

## Abell 2255 銀河団の電波レリッ領域における衝突現象の研究

水野 真梨子 (奈良女子大学大学院 人間文化研究科 物理科学専攻)

## Abstract

銀河団は宇宙最大の天体であり、衝突合体を繰り返すことでより大きな構造へと成長する。衝突現象で解放されるエネルギーは衝撃波を介してガスの加熱や粒子加速に使われる。そのため、X 線や電波の観測から衝突の特性を調べることで、銀河団の形成過程の解明につながる重要な手がかりが得られると期待する。衝撃波をトレースするものとして、X 線を出す銀河団ガスの温度分布や“電波レリック”と呼ばれる円弧状の電波放射がある。X 線観測から衝撃波前後のガス温度を測定し、ランキン - ユゴニオの関係式を適用すると衝突のマッハ数  $M_X$  を見積もることができる。一方、電波レリックが衝撃波加速によって形成されたと考えると、電波スペクトルと統計加速理論から、X 線とは独立にマッハ数  $M_R$  を見積もることができる。以上の二通りの方法から得られるマッハ数を比較することで、衝突の様子を考察することが可能である。

本研究では Abell 2255 銀河団 (赤方偏移 0.08) の北東に観られる電波レリックに注目した。この電波レリックは差し渡し約 1.5 Mpc と大きいため、激しい衝突合体の名残であると予想される。そこで、すぐく衛星で取得した X 線スペクトルを解析し、この領域のガスの温度分布を調べた。その結果、電波レリック領域とその外側の温度はそれぞれ  $4.6 \pm 0.3$  keV、 $4.3 \pm 0.5$  keV と求まり、強い衝撃波で期待されるような不連続的な温度変化は見られなかった。この領域の温度を用いて衝突のマッハ数を求めると  $M_X \sim 1.1$  である。このとき、領域の取り方によって系統誤差が約 50% ある。これを電波観測による値  $M_R \sim 2.8$  と比較すると、両者は誤差を考慮しても一致しないことがわかった。 $M_X < M_R$  となる原因として、X 線望遠鏡の空間分解能の影響やプロジェクション効果、あるいは仮定した理論が単純すぎるなどの可能性が考えられる。

## 1 はじめに

銀河団とは、数十～数千個の銀河からなる天体である。重力によって物質が強く結合している系で、典型的なもので直径が数 Mpc、質量が  $10^{15} M_\odot$  である。銀河団を構成している成分を大きく分けるとダークマター、銀河団ガス、銀河の 3 つで、質量比はそれぞれ約 85 %、約 13 %、約 2 % と推定されている。

銀河団は衝突合体を繰り返すことでより大きな構造へと成長し、衝突現象で解放するエネルギーは宇宙最大規模である。そのエネルギーは衝撃波を介して銀河団ガスの加熱や粒子加速に使われ、衝撃波の前後では銀河団ガスの温度や密度が不連続的に変化する。このように銀河団衝突で発生する衝撃波は銀河団の成長に大きな影響を及ぼすため、観測から求める衝撃波の特性 (例えばマッハ数) は銀河団の形成過程を理解する上で欠かせない情報である。

衝撃波をトレースするものとして、X 線を出す銀河団ガスの温度分布や“電波レリック”と呼ばれる

円弧状の電波放射がある。X 線観測から衝撃波前後のガス温度を測定し、ランキン - ユゴニオの関係式を適用すると、以下のように衝突のマッハ数  $M_X$  を見積もることができる。

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{5M_X^4 + 14M_X^2 - 3}{16M_X^2} \quad (1)$$

ここで、 $T_1$  は衝撃波面前方のガス温度、 $T_2$  は衝撃波面後方のガス温度である。一方、電波レリックが衝撃波加速によって形成されたと考えると、電波データと統計加速理論からマッハ数  $M_R$  を、次式から見積もることができる。

$$\alpha = -\frac{3M_R^{-2} + 1}{2 - 2M_R^{-2}} \quad (2)$$

ここで、 $\alpha$  はシンクロトロン放射のスペクトル指数である。以上の独立な二通りの方法でマッハ数を求められるため、両者を比較することで電波レリックと衝撃波の対応関係をより確かなものとする (Akamatsu & Kawahara 2013)。

