりやすく、地球に置き換えてみると、世界最高気温（57度）と最低気温（-93度）が金箔の厚さ0.001 mm程度で接触しているようなものです。このように、エントロピーの異なるガスが互いに接触していることがいかに不思議なことがわかります。同時に、銀河団ガスの不連続面を理解するのに力学状態の仮定を必要としない重力レンズ解析が必須であるのがわかります。その後、たまたま観測されていた有名な衝突銀河団である弾丸銀河団⁹⁾に最初の研究はやられてしまいましたが、2005年採択された最初のプロポーザルで銀河団構成要素の分布についての重要な研究成果がもたらされました¹⁰⁾。

私たちは、衝突前後のさまざまなステージにある七つの衝突銀河団をターゲットに選定し、銀河団成分である暗黒物質、銀河団ガス、銀河の分布の比較を行いました。弱い重力レンズから得られる質量分布はここでは各成分を区別するために暗黒物質分布と呼びます。銀河団同士が衝突する前は、互いに隣接した状態にあります。図1はそのような状態の典型である銀河団エイベル1750です。図では少し見難いですが、二つの銀河団のつなぎ目にもX線ガスの存在が確認されています。弱い重力レンズ解析から復元された暗黒物質分布は二つの銀河団を中心にピークをもち、互いをつないでいることがわかります。つなぎ目付近の銀河団ガスサブハローからのレンズ信号も捉えています。また、銀河団銀河の光度分布と比較すると両者が一致していることがわかります。本天体が銀河団間の質量ブリッジを捕らえたほぼ最初の例になります。次に、銀河団衝突をしているエイベ

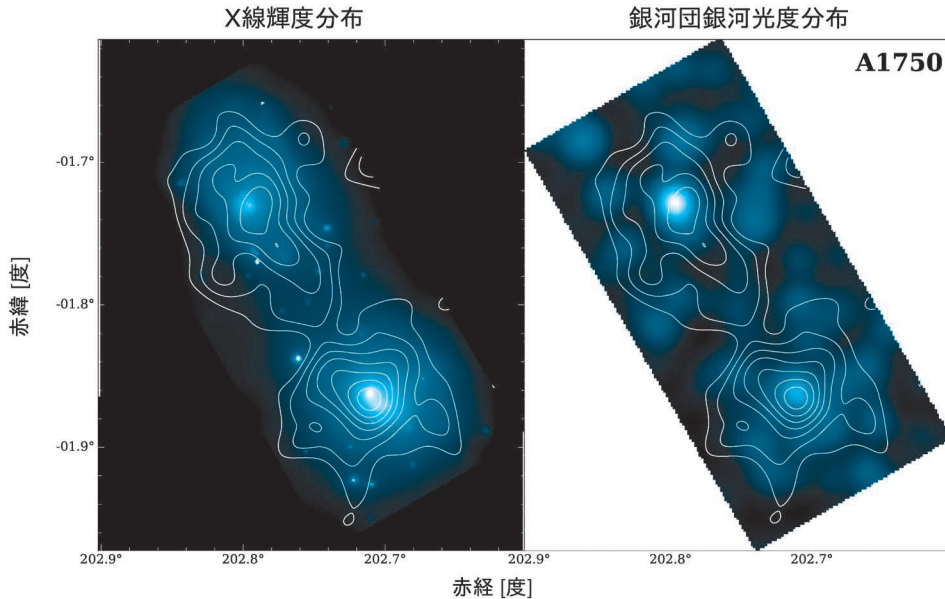


図1 双子銀河団エイベル1750 (A1750) のXMMニュートンのX線イメージ (左) と銀河団銀河の光度分布 (右). 等高線は暗黒物質分布を表します. 銀河団衝突前の状態で, 暗黒物質と銀河団ガス, 銀河分布が似ていることがわかります. 銀河団ガス密度や銀河光度は色が白いほど高く, 色が青いほど低くなります.

