

アルマ望遠鏡による5秒角 スニヤエフ-ゼルドビッチ 効果の銀河団観測



上田

北山

岡部

上田 周太郎¹・北山 哲²・岡部 信広³

〈Academia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics (ASIAA) 11F of AS/NTU Astronomy-Mathematics Building, No. 1, Sec. 4, Roosevelt Rd, Taipei 10617, Taiwan〉

〈²東邦大学 〒274-8510 千葉県船橋市三山2-2-1〉

〈³広島大学 〒739-8526 広島県東広島市鏡山1-3-1〉

e-mail: ¹sueda@asiaa.sinica.edu.tw, ²kitayama@ph.sci.toho-u.ac.jp, ³okabe@hiroshima-u.ac.jp

銀河団のスニヤエフ-ゼルドビッチ効果の観測は、X線観測とは相補的かつユニークな特性をもつ高温ガスの診断手段として、銀河団研究を大いに飛躍させると期待されている。本記事では、我々の研究グループによるアルマ望遠鏡を用いたスニヤエフ-ゼルドビッチ効果観測の一連の成果を紹介する。アルマ望遠鏡によって達成できた5秒角の高感度・高角度分解能観測により、我々は赤方偏移 $0.45 < z < 1.1$ の4つの銀河団の高温ガスの圧力分布を詳細に測定した。干渉計観測の弱点を補いつつ、他の波長の高角度分解能のデータと組み合わせることで、銀河団ガスの熱力学的・運動学的特性の測定、暗黒物質の自己相互作用断面積やハッブル定数の制限などを成し遂げた。これらの成果の詳細とともに、スニヤエフ-ゼルドビッチ効果観測の高い潜在能力を議論する。

1. はじめに

物事を多角的に見ることは重要であると一般に認識されているが、銀河団はその良い例である。銀河団研究の歴史は可視光帯域の観測から始まり、もともとは数十から数千にのぼる銀河が密集した領域として同定されていた。銀河団が1つの天体として着目されるきっかけの1つが、今から50年以上前の、世界初のX線天文衛星 *Uhuru* による銀河団由来の拡がったX線の検出であろう [1, 2]。その後のロケット観測実験などによって、拡がったX線の起源は、温度 10^{7-8} 度で光学的に薄く、重元素を含む高温プラズマ（以下、銀河団ガス）による熱放射であることが判明した。銀河団内部には数十から数千の銀河だけでな

く、銀河団の重力ポテンシャルに束縛された銀河団ガスが銀河団内空間を満たすように存在している。本記事の主眼であるスニヤエフ-ゼルドビッチ効果は、*Uhuru*が発見した拡がったX線の起源が熱的なガスなのであれば、電波帯域で独立してその信号が観測できると理論的に予言されたものである [3]。つまりスニヤエフ-ゼルドビッチ効果は最初から多波長観測を念頭に置いていたことを強調しておきたい。

上記の銀河団ガスは、量的には銀河の総和の5倍程度にも及ぶ。つまり、「銀河団」という名称とは裏腹に、銀河はマイノリティーであり、ガス（および暗黒物質）の塊というのが銀河団の実体に近い。このため、銀河団研究にX線観測がよく用いられてきた。近年では、日米欧のX線天文衛

星「すぎく」、Chandra, XMM-Newtonが活躍し、特にChandraは $0''.5$ の角度分解能を達成してハッブル宇宙望遠鏡に迫る高画質のX線撮像を実現した。また「ひとみ」の非分散型のX線精密分光観測による銀河団ガスの動力学の初解明は記憶に新しい [4]。

だがX線観測には大きな弱点もある。銀河団ガスのX線放射の主なる成分は熱制動放射による連続X線スペクトルであることから、その強度は電子密度の2乗に比例する。そのためガス密度の高い銀河団中心領域では高強度のX線を放射するが、密度が中心に比べて数百分の1以下になる外縁部では非常に暗くなる。また、X線強度は赤方偏移に対し $(1+z)^{-4}$ の依存性を持つことから、遠方に向かって急激に暗くなってしまふ。遠方銀河団($z \geq 1$)は、大規模構造形成の過程を解明するのに理想的な天体であるが、X線では超長時間観測なしには高品質のデータを取得できない。この大きな壁を打ち破れるのが、ミリ波・サブミリ波によるスニヤエフ-ゼルドビッチ効果の観測である。

2. スニヤエフ-ゼルドビッチ効果

宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic microwave background; 以下, CMB) の光子が銀河団ガスなどの高温プラズマガスを通過する際、電子によって逆コンプトン散乱を受けて、本来のスペクトルがわずかに高周波側にずれる (図1)。1970年前後にスニヤエフとゼルドビッチによって理論的に予測されたこの効果は、今日では(熱的)スニヤエフ-ゼルドビッチ効果 (Sunyaev-Zel'dovich effect [3]; 以下, SZ効果) として知られている。SZ効果はX線観測とは相補的かつユニークな特性をもつ:

