

論文の内容の要旨

論文題目

Structures within the intra-cluster medium of an early phase cluster merger, CIZA J1358.9-4750

(初期衝突銀河団 CIZA J1358.9-4750 のプラズマの空間構造)

加藤 佑一

1. 目的

銀河団は、宇宙の階層構造の頂点に立つ天体である。その巨大な重力で周りの物質を降着、もしくは互いに引きつけ合い衝突し、大型な系へと数十億年以上もかけて進化し続けている。そのサイズは \sim Mpc で、質量は $10^{14-15} M_{\odot}$ にも達し、おおよそ 75%が暗黒物質、20%が銀河団ガス(ICM)、残りは銀河が占める。暗黒物質の巨大な重力に捉えられた ICM は、非常に高温 (10^{7-8} K)かつ低密度 ($10^{-4}-10^{-2}$ cm $^{-3}$)なプラズマ状態にあり、X線帯域で明るく輝く。その巨大なサイズのため銀河団は、宇宙の中で最も明るい天体の1つとなっている。

銀河団同士の衝突は、 10^{57} Jにもおよぶ重力ポテンシャルが解放される宇宙最大の天体現象である。このとき互いの銀河団の ICM が激突するため、衝撃波や Cold fronts と呼ばれる等圧の不連続面の励起、そして ICM の強いかき混ぜなどが起こる。ICM の物理パラメータは、太陽風や超新星残骸といったプラズマとは異なるため、そこでの物理現象は多くの研究者を惹きつけてきた。例えば、銀河団中の衝撃波は、低マッハ ($M=1\sim 5$) という特徴を持ち、典型的な無衝突衝撃波で、そのサイズは Mpc を超え、観測されている中では宇宙最大である。衝撃波中では、衝突で注入される莫大な運動エネルギーの一部を熱エネルギー、粒子加速や磁場増幅、乱流などへと変換することが分かっているが、どのような比でエネルギーが分配されるのかは特定できてない。

ICM は磁場を含むプラズマであるためその物理が複雑で、理論的な検討も簡単ではないため、観測が重要である。現在その大きな障害となっているのが、衝撃波付近の X線輝度の小ささである。これまでも多数の衝突銀河団で、ICM 中の衝撃波の X線データ解析がなされている (Markevitch & Vikhlinin 2007 など) が、これらはどれも衝突後期、つまり銀河団コアが互いを通り過ぎた系である。そのような系では、衝撃波が X線で極めて暗い銀河団外縁部に達しており、X線観測で ICM 中の衝撃波の温度や密度などの物理パラメータを高い精度で導出することが困難である。さらに、ICM が強いかき混ぜられているため、元の銀河団の質量や衝突幾何学を突き止めることも難しい。

衝突初期、銀河団コアが互いを通り過ぎる直前であれば、衝撃波は X線で明るいコア付近に位置し、しかもガスのかき混ぜも激しくないため衝突のジオメトリも解明しやすく、その研究に最適と言える。ただし、この状態にある期間は短く、そのような系は近傍に 5 個程度しか発見されていない。しかも、どれも明確な衝撃波の兆候を示していない。そのため、衝突初期で衝撃波を伴う系の発見が重要な課題として残されていた。

2. 観測

非常に幸運にも、我々は新たな衝突初期系の候補天体 CIZA J1358.9-4750（以後、CIZA J1359）を CIZA カタログ中から見つけ出した。CIZA カタログとは、銀河面に位置する銀河団を集めたもので、銀河面では吸収が強く可視光では観測が困難で、X線観測の発展により作成された比較的新しいカタログである（Ebeling et al. 2002, Kocevski et al. 2007）。CIZA J1359 は、南東と北西に 1.1 Mpc 離れた位置に 2 つの銀河団コアを有し、それらを結ぶ領域が、あたかも橋を架けたように明るく輝いている（ブリッジ領域）。コアの中心には、それぞれ巨大楕円銀河が存在し、その赤方偏移は南東が 0.0745 で北西は 0.709 となっている。これは、2 つの銀河団コアが互いに近接していること、そして双方ともが銀河団としては地球から比較的に近傍（ ~ 310 Mpc）に位置し、詳細な観測に向いていることを示す。