ル2034の場合です (図2). X線ガスのコアの北限にコールドフロントが存在します (点線). 銀河団ガスは比較的丸く分布していますが, 暗黒物質分布や銀河分布は複雑な構造を示しています. このように衝突銀河団では銀河団ガスの分布と暗黒物質・銀河分布が異なることがわかります. 特にガスハローを付随しない暗黒物質サブハローが確認されます. これは, 粒子の性質の違いからガスのサブハローの寿命が暗黒物質サブハローより短く, 落下中にガス構造が失われていることを意味します. 同時に暗黒物質サブハローの質量が小さく, 銀河団ガスが十分高温でポテンシャルに拘束されていないことを意味します. また, コールドフロントに近接する場所にガス構造を伴わない暗黒物質サブハローが確認されています. これはその後の観測で典型的なコールドフロント銀河団のすべてで確認される共通の特徴となっています¹¹⁾.

この研究が明らかにした銀河団構成要素の分布の関係は以下のとおりです. 1) 暗黒物質分布と銀河分布は力学状態に関係なく似たような分布を

示しています. 2) 銀河団ガス分布は, 衝突前では銀河・暗黒物質分布とおおむね一致していますが, 衝突中では一致していません. 3) 暗黒物質サブハローと本来そこに付随していたガス (サブ) ハローの関係は, 暗黒物質サブハローがガス進行方向前方に見られる場合と, 後方に見られる場合があります. これらは, それぞれ動圧やターンアラウンド時の遠心力によって暗黒物質サブハローのポテンシャルからガスハローが出たと推測されます. また, これらの条件に応じてガスハローが暗黒物質サブハローの中にとどまる場合や, 流体的不安定性などによってガスハローが壊れてしまう場合もあります. この研究はSuprime-Camを使った最初の系統的な弱い重力レンズ論文になります. また, その後も50個以上の銀河団を観測しましたが^{11), 12)}, 構成要素の分布は今までのところ本研究が発見した特徴に当てはまります. 衝突銀河団の弱い重力レンズ研究の解析方法は発展していき¹³⁾⁻¹⁵⁾, サブハローの質量の制限が可能になりました. また, より小さい暗黒物質サブ

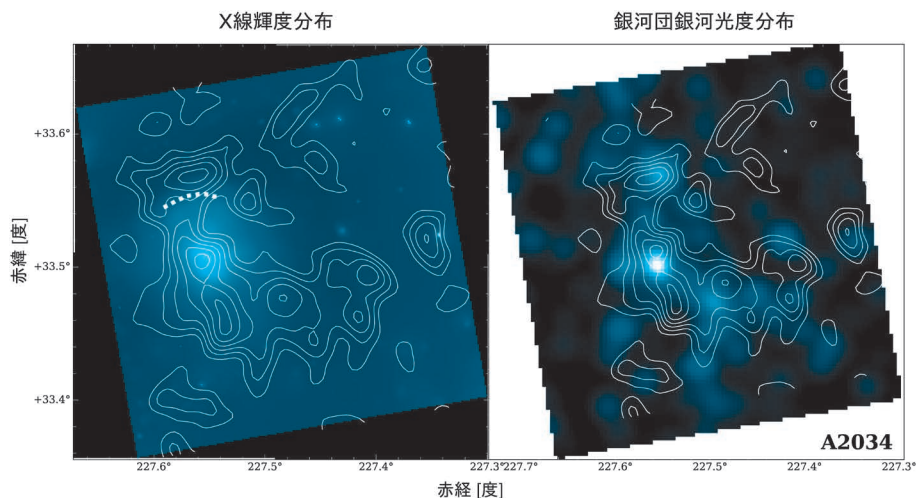


図2 コールドフロント銀河団エイベル2034 (A2034) のXMMニュートンのX線イメージ (左) と銀河団銀河の光度分布 (右). 等高線は暗黒物質分布を表します. 銀河団ガス密度や銀河光度は色が白いほど高く, 色が青いほど低くなります. コールドフロントの大きな位置を破線で表しています. 銀河団衝突中では, 銀河団ガスの分布が暗黒物質・銀河分布と異なります. 特に一つの暗黒物質サブハローを除いて, サブハローに付随したガスは見られません.