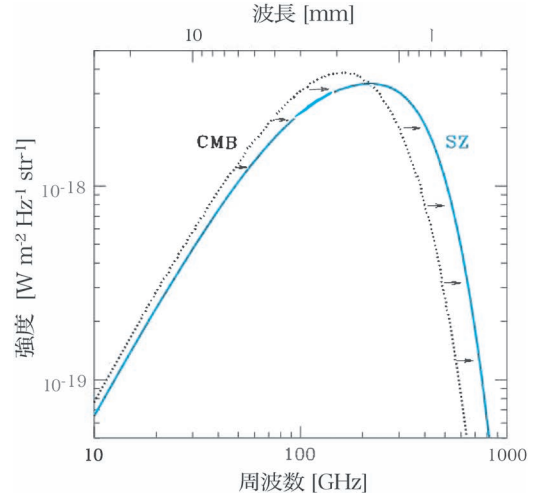


図1 SZ効果によるCMBスペクトルのずれ。見やすさのため、ずれの大きさを実際の100倍程度に拡大している。

- SZ効果の強度は高温ガスの圧力に比例する。これはX線強度が密度の2乗に比例することと相補的である。そのため銀河団外縁部の観測がX線に対し相対的に有利になる^{*1}。
- SZ効果は2つのスペクトルの特徴を持つ。218 GHz以下ではCMBに対して相対的に輝度の低い負の信号となり、218 GHz以上ではCMBに対し輝度の高い正の信号となる (図1)。広がった天体由来の信号が負の信号として観測されうるといのは非常にユニークであり、実際の観測において強みとなる。
- 観測されるSZ効果の強度は、見かけ上赤方偏移によらない。X線強度が $(1+z)^{-4}$ で減衰することから、SZ効果は遠方銀河団の観測で非常に有利となる。
独特の性質を持つSZ効果ではあるが、信号そのものの大きさが微弱であるために、そのポテン

^{*1} X線放射もSZ効果も同じ銀河団ガス由来であるが、X線強度は銀河団ガスの密度の2乗に、SZ効果は銀河団ガスの圧力に比例することから、互いに相補的である。銀河団の中心部に比べると、外縁部でのガス密度(n)は数百分の1以下に減少するが、温度(T)はおおよそ2分の1程度にしか低下しない。つまり、X線強度($I_X \propto n^2$)は4桁以上も弱くなる一方で、SZ効果の強度($I_{SZ} \propto nT$)の低下は2桁程度にとどまる。このため、外縁部を観測するには、相対的にSZ効果の方がX線観測よりも有利になる。

シャルを十二分に発揮するためには観測装置の発展を待たなければなかった。

3. ミリ波・サブミリ波による銀河団SZ効果観測の産声

SZ効果の観測は1970年代から行われていたが、当初は困難を極め、1990年代後半以降によく信頼度の高い測定が実現し始めた [5]。この時期に台頭してきた撮像観測には日本人研究者も深く関わり、先駆的な研究を遂行してきた [6]。例えば、全天で最も大きなSZ効果強度を示すRXJ1347.5-1145銀河団に対して、James Clerk Maxwell望遠鏡によるサブミリ波 (350 GHz) と野辺山45 m電波望遠鏡のセンチ波・ミリ波 (21と43 GHz) の観測を皮切りに [7]、野辺山45 m電波望遠鏡NOBA検出器を使った150 GHz帯域での観測では、13"という高角度分解能でSZ効果を撮像することに成功し、中心から南東方向に高温ガスが存在する強い証拠を初めて得た [8]。この南東方向のサブ構造はその後Chandraの観測によってX線で追認され、SZ効果観測の高い潜在能力とその重要性を示唆するものとなった。

一方で、2000年代後半からは、CMBの宇宙論観測に伴ってSZ効果による銀河団サーベイが精力的になされてきた。Planck衛星では、約10'の角度分解能で銀河面を除いた領域から1203個の近傍から遠方までの銀河団を検出した。また、地上観測では、約1'の角度分解能で、南極点望遠鏡 (South Pole Telescope; 以下、SPT) やアタカマ宇宙論望遠鏡 (Atacama Cosmology Telescope; 以下、ACT) によって、現在までに4000個以上の銀河団がSZ効果で発見されており、現状のサーベイ観測の1つの到達点となっている [9]。しかし、さらなる高感度・高角度分解能の観測の実現も望まれていた。電波干渉計による観測も行われていたが、感度の問題や干渉計特有の観測原理に付随する撮像の難しさなどがあり、それらを克服する必要があった。

4. アルマ望遠鏡の登場による革新的なSZ効果観測の進展

アルマ望遠鏡は、立地条件、観測周波数域、低ノイズ観測システム、12 m-Arrayと7 m-Arrayの相補性、高いuvカバレッジなどの多くの強みを持つ電波干渉計であるが、視野の狭さや短基線の欠如は、SZ効果のような広がった信号の観測には大きな弱みとみなされていた。そのため、当初、アルマ望遠鏡によるSZ効果観測には懐疑的な見方も多かった。しかし我々は、詳細なシミュレーション等に基づいて、ターゲット、観測周波数、アレイ配列、ポインティング方法、などを慎重に最適化した結果、これまでに観測提案が採択・実行された全ての天体に対して、高S/Nのデータを得ることに成功した。この章では、我々のグループによるアルマ望遠鏡による銀河団SZ効果観測の一連の結果を紹介する [10-13]。もちろん、他グループによってアルマ望遠鏡の性能を活かしたSZ効果観測 [14-16] が行われているのも強調しておきたい。