最近の観測結果から二通りの方法で求めたマッハ数は必ずしも一致せず、 $M_X < M_R$  となるような電波レリックが複数存在していることが明らかになってきた。この原因を解明するには電波レリックをもつ銀河団のより詳細な解析を進める必要がある。そこで北東に電波レリックを持つ Abell 2255(赤方偏移 0.08) に注目し、すざく衛星の観測データから、ガス温度の分布を求めてマッハ数  $M_X$  を見積もった。また、電波観測データから得られるマッハ数  $M_R$  と比較し、Abell 2255 北東電波レリック領域の衝撃波の特性について考察した。

## 2 観測

本研究ではすざく衛星の XIS 検出器による Abell 2255 二領域 (中心、北東) の観測データを用いた。すざく衛星は低く安定したバックグラウンドを特徴とし、輝度の低い電波レリック領域の観測にも適している。表 1 に観測情報を示す。

表 1: Abell 2255:すざく観測ログ

観測領域	中心	北東
DATE	2010 02 07-08	2014 06 02-04
(RA, Dec) [deg]	(258.2, 64.1)	(258.3, 64.3)
Exposure [ksec]	44.5	100.6

## 3 スペクトル解析

Abell 2255 のガス温度の分布を調べるため、すざく衛星に搭載されている XIS0,1,3 から得たデータを用いた。図 1 のように二通りの刻み幅で定義した box 領域からスペクトルを抽出し、解析ツール XSPEC version 12.8.2 を用いて Galactic 吸収と APEC 熱的放射モデルでフィッティングを行った。温度  $kT$  [keV]、重元素量  $Z$  [solar]、Normalization [ $\text{cm}^{-5}$ ] はフリーパラメータとして扱い、赤方偏移は  $z = 0.0806$ 、水素柱密度は  $N_H = 2.49 \times 10^{20} [\text{cm}^{-2}]$  に固定した。エネルギーバンドは 1.0–8.0 keV とした。図 2 にスペクトルフィットの例を示す。

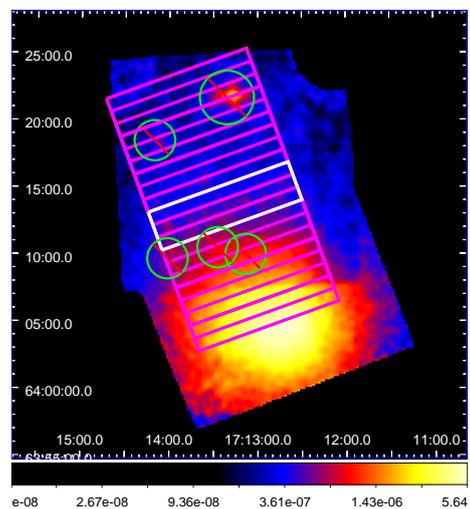
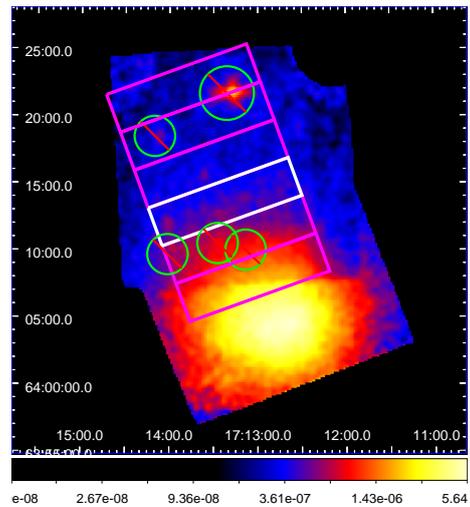


図 1: すざく衛星による Abell 2255 銀河団の X 線イメージ。box 領域を 3 分角刻み (上)、1 分角刻み (下) で定義した。白い box は北東電波レリックの位置を示す。緑色の円は点源である。 $1' = 910$  kpc に相当する。