ハローを捉える新しいアイデアで, かみのけ座銀河団に応用し¹⁶⁾, 暗黒物質サブハローの質量関数の測定に成功しました. 同研究については天文月報⁴⁾をご覧ください.

5. さらなる系統的研究へ

先ほど紹介した衝突銀河団の論文の以前に重要な論文があります¹⁷⁾. 銀河団エイベル1689に対して, ハッブル宇宙望遠鏡の強い重力レンズデータとアーカイブデータを使って解析した弱い重力レンズデータを組み合わせて, 銀河団の中心部から外縁部までのレンズ信号を捉えた最初の論文です. 銀河団の質量密度プロファイルは, 数値シミュレーションから普遍的動径プロファイルをもつことが知られています. 発見者の名前からNFWプロファイル¹⁸⁾と呼ばれ, 中心部の質量密度は銀河団半径の -1 乗に比例し, その勾配は外側に向けて連続的に緩やかに変化します. 外縁部の質量密度は漸近的に -3 乗に近づきます. 質量密度の対数勾配が -2 となるハロー半径をスケール半径と呼び, スケール半径が小さいと銀河団の質量集

中度が高くなります. 同銀河団では質量に対して質量集中度が異常に高いことがわかりました. この論文が, さらなる系統的研究であるローカル・クラスター・サブストラクチャー・サーベイ (ローカス/LoCuSS) の研究につながります. 本研究の詳細については高田氏の天文月報記事をご覧ください¹⁾. またこの論文は, 銀河団銀河がレンズ解析のカタログに含まれると, 銀河団中心部のレンズ信号が過小評価されることを示し, 背景銀河の選定の重要性を認識させた最初の論文になります. このレンズ信号の過小評価はダイリュション効果と呼ばれ, 現在では銀河団の弱い重力レンズ質量測定で最も注意すべき項目となっています^{12), 19)}.

エイベル1689を先行研究に, イギリスパーミンガム大学のグラハム・スミス氏を研究代表者とした系統的多波長研究が行われ, 現在もプロジェクトは進行中です. 赤方偏移 $z \sim 0.2$ にあるX線で明るい銀河団80個を選定し, ささまざまな望遠鏡や衛星の特性と特徴を考慮して, 系統的に観測を行い, 多波長の物理量を比較する壮大な計画で

す。すばる望遠鏡Suprime-Camは弱い重力レンズ解析を行い、同プロジェクトの重要な役割を担っています。最初に高田氏、梅津氏、二間瀬氏の主導ですばるプロジェクトがスタートし、後に私が組み込まれた形になります。最初の論文は30個の銀河団で発表され¹¹⁾、2012年の欧文研究報告論文賞の受賞を受け、たいへん名誉な経験をしました。当時は手探りで解析手法を模索していましたが、その後研究が進み、この論文の問題点がわかってきました^{12), 19)}。一つは形状測定の問題でその後のシミュレーションデータでチェックを行うと、10-20パーセント程度、正しくないことがわかりました。また、等級と色の関係から銀河団銀河の一定の色幅を取り除いた銀河を背景銀河として扱いましたが、選定が不十分なうえに、青い銀河を含んでいることが結果に影響を与えていたことがわかってきました。2バンドを使った色等級図で描くと、明るい銀河団銀河と背景銀河の区別がはっきりするのに対して、弱い重力レンズ信号をもつ暗い銀河では区別がつきません。そこで、その後の研究で、色、測光赤方偏移、レンズ信号、銀河の位置の独立した情報をそれぞれ組み合わせ、定量的に背景銀河を選定する方法を開発しました。この方法により、背景銀河カタログに混入する銀河団銀河の割合を1%まで抑えるのに成功しました。仮に背景銀河の選定をしない場合では、中心部のレンズ信号はおおよそ40%も過小評価し、質量集中度も過小評価することがわかりました。なお、より低赤方偏移の銀河団では、このダイリューション効果は(無視できるぐらい)小さくなっていることもわかってきています^{16), 20)}。