4.1 RXJ1347.5-1145銀河団

4.1.1 アルマ望遠鏡による初のSZ効果観測

我々はRXJ1347.5-1145銀河団をアルマ望遠鏡最初のSZ効果観測天体として提案を行った [10]。前述の通り、この銀河団は最もSZ効果強度の高い天体の1つである。過去のSZ効果観測やChandraの長時間X線観測のデータが存在することも重要であった。

我々はSZ効果をより効率よく観測するため、広がった信号に対する感度が最大となる92 GHzを採用した。12 m-Arrayと7 m-Arrayの組み合わせで銀河団中心とその周囲を7点観測し、直径約2'の視野を実現した。銀河団中心に存在し、SZ効果の強度を弱めてしまう電波銀河は長基線側のデータを使って位置とフラックスを測定し、uv空間でその寄与を除去した。このような解析が行えるのは干渉計の強みであり、1'以上の角度分解能の

CMB観測では困難であった。12 m-Arrayと7 m-Arrayのデータを組み合わせて、ビームサイズ5" FWHMのもとで結像させたSZ効果の画像を図2右下に示す。ノイズレベルは $0.017 \text{ mJy beam}^{-1}$ と非常に低く、SZピークは中心から南東の領域で、その強度 $-0.286 \pm 0.017 \text{ (stat.)} \pm 0.017 \text{ (sys.) mJy beam}^{-1}$ として観測された。中心から

南東方向にオフセットしたSZピークは、高温ガスが南東部に局在していることを強く示唆する。この構造こそ、野辺山45 m電波望遠鏡NOBA検出器で初検出されたものである。ビームサイズ5" FWHMという史上最高の角度分解能の観測により、初めてその正確な位置が判明した [10].

我々はこのSZ効果観測の信頼度をさらに高め

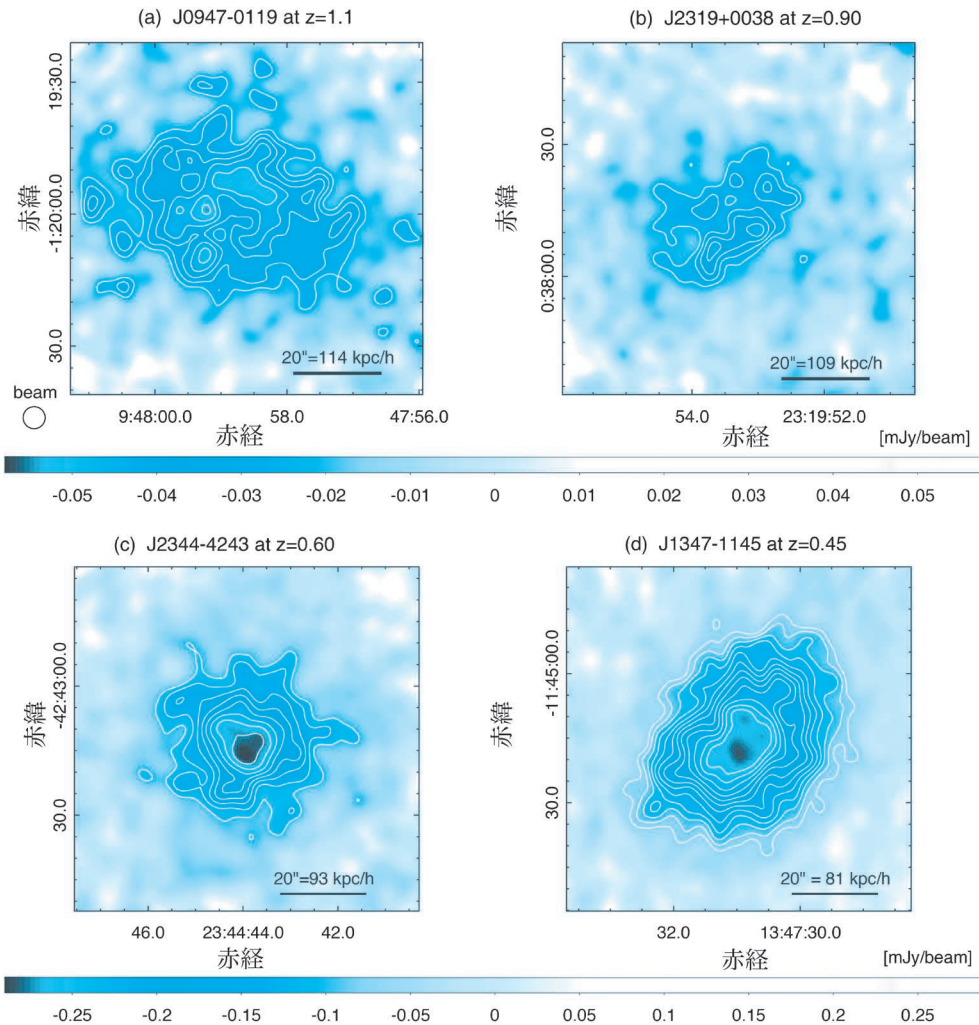


図2 アルマ望遠鏡による赤方偏移 $0.45 < z < 1.1$ の4つの銀河団のSZ効果の観測。点源を除去し、92 GHzで結像させてビームサイズが5" FWHMになるよう平滑化処理を行なっている。白色の等高線は、各観測でのノイズレベルの 4σ から 1σ 刻みのSZ効果の強度を示している。各パネルの天体名とノイズレベルは以下の通りとなる：(a) $z=1.1$ のJ0947-0119銀河団 ($1\sigma=5.9 \mu\text{Jy/beam}$)、(b) $z=0.90$ のJ2319+0038銀河団 ($1\sigma=5.9 \mu\text{Jy/beam}$)、(c) フェニックス座銀河団 ($z=0.60$, $1\sigma=25 \mu\text{Jy/beam}$)、(d) RXJ1347.5-1145銀河団 ($z=0.45$, $1\sigma=17 \mu\text{Jy/beam}$)。パネル (a) の左下の円はビームサイズを示し、各パネル中の黒線は $20''$ の空間スケールに対応する。