我々は、世界の 3 大 X 線天文衛星である「すざく」（日本）、Chandra（米国）、XMM-Newton（欧州）の全てを駆使し、本天体の観測を実行した。「すざく」は、安定した低バックグラウンドでかつ広いエネルギー帯域で大きな有効面積を持つので、図 1 に示すように 5 点観測で中心から外縁部までカバーし、全体の ICM の物理パラメータを導出した。特に X 線輝度が暗くなる外縁部の観測精度では、他の 2 つの衛星の追従を許さない。Chandra では、その圧倒的な角分解能（ < 1 秒角）で、ブリッジ領域と銀河団コア付近の構造を解き明かした。XMM-Newton は 10 秒角程度の良い角分解能と、直径 30 分角の大きな視野、そして大きな有効面積を持ち、X 線輝度の比較的明るいブリッジ領域の ICM の物理パラメータを細密な領域サイズで抽出することができた。

3. 結果

図 1(左)が「すざく」5 点観測で得られたエネルギー帯域 0.5-10 keV の X 線画像である。明瞭に 2 つの銀河団コアとそれらを結ぶブリッジ領域を捉えることができた。ブリッジ領域で銀河団同士が強く相互作用していることが分かる。この系の ICM の温度・密度構造を知るために、小さな領域に分けて物理量を抽出した。ブリッジ領域では衝突軸

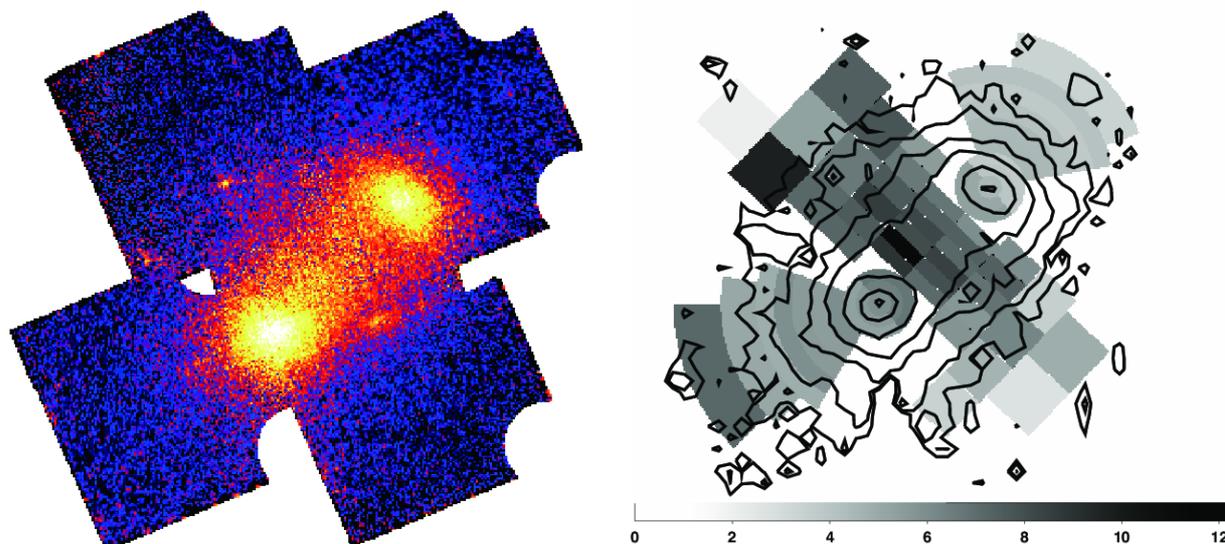


図 1: (左)「すざく」5 点観測による CIZA J1359 の X 線画像。エネルギー帯域は 0.5-10 keV。(右) その温度分布に X 線コントアを重ねたもの。温度は keV で表示。

に平行にメッシュ状に、2つの銀河団コアの外側は環状に分け、そのスペクトルを熱的制動放射+輝線放射のモデルで再現することで、温度分布を導出したのが図1(右)である。南東と北西の銀河団コアの温度は、それぞれ 6.0 ± 0.2 と 4.5 ± 0.2 keV とその違いは30%足らずで、銀河団の温度・質量関係より、質量差は1.5倍程度、すなわちおおよそ等質量といえる。ブリッジ領域では高温を示し、最大で $11.5^{+2.6}_{-1.8}$ keV にも達していた。2つのコアから見てブリッジ領域の反対方向では、外側に向かって温度が減少しており、衝突でかき乱されていない通常の銀河団のそれによく似ている。概ね対称なX線形状と合わせて、典型的な衝突初期の系の証拠である。