最新の研究では赤方偏移 $z \sim 0.2$ にあるX線で特に明るい銀河団50個に対して研究を行い¹²⁾、質量と質量集中度の関係が得られました(図3)。質量と質量集中度には弱い相関関係があることが知られています。階層的構造形成モデルに基づけば、小さい構造が最初に形成され、より大きな構造が

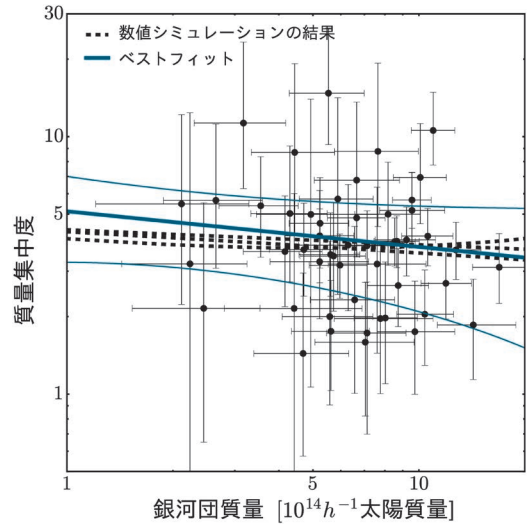


図3 質量-質量集中度の関係. 赤方偏移 $z \sim 0.2$ にある50個の銀河団の結果(実線)と数値シミュレーション(点線)が一致していることがわかります。

その後形成されます。銀河団の核になる密度はそのときの宇宙の臨界密度に比例しますので、宇宙が小さかったころの核のほうが密度が高くなります。そのため、質量が小さいほど質量集中度が大きいという関係が得られます。しかしながら、5年以上前では、異なる数値シミュレーションで異なる質量-質量集中度の関係が報告されていました。これらは主に、宇宙論的 N 体シミュレーションにおける大質量ハローの統計的問題と、宇宙論パラメーターである質量密度パラメーター Ω_m と半径 $8 h^{-1} \text{ Mpc}$ で平均化したときの密度揺らぎ σ_8 の違いに原因がありました。近年の宇宙マイクロ波背景放射の観測や大規模シミュレーションによって質量-質量集中度の関係を正確に予言することが可能になり、異なるシミュレーションでも同様な結果が報告されてきています。これを私たちの観測結果と比較すると、一致していることがわかります。紆余曲折ありましたが、ようやく理論と観測が一致するようになりました。また、50個の銀河団のレンズ信号を合成したプロファイルを見るとレンズ信号は綺麗な湾曲したプロファイル

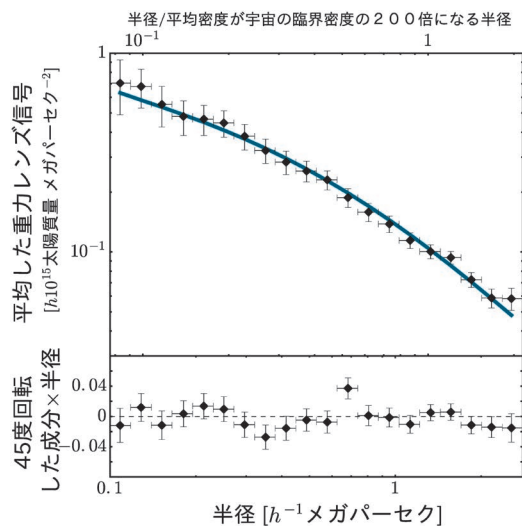


図4 上パネル: 赤方偏移 $z \sim 0.2$ にある50個の銀河団の平均的レンズ信号. レンズ信号は綺麗な湾曲したプロファイルをもち, NFWモデルやEinastoモデルなどでよく記述されます. 下パネル: 45度回転した楕円率の成分に半径を掛けた値で, ゼロと一致しており, レンズ信号をもたないことがわかります.

