

宇宙最大規模の衝撃波で消費されるエネルギーを測定 ～最も近くの衝突が始まったばかりの銀河団～

【本研究のポイント】

- ・宇宙最大の天体である銀河団同士の衝突の3次元描像を高精度でモデル化した。
- ・衝突によって生まれたばかりの巨大衝撃波で解放されるエネルギーを推定した。

【研究概要】

国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学素粒子宇宙起源研究所の中澤 知洋准教授、同大学院理学研究科の大宮 悠希 博士後期課程学生らの研究グループは、国立天文台、東京理科大学、広島大学、埼玉大学、JAXA 宇宙科学研究所、都立大学、オランダ宇宙科学研究所、東邦大学との共同研究で、欧州の X 線天文衛星「XMM-Newton」のデータを解析し、近傍に存在する衝突銀河団 CIZA J1358.9-4750 でまさに生まれたばかりの衝撃波の「縦・横・奥行き」と衝突速度の推定に成功し、その巨大な衝撃波の中で 2.3×10^{38} W ものエネルギーが解放されていることを確認しました。

銀河団は宇宙最大の天体種族で、明るい X 線を放射する大量の高温ガスを纏っています。銀河団同士の衝突は宇宙最大規模の天体現象で、300 万光年四方という巨大な衝撃波が発生します。天文学では一般に天体の「奥行き」を測定することは難しいのですが、本研究では、この銀河団が「衝突したばかり」であることを生かして解析を工夫して、「奥行き」を求めました。高温ガスの温度分布から衝撃波の衝突速度を求め、「縦・横・奥行き」と掛け合わせることで、そこで運動エネルギーから熱エネルギーや粒子加速、磁場増幅に変換されるエネルギー量を求めることに成功しました。

本研究成果は、2023 年 2 月号の日本天文学会欧文研究報告(PASJ)に掲載されました。関連論文の「Diffuse radio source candidate in CIZA J1358.9-4750」(2023 年 2 月 PASJ)は、電波観測により粒子加速と磁場増幅で生じる「シンクロトロン電波^{注1)}」を発見し、これが 3.5×10^{33} W の電場放射をしていることを確認しました。これにより、その変換効率が約 10^{-5} と求まりました。まだ一つの例ですが、これをきっかけに変換効率の分布を知ることで、宇宙最大の衝撃波の中で何が起きているのかを明らかにしていきます。

【研究の背景】

宇宙は、約138億年前のビッグバン以降、重力によって物質が寄り集まり、星の誕生や銀河の形成、そしてその過程で衝突と合体を繰り返して成長してきました。宇宙最大の天体種族である銀河団は、太陽の約 10^{15} 倍の大きさ(1000万光年)の質量(約 10^{45} kg)を持ち、自分の重力で形をなしている天体として宇宙最大種です。その中には、多数の銀河に加え、明るいX線を放射する約1千万~1億度の高温ガスが広がっています。銀河団はまれに、互いに衝突して巨大な重力エネルギーを解放します。宇宙最大のエネルギー規模の天体現象です。衝突により約300万光年四方の巨大な衝撃波が発生して、高温ガスに莫大なエネルギーが注入され、ガスの加熱や粒子加速・磁場の増幅などの非熱的エネルギーに変換されます。この衝撃波を通じた運動エネルギーの各現象へのエネルギー変換率を知ることは、いま観測できる高温ガスから過去の成長の経緯を知る上で重要な意義を持ちます。しかしながら、宇宙観測では深さ方向の測定が容易ではなく、衝突銀河団の多くは互いのガスが激しく混ざり合っているため、衝突がいつどのような状態で起こったのかというのが特定するのが難しく、未だに説明されていません。そこで本研究グループは、まだ発見例の少ない衝突がはじまったばかりで、構造が単純な銀河団を調べることで、これまでわからなかった宇宙最大規模の衝撃波で消費されるエネルギーが推定できると考えました。