るべく、*Chandra*の長時間X線観測のデータを用いてアルマ望遠鏡による観測の検証と補正を行った。前述の通り、X線もSZ効果も同じ銀河団ガスを見ており、X線観測はSZ効果とは独立して銀河団ガスの密度や温度を測定することができる。X線スペクトル解析を行い銀河団ガスの圧力分布を見積もると、確かにSZ効果の観測と整合するように高温ガスが分布していることがわかった。アルマ望遠鏡の5秒角という角度分解能のおかげで、*Chandra*の測定と空間的に直接比較できるようになった。さらに我々は、X線で推定した圧力分布を元にしてアルマ望遠鏡の観測シミュレーションを行い、ミッシングフラックスの見積もりと補正を行った。ミッシングフラックスとは、干渉計の最短基線長よりも小さな空間周波数（すなわち、大きな空間スケール）の信号が失われてしまう問題であり、広がった天体ほど深刻になる。このミッシングフラックスを補正するためには、一般には同じ天体を単一鏡で観測するなどの措置が必要となるが、RXJ1347.5-1145銀河団のように高品質のX線データが存在する場合は、それを利用して評価できる。このように干渉計観測による系統誤差も補正して、我々はいよいよRXJ1347.5-1145銀河団のCompton γ パラメータの空間分布を測定した。Compton γ パラメータは、逆コンプトン散乱によるCMB光子のエネルギーの変化率を示したもので、図3の通り、オーダーは 10^{-4} と微弱ながらもアルマ望遠鏡ではその空間構造をきちんと分解して観測できている [10]。

4.1.2 多波長観測による銀河団物理の解明

アルマ望遠鏡によるSZ効果観測という新しい手段を得たことで、可視光帯域でのハッブル宇宙望遠鏡、X線帯域での*Chandra*の高画質画像と直接比較して議論できるようになった。RXJ1347.5-1145銀河団は、1990年代にX線天文衛星ROSATによって発見された当初は、十分に安定した銀河団とみなされていた。しかし、その後の野辺山でのSZ効果の観測以来、激しい銀河団衝突が起きて

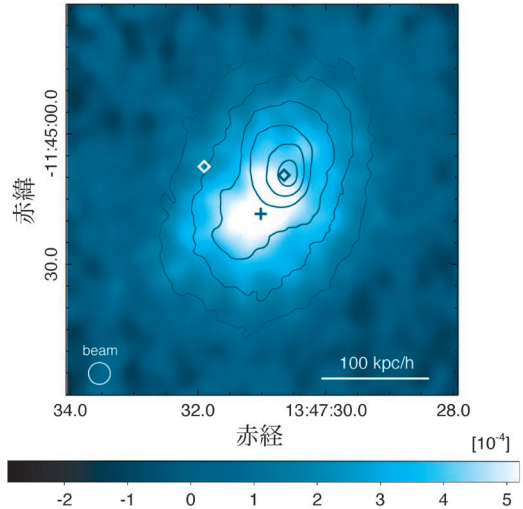


図3 アルマ望遠鏡によるSZ効果観測をもとに、*Chandra* X線データを用いてミッシングフラックスを補正し、相対論的補正も行った後のRXJ1347.5-1145銀河団のCompton γ パラメータの空間分布。青色と白色のダイヤモンドのマークは、重力レンズで測定された質量分布のピーク位置を示す。十字のマークはCompton γ パラメータのピーク位置を示す。黒色の等高線は*Chandra*によるX線表面輝度分布を示す。SZ効果でもX線でも南東方向に伸びた構造が見えている [10]。

いると考えられるようになった。可視光観測により、巨大な楕円銀河が銀河団の中心と東方向に2つ存在し、互いの赤方偏移の差がほぼない ($\Delta z < 100 \text{ km s}^{-1}$) ことから、衝突は天球面上で起きていると考えられる。しかしX線表面輝度は南東を除いて軸対称な構造を保っており、衝突銀河団でよく見られる複雑なサブ構造は見られない。そこで我々は、SZ効果、X線にハッブル画像による強い重力レンズ観測のデータを組み合わせてこの問題にせまった。

強い重力レンズ観測のデータを用いて質量分布を測定すると2つの成分が存在し、重い成分のピークは中心の巨大楕円銀河の位置、軽い側は東側の2つ目の巨大楕円銀河の位置と見事に整合していることがわかった [11]。重い側はメインの、軽い側は落下衝突中のサブの銀河団であろう。面

白いことにSZピークは2つ目の巨大楕円銀河の後方に位置している。これは、SZピークを作るような高温ガスは元々サブ銀河団に付随していたが、落下時に動圧によって剥がれ、さらに衝撃波によって高温に加熱されたことを示唆する。X線表面輝度の情報と合わせて、サブ銀河団は衝突初期の段階にあり、今まさに銀河団中心部をすり抜けようとしている可能性が高い。