を持つことがわかります (図4). これは暗黒物質ハローの密度プロファイルがNFWモデルやアイナスト (Einasto) モデルでよく記述されることを意味します. アイナストプロファイルは質量密度の半径に対する勾配が, 半径のアルファ (α) 乗で記述されます. このアルファをシェイプパラメーターと呼んでいます. アイナストプロファイルは近年の高解像度の数値シミュレーションでハローの質量プロファイルをより精度よく表すことがわかってきました²¹⁾. NFWモデルに比べパラメーターが一つ増え, レンズ信号の計算では数値積分が必要となることから, NFWモデルのようなお手軽感はありませんが, ハロー質量プロファイルのさらなる観測的検証への第一歩になります. シェイプパラメーターと銀河団質量には緩やかな関係があることが知られ, 同研究では, 観測結果との比較検証を行いおおむね一致していることがわかりました (図5).

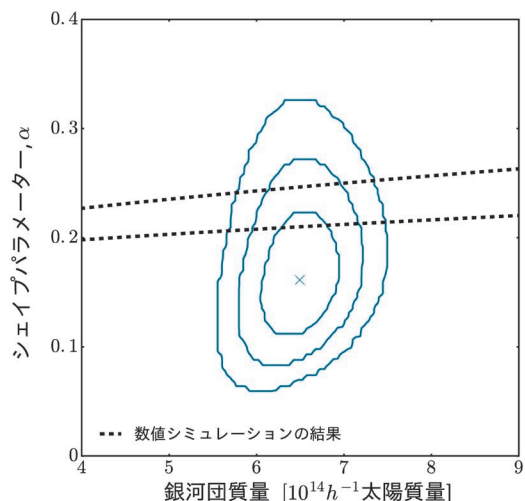


図5 銀河団質量とシェイプパラメーターの関係. 破線は数値シミュレーションの結果. 等高線は1, 2, 3シグマを表します.

系統的な多波長研究はローカスだけではありません. 高角度分解能をもつハッブル宇宙望遠鏡と広視野Suprime-Camを組み合わせたクラッシュ (CLASH)²²⁾ プロジェクトでは, 梅津氏の下で20個の銀河団の質量プロファイルの精密測定が行われました. 質量-質量集中度の関係などはローカスと矛盾のない結果が得られました.

また, ハローは完全に球対称ではなく, 3軸不等であることが数値シミュレーションで広く知られています. 大栗氏は先駆的に先ほどのエイベル1689に対して3軸不等モデルの検証を行いました²³⁾. また, 画期的な方法論を開発しローカスの30銀河団を用いて, ハローの楕円率が理論予言と一致することを発見しました²⁴⁾. 同研究については天文月報の記事にもありますのでご覧ください²⁾. その後も大栗氏はスローンデジタルスカイサーベイで発見された強い重力レンズをもつ銀河団のサンプルに対して系統的な強弱重力レンズの解析を行いました²⁵⁾. 3軸不等モデルの検証はその後も方法論が進歩しています²⁶⁾.

6. X線観測へのインパクト

Suprime-Cam の影響は光学観測分野だけにとどまりません。弱い重力レンズ効果で観測された質量と銀河団ガスのX線観測量やスニヤエフ・ゼルドビッチ効果の観測量との比較などが活発に行われています^{10), 13), 14), 20), 26)-33)}。静水圧平衡質量と弱い重力レンズ質量の比較は、銀河団ガスの非熱的圧力を間接的に制限します。また、ガスの観測量と弱い重力レンズ質量の関係性は、暗黒物質優勢の環境下で銀河団ガスがどのような状態にあるかを教えてくれます。Suprime-Cam による弱い重力レンズ質量は銀河団研究において世界的にも中心的役割を担っており、Suprime-Cam 革命が銀河団多波長研究の新しい扉を開いたと言えます。