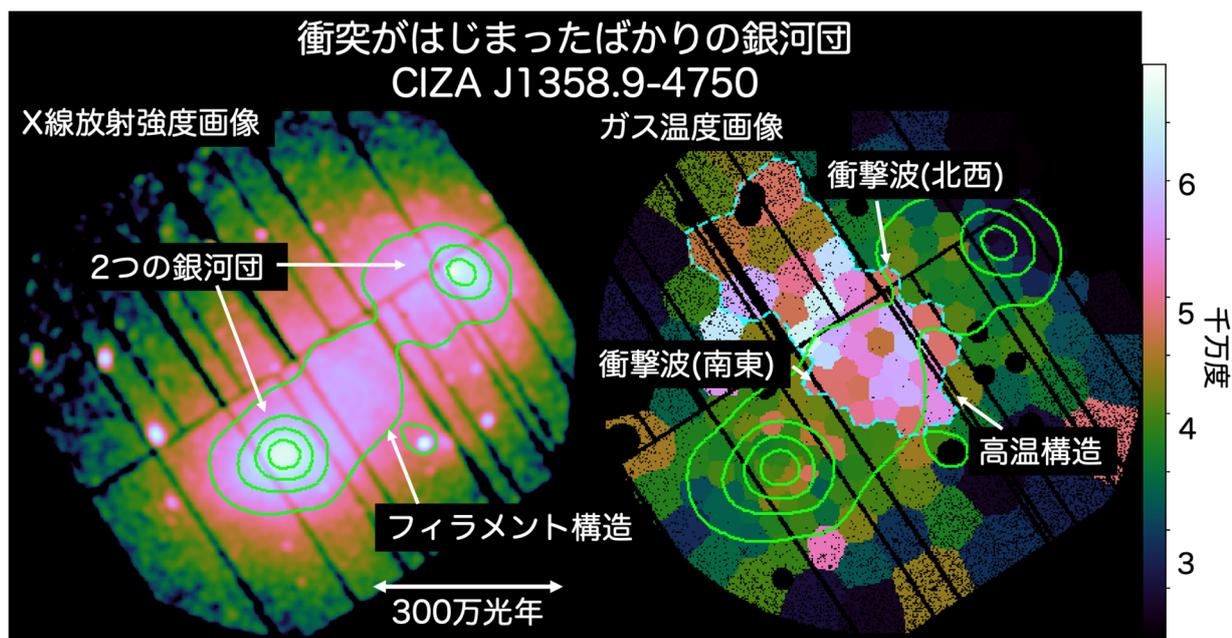


図1. 衝突したばかりの銀河団 CIZA1359 のX線強度画像(左)と温度画像(右)

【研究の手法・内容】

本研究では、地球から約10億光年離れた銀河団 CIZA J1358.9-4750(以降CIZA1359)に着目しました。CIZA1359は、約450万光年離れた2つの銀河団が存在する天体であり、X線で見ると2つのガスの目玉と中心間にまるで橋をかけたようなガスのフィラメント構造が確認できます。日本のX線天文衛星「すざく」で観測したデータは、2つの銀河団間に衝撃波の存在を示唆する明確な温度の増幅領域を示しており、

CIZA1359 は衝突がはじまったばかりの銀河団であると考えられています。

本研究グループは、X線天文衛星「すざく」と比較して、20倍ほど目が良い欧州のX線天文衛星「XMM-Newton」のデータを用いることで、CIZA1359の衝突構造を調べました。図1に示すのは、X線放射強度画像とガスの温度画像です。それぞれの銀河団の中心付近の温度は約4千万度である一方で、銀河団間には約6千万度と非常に高温なガスが幅約150万光年、直交方向に400万光年ほどに渡って存在していることが確認できます。これは、銀河団同士の衝突により、その中央に400万光年幅の2つの巨大な衝撃波が発生し、衝突軸方向に逆流してガスを加熱している証拠です。南東の衝撃波はX線天文衛星「すざく」ですでに発見されていましたが、本研究グループは、北西の衝撃波の存在を初めて発見しました。2つの衝撃波は高温ガスの温度分布から計算して、毎秒約1500 kmの速度で進んでいると見積もられ、距離を速度で徐算すると、CIZA1359は衝突を開始して約3億年しか経っていない非常に若い衝突銀河団であると考えられます。