ブリッジ領域では、温度は急激な遷移を示していた。温度と密度から圧力およびエントロピーを求めると、それらもそれぞれ周囲より一段と高い値を示した。これらは、明らかな衝撃波の兆候である。Chandra と XMM-Newton で、ブリッジ領域の輝度分布を抽出すると、その最高温度を示した領域で、2つの衝撃波面に挟まれた高輝度領域が存在することを突き止めた。このことから、衝突によってほぼ左右対称に衝撃波が発達し、互いに反対方向に向かって走っていること、それをほぼ真横から見ていることが分かった。XMM-Newton で、「すぎく」の1/4という、より細かな位置分解の領域サイズで密度を導出したところ、「すぎく」では発見できなかった密度遷移も見つかった。図2(左)にXMM-NewtonのX線画像を、図2(右)にその輝度分布の例を載せた。

「すぎく」で得られた衝撃波前後の温度比を Rankine-Hugoniot 関係式に代入すると、衝撃波のマッハ数が $1.4^{+0.21}_{-0.15}$ と導出された。衝撃波前方の温度からその音速を求めると 1550 km s^{-1} となり、これとマッハ数から衝撃波面から見た衝撃波前後の速度は、それぞれ 2130 km s^{-1} と 1300 km s^{-1} となった。ここで、左右対称衝突だと仮定し、衝撃波後方の系に移ると、そこでの速度は 0 km s^{-1} となるので、衝撃波面が速度 1300 km s^{-1} で、それぞれの銀河団コアに向かって進んでいることになる。これで2つの衝撃波間距離の半分を除算すると、その衝撃波の年齢は55 Myr と求めた。銀河団衝突のタイムスケールは1 Gyr にもおよぶので、本衝撃波は極めて若い例といえる。

Cold fronts は、低温のICM成分と高温の成分が、圧力平衡の状態で見えている不連続面で、銀河団衝突の後期にしばしば発生すると理解されている。Cold fronts が CIZA J1359 にあるかどうかを確認すべく、2つの銀河団コア付近の輝度分布も抽出した。ど

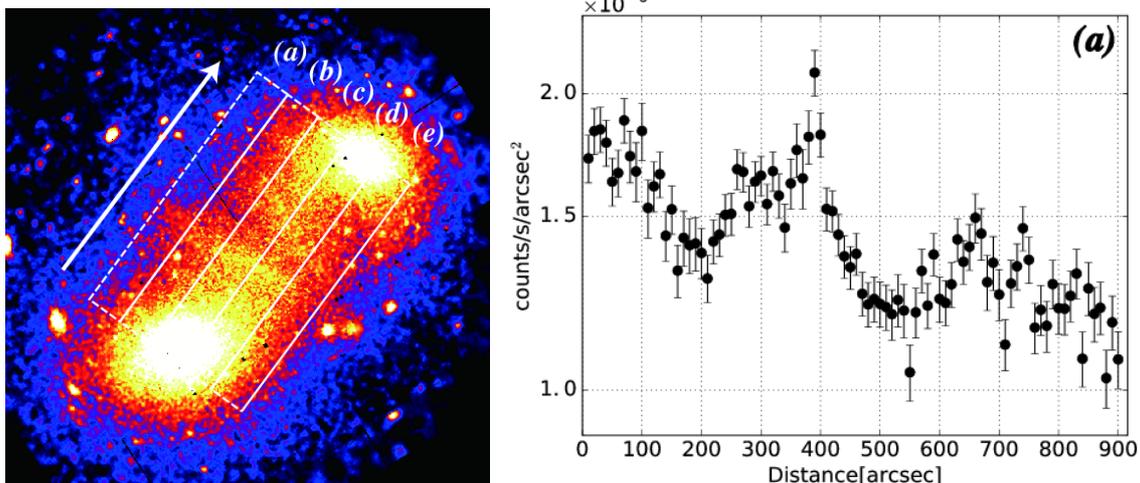


図2: CIZA J1359のXMM-NewtonによるX線画像。エネルギー帯域は0.8-7.2 keV。輝度分布を抽出した領域を重ねてある。(右)(a)領域から抽出した輝度分布。