本稿では、特に日本のコミュニティへの影響をご紹介しますと思います。すぐくX線衛星の低く安定したX線バックグラウンドは、銀河団外縁部からの淡いX線放射の観測を可能にしました。チャンドラやXMMニュートンなどは銀河団のピリアル半径のおよそ半分程度までしか観測することができません。これは体積の約80%からのX線放射をまだ捉えていないことを意味しています。すぐく衛星の外縁部観測の結果についてはすでに天文月報で報告されています^{3), 34)}。Suprime-Cam の退役に際し、その後の進展をご報告させていただきます。すばる望遠鏡Suprime-CamとすぐくX線衛星のデータを組み合わせた研究には観測戦略、データの解釈などにおいてさまざまなメリットがあります³⁾。特に、弱い重力レンズ質量は得られたX線観測結果を適切に取り扱うことを可能にします。銀河団の外縁部はその周囲の大規模構造から常に物質が降り注いでいます。そのため、落ちてきた物質によって巨視的な運動や乱流が誘発され、外縁部での非熱的圧力が無視できない可能性があります。私たちは、銀河団の冷却コアを除いた領域から外縁部までのX線観測量のプロ

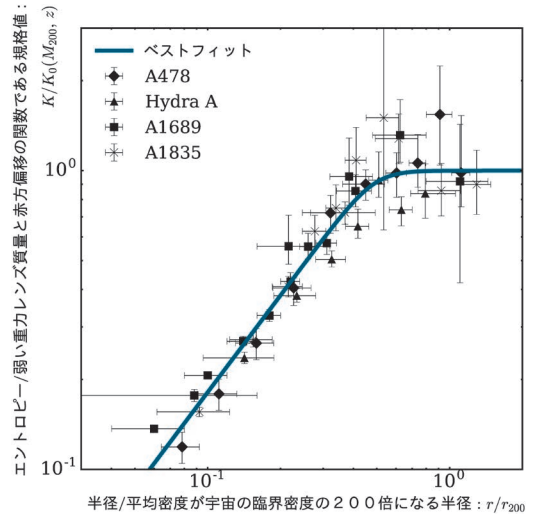


図6 弱い重力レンズ質量から得られる値で規格化したエントロピープロファイル。銀河団外縁部からエントロピーが平坦になっていることがわかります。

ファイルを弱い重力レンズ質量を用いてフィッティングを行いました。両者の物理量を同時に取り扱うことで、銀河団ガスがもつ普遍的動経プロファイルの兆候が見えてきました³⁵⁾。図6は四つの銀河団に対して、銀河団の弱い重力レンズ質量で計算される値で規格化したエントロピープロファイルになります。同様に、温度や密度プロファイル調べてみると、エントロピーの平坦性はつぶつぶのガスハローによる密度超過が原因ではなく³⁶⁾、急激な温度低下が原因であることがわかりました。これは、大規模構造からガスが落ちてくる際に起こる熱化効率が外縁部では中心部と異なり、小さくなっていることを示唆しています。同時に、質量などの特性の異なる銀河団に対しても普遍的に起こっていることが示唆されます。重力レンズ質量を支えるのに必要な外縁部の圧力は、熱的圧力だけでは足りず、非熱的圧力が必要になることを意味しています。しかしながら、どうして熱化効率が外縁部で変わっているのか理論的理解はいまだ十分ではありません。

このように、日本の資産資源を最大限活かすこ

とができたのは、Suprime-Cam やすぎく衛星の性能もさることながら、日本の銀河団コミュニティの連携性の強さを物語っています。

7. さいごに

以上のように、Suprime-Cam 革命は弱い重力レンズ研究と銀河団の多波長研究の劇的な進展をもたらしました。すばる・Suprime-Cam 以前では海外チームが研究の最先端を走っていましたが、登場以後では日本人がその一角を担い、Suprime-Cam が常にその中心にいるようになりました。本稿を読んで“革命”という言葉が決して過大評価ではないことを読者の皆様に共感していただけると幸いです。