また、我々はX線とSZ効果の画像解析からガスの運動状態を推定することに成功した。X線画像の中に見られる揺らぎは、基本的にはガスの密度揺らぎを見ていると考えられる一方、SZ効果の画像中の揺らぎは、圧力揺らぎに対応する。この密度揺らぎと圧力揺らぎの関係は、揺らぎガスの状態方程式から $w \equiv \Delta p / \Delta \rho$ で与えられ、ここで Δp は圧力揺らぎ、 $\Delta \rho$ は密度揺らぎ、 w は速度の2乗に対応する量となる。もしガスが圧力平衡を維持していた場合、 $\sqrt{w} \ll c_s$ となり（ここで c_s はガスの音速）、もし断熱的であれば $\sqrt{w} = c_s$ になる。我々のX線画像解析でこの銀河団は中心で渦巻構造を持つことがわかったため（渦巻構造については月報 [17] も参照のこと）、ガスが回転・運動状態にあることが示唆される。そこでこの手法を、銀河団中心と南東方向に適用したところ、中心では \sqrt{w} の上限値しか得られず、南東では逆に二億度の高温ガスの音速に近い \sqrt{w} の値を得た。この結果、中心では音速より十分に遅い速度でガスが運動し、一方で南東は衝撃波によって加熱されたガスであることがわかった。スペクトル解析とは独立してガスの運動状態を推定するこの手法は、Chandraとアルマ望遠鏡の高画質画像によって初めて成し遂げられるもので、今後の発展に期待がかかる。

我々はさらに、強い重力レンズ観測から得られ

た質量分布と、サブ銀河団から剥がれ落ちたガスの物理距離から、暗黒物質の自己相互作用断面積に制限を加えることに成功した。暗黒物質は、標準的な宇宙論モデルの枠組みでは自己相互作用しない粒子であると想定されているが、この枠組みを超えて自己相互作用の仮定を導入することで、標準的な宇宙論モデルの問題点を解決する理論的研究が精力的に進められている。そのため観測からこの断面積を制限することは重要である [18]（月報 [19] も参照のこと）。この手法は天球面上で衝突が起きている銀河団に用いないと測定に大きな不定性が生じる。その点でRXJ1347.5-1145銀河団は理想的である。我々は質量分布推定の不定性を考慮したうえで、この自己相互作用断面積の上限値 $3.7 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ （95%信頼度）を得た*2。

アルマ望遠鏡によるRXJ1347.5-1145銀河団のSZ効果の観測は、アルマ望遠鏡がコンパクトな銀河団のSZ効果観測にうってつけの望遠鏡であり、他波長のデータと組み合わせることで干渉計の弱点を補いつつ幅広いサイエンスを生み出せることを実証した。以降、アルマ望遠鏡の高い観測性能を存分に活かした研究が次々に繰り返されていく。

4.2 フェニックス座銀河団

フェニックス座銀河団はSPTのCMBサーベイの中でSZ効果の観測によって発見された赤方偏移 $z=0.60$ の銀河団であるが、現状知られている範囲では全銀河団で唯一と言える極めて特異な性質を持つ。前述の通り、X線強度は密度の2乗に比例することから、銀河団中心ではX線放射によるガスの冷却が一般には無視できない。天体によっては冷却のタイムスケールが1億年をきる場合もある。これは近傍銀河団の年齢およそ100億年と比較すると極めて短い。そのため、本来であれば中心の銀河団ガスは冷え切り、冷えたガスは

*2 暗黒物質の散乱深さは $\tau_s = \Sigma_s \times \sigma_{\text{DM}} / m$ で与えられる。ここで、 Σ_s は暗黒物質の面密度で σ_{DM} は暗黒物質の断面積、 m は暗黒物質の粒子質量である。観測から Σ_s を推定することができるので、 $\tau_s < 1$ という条件から、自己相互作用断面積 σ_{DM} / m の上限値が得られる。

分子ガスなどに形態を変えて、爆発的星形成を誘発するという冷却流仮説が当初提唱された。しかしそのような現象は近傍では一例も観測されず、銀河団ガスは中心でも常に数千万度を維持していることから、少なくとも冷却に釣り合うだけの加熱を受けていることが示唆されているが、具体的な冷却阻害過程については現在も決着がつかない。この理論と観測の不一致は冷却流問題として銀河団研究の重要な未解決問題となっている(冷却流の記事 [20] も参照のこと)。ところが驚くべきことに、フェニックス座銀河団の中心で $500\text{--}800 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ という爆発的星形成が起きていることが観測され、一見すると冷却流仮説通りの銀河団として着目を浴びた。

本稿の著者の一人は、以前「すぎく」と短時間 *Chandra* 観測のデータを解析して約三千万度の銀河団ガスを検出し、近傍銀河団での加熱モデルから期待される温度の半分程度しかないことを明らかにした [21]。これは過冷却の可能性を支持する。しかし *Chandra* の短時間観測では、冷却されたガスを空間分解して特定することはできなかった。詳細な追X線観測を行いたくなるが、実はこの銀河団の中心には塵に埋もれたクエーサー光度を持つ巨大質量ブラックホール (Supermassive black hole; 以下, SMBH) が鎮座している。中心部は *Chandra* の角度分解能をもってしても、 $E > 2 \text{ keV}$ ではSMBHからの放射がガスを凌駕し、 $E < 2 \text{ keV}$ では爆発的星形成に付随していると考えられる拡がった吸収体によりスペクトルが変形することから、X線スペクトル解析だけでは銀河団ガスの温度測定に不定性が残る。実際、その後の *Chandra* の追観測をもってしてもX線スペクトル測定による中心温度には factor ~ 3 の系統誤差があり [22, 23], きちんとした測定は困難だった。