ちらのコアでも輝度遷移が見受けられ、その存在が強く示唆された。衝突初期の系としては、初めて Cold fronts が発見された系である。これらは今回の衝突の初期現象として発生した可能性があるが、統計精度も不足し、その詳細な形状は得られていないため、そこまでは結論できない。比較的安定した銀河団でも、はるか昔の衝突を反映して Cold fronts が存在することがあるため、今回の衝突以前に生じた可能性も否定はできない。

ブリッジ領域の温度構造を詳しく見ると、南西側では弱く北東側で強く加熱されていることが分かる。これは衝突の非対称を示し、例えば北西の銀河団が、 $50\text{--}100\text{ km s}^{-1}$ ほどで反時計方向に自転することで、北東側は超音速に、南西側は亜音速に保たれることで、非対称が生まれた可能性がある。

さらに北東側への高温成分の広がりを詳細に調べるために、「すざく」で図 3(左)のようにスペクトル抽出領域を作成し、温度分布や圧力、エントロピー分布を導出した。その温度分布の結果を図 3(右)に示す。領域 NW4 から NW5 にかけて急激な温度ジャンプがあり、圧力とエントロピーも遷移していた。このように衝突軸とは垂直方向に明確に状態が変わっていることが突き止められた。これは、衝突によって圧縮加熱されたガスが低圧力である外側へ、衝突軸からほぼ垂直側に噴き出していることを示唆する。さらに、その噴き出したガスが、その端で衝撃波を形成している可能性もある。

4. 結論

CIZA J1359 は、衝突初期で明確な衝撃波を伴う系として初めて発見された衝突銀河団である。本天体では、衝突による動圧でまず Cold fronts が形成された。さらに互いの重力で加速され、ついにはほぼ中央に 2 つ衝撃波が発達し、互いに反対側へと走り、衝撃波後方領域を拡大していると考えられる。加えて、衝突による断熱圧縮または衝撃波加熱されて圧力が上昇したブリッジ領域のガスが北東側へと噴き出した。この南東と北東の温度分布の非対称性は、銀河団の自転で説明できる可能性がある。

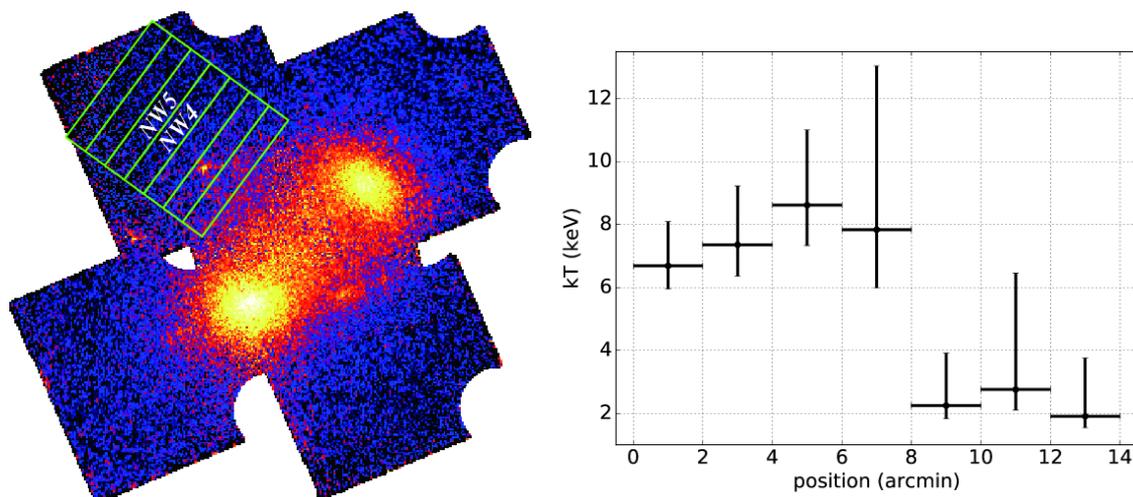


図 3: 図 1 (左) にスペクトル抽出領域を重ねた画像。(右) 左図の領域のスペクトル解析から得られた温度分布。