さいごに、研究成果では触れることができなかった観測での思い出を話したいと思います。弱い重力レンズ観測ですばる望遠鏡やヒロ観測所を年1, 2回訪問する機会に恵まれました。観測している当初は一晩の観測のために5日ぐらい費やすのが辛かったのですが、後継装置である Hyper Suprime-Cam (HSC; ハイパーシュプリームカム) の時代ではリモート観測が多く、訪問できなくなると、逆に寂しい思いをする心理の不思議さを実感しています。最初は、光学観測には縁もゆかりもなく、どのように観測しどのように解析するのか知らなかったので東北大の先輩方に質問した記憶があります。何もわかっていない素人でも、まるでデジカメを押すような感覚で、すばるの観測を行えたことは、観測所の設備や開発チームの技術力の高さ、そしてサポートアストロノマーの親切なサポートのおかげだと感謝しております。観測中では、弱い重力レンズ解析に適した観測データを撮るために、すばやく正確にフォーカスパラメーターを決めたり、常に落ちてくるデータ画像を見ながら、「シーイングが良いな〜」「人工衛星がいると面倒くさいな〜」と一つひとつチェックしていたのもよい思い出です。山頂では簡単な算数ができなくなったり、頭痛がした

り、食事が不味かったりと、体力がいる仕事を経験させていただきました。一般講演をする機会が最近増え、このような話をすると楽しそうに聞いていただけるので、辛い思い出は役に立っています。記念として、山頂で酸素を吸って疲れ果てている姿を本稿の顔写真にしたいと思います。

現在、1,400平方度もの広い領域をHSCを用いてサーベイ観測する戦略枠観測プログラム(HSC-SSP)が進行中です。1,400平方度は視直径0.5度の満月の大きさの約7,100倍にも達します。HSCはSuprime-Camの約7倍もの広い視野をもち、効率よくサーベイを行うことができます。本稿では弱い重力レンズ効果を用いた銀河団研究に焦点を置きましたが、弱い重力レンズを用いた本格的な宇宙論研究や銀河団探査・銀河団研究の時代の幕が開けます。いずれもSuprime-Camの時代から行われてきた重要な研究^{5), 37)}ですが、今後数年で、量的にも質的にもSuprime-Cam革命が起こした以上の変革がもたらされます。Suprime-Camの時代では、共同利用を通して観測していたため限られた天体しか観測できませんでしたが、サーベイによる宇宙探査は光学データや弱い重力レンズ質量マップを使って銀河団を系統的に発見することができます。また、Suprime-Cam時代では観測時間の制限より、せいぜい2バンドか3バンドの観測が現実的でした。しかしHSC-SSPは5バンドで観測を行うため、測光赤方偏移を精度良く測定できます。今まで知られていたよりも2桁も数が多い銀河団に対して研究を行うことができます。これにより、Suprime-Camでは成し遂げられなかった研究の多くを行うことができます。また、第二次Suprime-Cam革命とも呼べるHSC革命に歩調を合わせるように、ヨーロッパとロシアが打ち上げ予定のX線サーベイ観測衛星やスニヤエフ・ゼルドビッチ効果による銀河団探査が進行中です。大規模、高品質の多波長ビッグデータに基づいた銀河団研究がますます盛んになるでしょう。同時に国際協力がさらに重要になってきま

す。ごく近い将来、「ワシの若い頃には50個の銀河団で研究しとっての〜」「え〜。そんな少ない数で何がわかるんですか〜?」のような会話が交わされる時代が訪れるでしょう。

科学進歩の歴史に埋もれる研究の1ページに名前を連ねられたことの幸運とその記憶を残す本稿の機会に感謝つつ、少しでも銀河団や宇宙の進化の理解が深まるように、今後も次の時代への研究に邁進する決意を胸に本稿の筆を置きたいと思えます。