我々はRXJ1347.5-1145銀河団に続くアルマ望遠鏡によるSZ効果観測天体としてフェニックス座銀河団に着目した [12]。フェニックス座銀河団は非常に重いことから高いS/Nが期待できるうえに、

干渉計の利点を活かして中心SMBHの放射を除去した上で銀河団ガスの圧力分布を測定し、過冷却の検証ができるからである。アルマ望遠鏡による観測の結果、フェニックス座銀河団はRXJ1347.5-1145銀河団とは異なり、SZピーク位置は $3.6''$ ほどSMBHから南にオフセットしているものの、ほぼ軸対称であることがわかった(図2左下)。また、圧力分布は $z=0.6$ よりも遠方の銀河団よりもむしろ近傍銀河団のプロファイルに整合していることがわかった。さらに、SZ効果は銀河団内の吸収体の影響を受けにくいことから、SZ効果とX線の同時解析によって銀河団ガスの温度と密度を系統誤差を抑えて測定した(図4)。その結果、中心には総質量 $\sim 6 \times 10^{11} M_{\odot}$ で約三千万度のガスが存在し、冷却のタイムスケールも1億年程度と短いことがわかった。過冷却の可能性を裏づける重要な成果である [12]。

一方で、我々のグループはオーストラリアコンパクト電波干渉計(ATCA)によるセンチ波の観測も行い、興味深いことに、非常に若い電波ジェットを銀河団の中心で発見した [24]。電波ジェットは加熱源の有力な候補であると考えられているだけに、電波ジェットと過冷却の共存は、従来説になにか見落としがあることを意味しているのかもしれない。我々の研究成果はフェニックス座銀河団の特異性をより際立たせている。

アルマ望遠鏡によるSZ効果観測によりX線観測だけでは取り除けない不定性を克服し、フェニックス座銀河団の特異性を裏づけたことは、銀河団研究におけるSZ効果観測の重要性を物語る。このSZ効果とX線の組み合わせによる温度測定法は、X線スペクトル測定が困難な場合に特に威力を発揮する。実際にこの手法を $z\sim 1$ の銀河団に適用した例を次に紹介する。

4.3 $z\sim 1$ を超えて

SZ効果は遠方銀河団の観測において高い潜在能力を有している。2章で述べた通り、観測されるSZ効果の強度は見かけ上赤方偏移によらない。

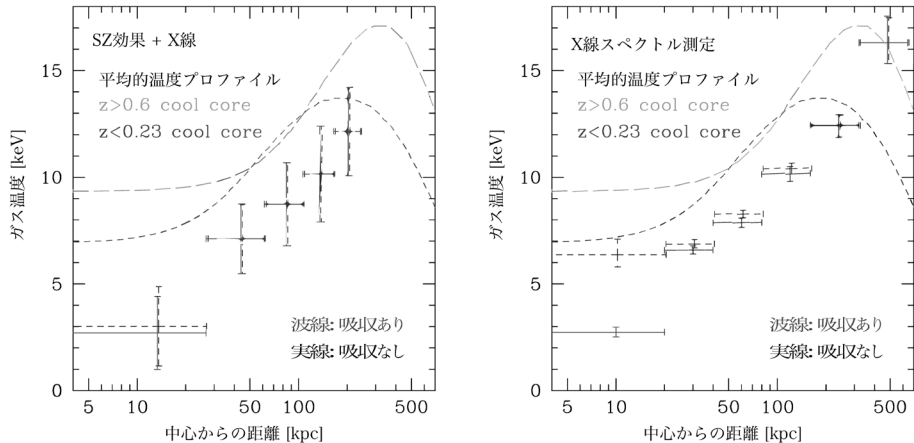


図4 アルマ望遠鏡によるSZ効果観測とX線観測を組み合わせた解析(左図)と、X線単独でのスペクトル測定(右図)で得られたフェニックス座銀河団の三次元温度構造. X線単独の解析では、吸収の有無によって最も重要な中心でのガスの温度に大きな不定性が生じるが、SZ効果との組み合わせでは吸収の有無に関係なく約三千万度が得られる. また参照として、近傍と遠方での冷却コアの平均的温度プロファイルも示している. フェニックス座銀河団は遠方($z=0.60$)でありながら、近傍と同等以上の温度プロファイルを持っている [12].

X線は $(1+z)^{-4}$ の減衰を受けることから、近傍と同程度の高品質のデータを取得することは極めて難しい.