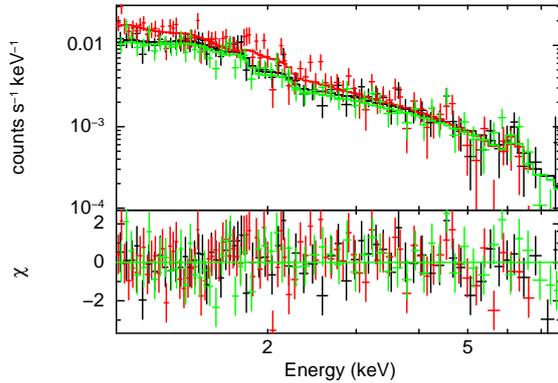


図 2: Abell 2255 の半径  $8'.5-11'.5$  (北東電波レリックを囲う領域) のスペクトル。データは誤差棒付きの十字、モデルは実線で表され、色の違いは XIS0(黒)、XIS1(赤)、XIS3(緑) である。

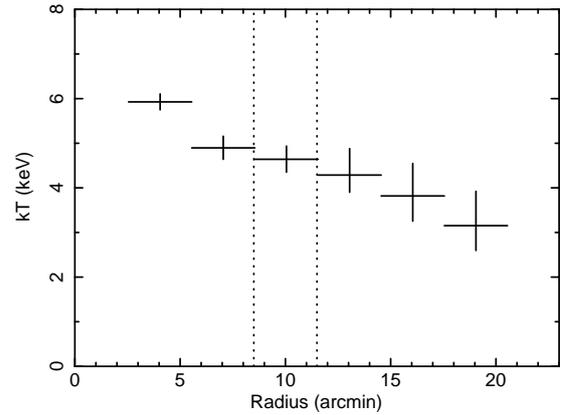


図 3: Abell 2255 北東方向の銀河団ガスの温度分布。(i)3 分角刻みの場合。2 本の点線は電波レリックの位置を示す。エラーバーは  $1\sigma$  統計誤差を表す。

## 4 結果

スペクトル解析から得られた温度分布を二通りの領域の取り方: (i)3 分角刻みの場合と (ii)1 分角刻みの場合について以下に示す。

### (i)3 分角刻み

APEC モデルで得られたパラメータを表 2 に示す。また、得られた温度分布は図 3 の通りである。

電波レリックが存在している銀河団中心から半径  $r = 8'.5-11'.5$  の box 領域のガス温度は  $T_2 = 4.64 \pm 0.29$  keV、その外側の box 領域は  $T_1 = 4.29 \pm 0.49$  keV という結果が得られた。これらは誤差の範囲で一致し、電波レリックの前後で顕著な温度ジャンプはなかった。

表 2: Abell 2255 北東方向の APEC モデルパラメータ

Region	$2'.5-5'.5$	$5'.5-8'.5$	$8'.5-11'.5$
$kT$ [keV]	$5.49^{+0.60}_{-0.43}$	$4.89^{+0.26}_{-0.26}$	$4.64^{+0.30}_{-0.29}$
$\chi^2/\text{d.o.f.}$	107/92	183/186	236/217

Region	$11'.5-14'.5$	$14'.5-17'.5$	$17'.5-20'.5$
$kT$ [keV]	$4.29^{+0.60}_{-0.39}$	$3.82^{+0.73}_{-0.56}$	$3.15^{+0.77}_{-0.56}$
$\chi^2/\text{d.o.f.}$	136/166	80/82	54/76

### (ii)1 分角刻み

得られた温度分布は図 4 の通りである。この場合、温度分布は上昇と下降を繰り返していることがわかった。半径  $r = 10'.5-13'.5$  の box 領域におけるガス温度  $T_2 = 4.89 \pm 0.44$  keV と半径  $r = 13'.5-16'.5$  の box 領域における温度  $T_1 = 3.17 \pm 0.38$  keV の間で約 1.7 keV の温度変化が見られた。

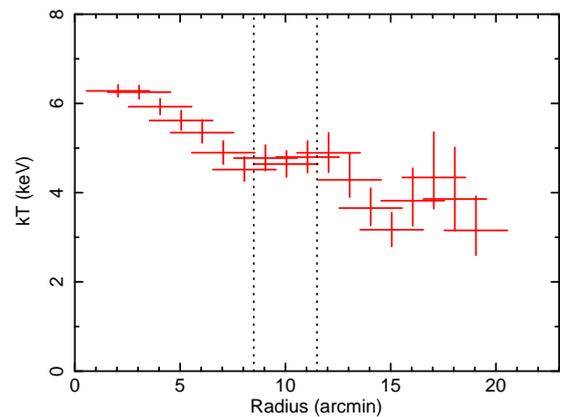


図 4: Abell 2255 北東方向の銀河団ガスの温度分布。(ii)1 分角刻みの場合。2 本の点線は電波レリックの位置を示す。エラーバーは  $1\sigma$  統計誤差を表す。