謝 辞

本稿の私に関係する主な科学的な内容は、梅津敬一氏、高田昌広氏、二間瀬敏史氏、グラハム・スミス氏との共同研究に基づいており、感謝いたします。Suprime-Camの開発チーム、サポートアストロノマーの方々に改めて感謝いたします。また、本稿を読んでコメントをくださいました梅津氏に改めて感謝いたします。執筆の機会を与えてくださった小宮山裕編集長に感謝いたします。

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) 川原田円, 岡部信広, 2011, 天文月報104, 118
- 4) 岡部信広, 2014, 天文月報107, 422
- 5) Miyazaki, S., et al., 2002, ApJ 580, L97
- 6) Dahle, H., et al., 2002, ApJS 139, 313
- 7) Cypriano, E. S., et al., 2004 ApJ 613, 95
- 8) Clowe, D., Luppino, G. A., Kaiser, N., Gioia, I. M., 2000, ApJ 539, 540
- 9) Clowe, D., Gonzalez, A., Markevitch, M., 2004, ApJ 604, 596
- 10) Okabe, N., Umetsu, K., 2008, PASJ 60, 345
- 11) Okabe, N., Takada, M., Umetsu, K., et al., 2010, PASJ 62, 811
- 12) Okabe, N., Smith, G. P., 2016, MNRAS 461, 3794
- 13) Okabe, N. et al., 2011, ApJ 741, 1160
- 14) Okabe, N., et al., 2015, PASJ 67, 114
- 15) Medezinski, E., et al., 2016, ApJ 817, 24
- 16) Okabe, N., Futamase, T., Kajisawa, M., Kuroshima, R., 2014, ApJ 784, 90
- 17) Broadhurst, T., Takada, M., Umetsu, K., et al., 2005, ApJ 619, L143
- 18) Navarro, J. F., Frenk, C. S., White, S. D. M. 1997, ApJ

490, 493

- 19) Okabe, N., et al., 2013, ApJ 769, L35
- 20) Okabe, N., et al., 2016, MNRAS 456, 4475
- 21) Gao, L., et al., 2008, MNRAS 387, 536
- 22) Umetsu, K., et al., 2016, ApJ 821, 116
- 23) Oguri, M., Takada, M., Umetsu, K., Broadhurst, T., 2005, ApJ 632, 841
- 24) Oguri, M., Takada, M., Okabe, N., Smith, G. P., 2010, MNRAS 405, 2215
- 25) Oguri, M., et al., 2012, MNRAS 420, 3213
- 26) Umetsu, K., et al., 2015, ApJ 806, 207
- 27) Umetsu, K., et al., 2009, ApJ 694, 1643
- 28) Zhang, Y.-Y., et al., 2010, ApJ 711, 1033
- 29) Okabe, N., et al., 2010, ApJ 721, 875
- 30) Kawaharada, M., et al., 2010, ApJ 714, 423
- 31) Marrone, D. P., et al., 2012, ApJ 754, 119
- 32) Donahue, M., et al., 2014, ApJ 794, 136
- 33) Smith, G. P. et al., 2016, MNRAS 456, L74
- 34) 松下恭子, 2016, 天文月報109, 7
- 35) Okabe, N., et al., 2014, PASJ 66, 99
- 36) Simionescu, A., et al., 2013, ApJ 775, 4
- 37) Hamana, T., et al., 2003, ApJ 597, 98

Suprime-Cam's Revolution of Weak Gravitational Lensing Study and Multi-wavelength Study of Galaxy Clusters

Nobuhiro OKABE

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

Abstract: The Subaru Prime Focus Camera (Suprime-Cam) installed on the Subaru telescope opened a new era of weak gravitational lensing and galaxy cluster studies. Its superb imaging quality and wide field-of-view made a tremendous progress of weak-lensing studies, which succeeded in measuring mass distributions of galaxy clusters with unprecedented accuracy. The Suprime-Cam's revolution made a significant impact on X-ray and other-wavelength observations of the intracluster medium and opened up multiwavelength studies of galaxy clusters on the basis of weak-lensing masses. In this article, we would like to look back on Suprime-Cam's history and achievements of weak-lensing analysis with gratitude.