RCSJ2319+0038 銀河団と HSCJ0947-0119 銀河団は、どちらもすばる望遠鏡の HSC すばる戦略枠サーベイ (HSC-SSP) 領域に含まれる $z \sim 1$ の銀河団で、後者は HSC-SSP によって初めて発見された (HSC-SSP については過去の HSC 特集も参照のこと [25, 26]). 両者は ACT のサーベイでも観測され、前者は $S/N=5.2$ で、後者は $z > 1$ で最も大きな $S/N=13.2$ で検出されている. 遠方銀河団では *Chandra* といえども現実的な観測時間のもとでは、大域的な銀河団ガスの平均温度を測定するのが精一杯で、温度構造を調べるのは難しい. その上、HSCJ0947-0119 銀河団に至っては *Chandra* の観測はない. これは SZ 効果観測だけで、遠方銀河団のガスの性質をどのくらいの精度で測定できるのかを調べるモデルケースになることを意味していた.

我々の期待通り、アルマ望遠鏡による SZ 効果観測により 2 つの銀河団のガスの構造を捉えることができた (図 2 上) [13]. RCSJ2319+0038 銀

河団では、X線表面輝度とSZ効果の幾何学的中心はほぼ同位置にきており、さらに銀河分布や弱い重力レンズ観測による質量分布のピーク位置とも整合している一方、HSCJ0947-0119 銀河団ではSZ効果のピーク位置が、銀河分布ピークより 140 kpc 以上もずれていることがわかった. どちらの銀河団も銀河分布の中にサブ構造を伴っており、衝突を示唆するが、後者の銀河団はとりわけ激しい衝突が起きていると考えられる. SZ効果観測から得られたガスの圧力分布は、遠方銀河団の平均圧力プロファイルと整合することがわかった. さらに RCSJ2319+0038 銀河団では、*Chandra* の X線データと組み合わせるとガスの三次元温度構造を測定した. この測定はX線単独では行えないため、SZ効果観測が重要な要素になっている. 過去 20 年の X線観測においてさえ 10 例に満たない $z \geq 1$ 銀河団でのガスの温度構造の測定を、アルマ望遠鏡と組み合わせれば比較的リーズナブルな観測時間で行えてしまう. 結果、中心では若干の温度低下が見られ、冷却のタイムスケールも 30 億年程度となり、近傍ほどの冷却の度合いは見せていないものの、これからの進化の過程で X線放射

によって冷えていくであろうことを示唆する [13].

さらに我々は、X線表面輝度とCompton γ パラメーターを用いてハッブル定数の制限を試みた。詳細は原論文 [13] やレビュー論文 [27] に譲るが、X線表面輝度とCompton γ パラメーター間での異なる距離依存性を2つのデータを使って解くことで、ハッブル定数を求めることができる*³。物質の密度パラメーター $\Omega_M=0.3$ 、ダークエネルギーの密度パラメーター $\Omega_\Lambda=0.7$ とし、X線表面輝度とCompton γ パラメーターを使って測定されたハッブル定数は $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ と整合した [13]。ただし、この方法で測定されるハッブル定数は、直接観測ができない「銀河団ガスの奥行きサイズ」に依存し、上の結果はこれが「天球面上で観測されるサイズの方位角平均」に等しいことを仮定して得られた。逆に言うと、ハッブル定数の値として $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ を採用した場合には、この銀河団の奥行きサイズが、天球面上での平均サイズと整合していることが示される。このように、X線とSZ効果のデータを用いた距離測定は、宇宙論モデルの検証と銀河団3次元構造の測定のいずれにも利用することができる。アルマ望遠鏡によるSZ効果の撮像の高画質化によってもたらされるサイエンスはとどまるところを知らない。

5. まとめと展望

本記事は、我々のグループによるアルマ望遠鏡による銀河団のSZ効果観測についてまとめたものになる。RXJ1347.5-1145銀河団の観測から、アルマ望遠鏡の長所と短所を理解し、短所はX線観測と組み合わせて補いつつ、長所をより活かすような解析手法を確立することができた。アルマ望遠鏡による初めてのSZ効果観測であったが、過去の入念なSZ効果観測で得られた知見とアルマ望遠鏡の性能を活かしきったことでSZ効果観

測の潜在能力を存分に示せたのではないだろうか。この手法はその後の観測でも標準解析として用いられている。フェニックス座銀河団では、X線スペクトル測定による温度解析の高い不定性を、SZ効果とX線の組み合わせ解析によって見事に打ち破り、その銀河団の特異性を明らかにできた。この組み合わせ解析は、より遠方の銀河団でも十分に威力を発揮することを実証し、SZ効果観測の潜在能力を改めて示すことができた。アルマ望遠鏡をはじめとする高角度分解能SZ効果の観測は、今後大きく発展していくことは間違いない。

このように高角度分解能SZ効果の観測装置の登場は銀河団ガス物理の研究を根本的に進化させている。近年では単一鏡のグリーンバンク望遠鏡 (GBT) のMUSTANG-2 (分解能9") やIRAMのNIKA-2 (分解能18") などでも成果が上げられてきている。視野はそれぞれ10', 6.5' とアルマ望遠鏡よりも広いのが特徴である。XMM-Newtonと同程度の角度分解能を利用し、X線データとSZデータを同時に解析することによって、温度と密度の縮退を解き、複雑な銀河団ガス構造の解明を紐解くことが可能になってきた [28]。これらは中心の位置までもフリーパラメーターにすることができるだけでなく、従来のXMM-Newton単独でのX線スペクトル解析では十分な光子数を稼ぐために数分角程度の領域にしか分解できなかったものが、同時解析により10"程度の細かい領域まで分解して、その詳細を明らかにすることができる。