## 5 議論

§4 の結果、北東電波レリック領域には顕著な温度ジャンプは見られなかった。加えて、二通りの解析により、領域の選び方が測定結果に及ぼす影響が無視できないこともわかった。そこで、北東電波レリック領域で衝撃波によるガス加熱が生じたと仮定し、(i),(ii) 両方の場合についてランキン - ユゴニオの関係式 (1) からマッハ数  $\mathcal{M}_X$  を見積もった。

### (i) 3 分角刻み

電波レリックが存在する  $r = 8'.5-11'.5$  の box 領域の温度を衝撃波面後方の温度  $T_2 = 4.64 \pm 0.29$  keV、その外側の  $r = 11'.5-14'.5$  の box 領域の温度を衝撃波面前方の温度  $T_1 = 4.29 \pm 0.49$  keV とすると、

$$\mathcal{M}_X = 1.08 \pm 0.14 \quad (3)$$

となった。

### (ii) 1 分角刻み

電波レリックの外側で 1.7 keV の温度降下が始まる  $r = 10'.5-13'.5$  の box 領域の温度を衝撃波面後方の温度  $T_2 = 4.89 \pm 0.44$  keV、降下し終わった  $r = 13'.5-16'.5$  の box 領域の温度を衝撃波面前方の温度  $T_1 = 3.17 \pm 0.38$  keV とすると、

$$\mathcal{M}_X = 1.55 \pm 0.22 \quad (4)$$

となった。

式 (3) と式 (4) の最適値の差から、領域の取り方による  $\mathcal{M}_X$  の系統誤差は約 50%あることがわかった。系統誤差も含めると、

$$\mathcal{M}_X = 1.08 \pm 0.49 \quad (5)$$

となり、 $\mathcal{M}_X < 1.57$  という上限値が得られた。

次に、電波観測のデータから得られるシンクロトロン放射のスペクトル指数  $\alpha$  を用いて、衝撃波統計加速の理論に基づき式 (2) からマッハ数  $\mathcal{M}_R$  を見積もる。北東電波レリック領域のスペクトル指数  $\alpha = -0.8 \pm 0.1$  (Pizzo & Bruyn 2009) を用いると、

$$\mathcal{M}_R = 2.77 \pm 0.40 \quad (6)$$

となった。

$\mathcal{M}_X$  と  $\mathcal{M}_R$  は誤差を考慮しても一致せず、 $\mathcal{M}_X < \mathcal{M}_R$  となった。電波観測からは音速の約 3 倍でガス運動をする強い衝撃波が生じたと予想される一方、X 線観測からはそのような衝撃波の存在は考えにくい。この原因として、X 線望遠鏡の空間分解能の影響やプロジェクション効果、あるいは仮定した理論が単純すぎるなどの可能性が考えられる。

## 6 まとめ

Abell 2255 の北東電波レリック領域に注目し、すざく衛星を用いて銀河団ガスの温度分布を調べた。その結果、北東電波レリック領域で顕著な温度ジャンプは見られず、衝撃波による加熱があったと仮定して X 線観測データからこの領域における衝突のマッハ数を求めると  $\mathcal{M}_X < 1.57$  となった。この際、領域の取り方による系統誤差は約 50%あることがわかった。一方で同じ領域に対して電波観測データからマッハ数を見積もると  $\mathcal{M}_R = 2.77 \pm 0.40$  となり、両者の値は誤差を考慮しても一致しないという結果になった。この原因としてプロジェクション効果などにより  $\mathcal{M}_X$  を過小評価している、もしくは  $\mathcal{M}_R$  を見積もる際の理論が単純すぎるという可能性がある。Abell 2255 北東電波レリック領域における衝突の様子を議論するには  $\mathcal{M}_X < \mathcal{M}_R$  となる原因を探り、正しくマッハ数を評価するための方法を検討する必要がある。

## Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

## Reference

- H. Akamatsu & H. Kawahara, 2013, PASJ, 65, 16.  
R. F. Pizzo & A. G. de Bruyn, 2009, A&A, 507, 639.