将来的にスペクトルイメージング観測が実現すれば、SZ効果のみを用いて温度と密度それぞれを決定することができるようになると期待される [29]。日本のLST計画 [30] や欧米のAtLAST計画 [31] は2030年代の稼働を目指しており、サーベイ型の観測によってより広い宇宙の熱いガスの温度や密度の進化の詳細を明らかにすることができるであろう。

*³ 原理的には、他の宇宙論パラメーターにも制限をつけられるが、現状では精度が十分でない。

また、近い将来ではアルマ望遠鏡 Band 1 は有力な SZ 効果観測装置になると期待されている。Band 1 は高角度分解能 (FWHM < 10") でありながら Band 3 の 2 倍強の視野を持つため観測範囲が広がる。さらに低ノイズ装置と相まって、Band 3 観測で足枷となっていた 7-m Array による超長時間観測が不要になることから、観測効率の向上も見込まれる。銀河団ガスの新たな一面が見えてくるはずだ。アルマ望遠鏡を中心とする SZ 効果観測によって、銀河団の誕生とその進化の謎を解明し続けていきたい。

謝 辞

本記事の基となった論文の共同研究者、ならびにアルマ望遠鏡の開発・運用に携わってきたすべての方々に御礼申し上げます。この原稿の執筆の機会を与えてくださった、国立天文台の廿日出さんに深く御礼申し上げます。また、記事に対し非常に有益なコメントをくださった筑波大学の橋本さんをはじめとする月報の編集委員に深く感謝申し上げます。本研究の一部は國家科學及技術委員會 111-2112-M-001-026-MY3 (SU) の助成を受けたものです。

参 考 文 献

- [1] Kellogg, E., et al., 1971, ApJ, 165, L49
 [2] Gursky, H., et al., 1971, ApJ, 167, L81
 [3] Sunyaev, R. A., & Zeldovich, Y. B., 1972, Comment. Astrophys. Space Phys., 4, 173
 [4] 一戸悠人, 上田周太郎, 2019, 天文月報, 112, 282
 [5] Birkinshaw, M., 1999, Phys. Rep., 310, 97
 [6] 北山哲, 2003, 天文月報, 96, 554
 [7] Komatsu, E., et al., 1999, ApJ, 516, L1
 [8] Komatsu, E., et al., 2001, PASJ, 53, 57
 [9] Hilton, M., et al., 2021, ApJS, 253, 3
 [10] Kitayama, T., et al., 2016, PASJ, 68, 88
 [11] Ueda, S., et al., 2018, ApJ, 866, 48
 [12] Kitayama, T., et al., 2020, PASJ, 72, 33
 [13] Kitayama, T., et al., 2023, PASJ, 75, 311
 [14] Basu, K., et al., 2016, ApJ, 829, L23
 [15] Di Mascolo, L., et al., 2019, A&A, 628, A100
 [16] Di Mascolo, L., et al., 2023, Nature, 615, 809
 [17] 上田周太郎他, 2017, 天文月報, 112, 513
 [18] Markevitch, M., et al., 2004, ApJ, 606, 819
 [19] 鎌田歩樹, 2021, 天文月報, 114, 197
 [20] 牧島一夫, 池辺靖, 2004, 天文月報, 97, 6
 [21] Ueda, S., et al., 2013, ApJ, 778, 33
 [22] McDonald, M., et al., 2015, ApJ, 811, 111
 [23] McDonald, M., et al., 2019, ApJ, 885, 63
 [24] Akahori, T., et al., 2020, PASJ, 72, 62
 [25] 高田昌広, 2019, 天文月報, 112, 89
 [26] 岡部信広他, 2019, 天文月報, 112, 174
 [27] Kitayama, T., 2014, Prog. Theor. Exp. Phys., 2014, 060000
 [28] Okabe, N., et al., 2021, MNRAS, 501, 1701
 [29] Mroczkowski, T., et al., 2019, Space Sci. Rev., 215, 17
 [30] <https://www.lstobservatory.org>
 [31] Klaassen, P. D., et al., 2020, Soc. Photo-Optical Instr. Eng. (SPIE) Conf. Ser., 11445, 114452F

ALMA Imaging of the Sunyaev-Zel'dovich Effect at 5"

Shutaro UEDA¹, Tetsu KITAYAMA² and Nobuhiro OKABE³

¹Academia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics (ASIAA) 11F of AS/NTU Astronomy-Mathematics Building, No. 1, Sec. 4, Roosevelt Rd, Taipei 10617, Taiwan, ²Faculty of Science, Toho University, 2-2-1 Miyama, Funabashi-shi, Chiba 274-8510, ³Department of Physics, Hiroshima University, 1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima-shi, Hiroshima 739-8526, Japan

Abstract: We present a series of our detailed study of ALMA imaging of the Sunyaev-Zel'dovich effect at 5". The Sunyaev-Zel'dovich effect is complementary to X-ray observations of the diffuse, hot X-ray emitting gas known as intracluster medium, as well as is expected to greatly advance understandings of cluster astrophysics. ALMA, for the first time, offers us to achieve high angular resolution observations for the Sunyaev-Zel'dovich effect with 5". We discuss our achievements with ALMA, including measuring the thermodynamic and dynamic properties of the intracluster medium, as well as constraining the nature of dark matter and the Hubble constant.