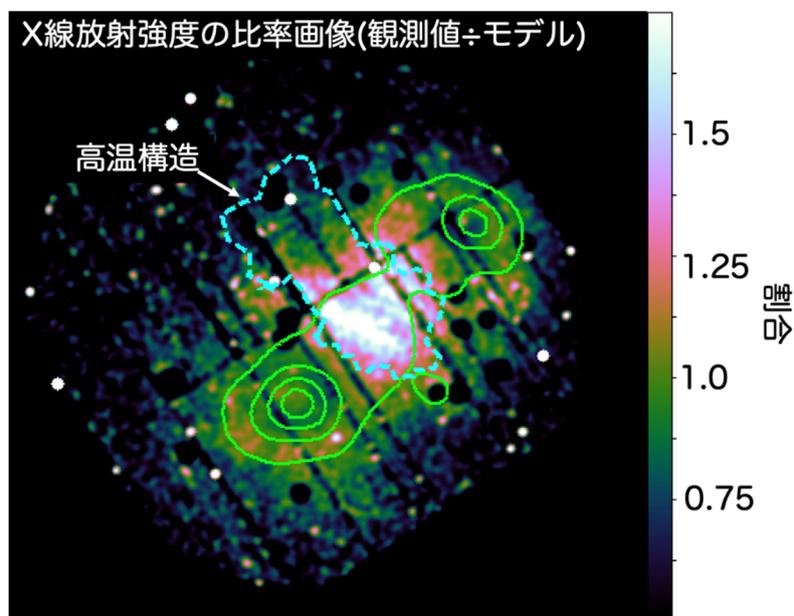


図2. 2つの銀河団間に衝突によるX線強度の増幅の存在を示唆する画像。図1左の実際のX線放射強度画像に対して、衝撃波による増幅がないと仮定したX線放射強度画像で徐算した。

では、若い衝撃波が消費する運動エネルギーはどれくらいでしょうか。私たちは、銀河団が近似的に点対称性をもつことと衝撃波が銀河団の中心部まで達していないことを利用して衝突前の形状をモデル化しました。図2は、「実際のX線放射強度画像(図1左)」と「衝撃波による増幅がないと仮定したX線放射強度のモデル画像」を比較した画像です。銀河団の中心間には、約1.8倍の増幅領域が存在し、温度分布で発見した高温構造と一致しています。本研究グループは、このX線画像の増幅が衝撃波によるものだとし、流体力学の保存則と、簡単な空間モデルにより、衝撃波の奥行きが約300万光年であると推測しました。「横・奥行き・衝撃波の速度」を掛け合わせると北西の衝撃波の運動エネルギー

ギーは、 2.3×10^{38} W となり、太陽が 1 年で消費するエネルギーのなんと 10 億倍を、ほんの 1 秒で消費する計算になります。

国立天文台水沢 VLBI 所属の藏原 昂平 博士らの研究グループは、uGMRT (upgraded Giant Metrewave Radio Telescope)^{注2)}の電波観測データを解析したところ、CIZA1359 の北西側の衝撃波面に光速近くにまで加速された電子によるシンクロトロン放射と呼ばれる電波放射が広がっていることを発見しました。その明るさは 3.5×10^{33} W と計算され、衝撃波の入力エネルギーと比較することで、生まれてから 3 億年の時点での変換効率が約 10^{-5} と求まりました。まだ一つの例ですが、これをきっかけに変換効率の分布を知ること、宇宙最大の衝撃波の中で何が起きているのかを明らかにしてゆきます。

【成果の意義】

本研究は、地球から比較的近い銀河団 CIZA J1358.9-4750 における 2 つの衝撃波の存在を初めて発見し、これまで推定するのが困難であった衝撃波の消費する運動エネルギーを簡単なモデルを構築することによって、観測から推定することに成功しました。また、銀河団衝突の比較的若い過程で、衝撃波から非熱的エネルギーに変換される様子を X 線と電波で同時に捉え、定量化したことは、銀河団の進化の理解を促進する重要な成果であると言えます。近年発達してきた「MeerKAT」や「LOFAR」などの低周波望遠鏡や今年打ち上げ予定の X 線天文衛星「XRISM」などの新しい観測によって、銀河団同士の衝突で生成した巨大衝撃波で消費されるエネルギーの流れの理解がさらに深まる予定です。

【研究者コメント】

この研究では過去のデータを詳しく再解析することで、衝突したばかりの銀河団に、我々が住む天の川銀河の直径の 30 倍の幅と奥行きを持つ、2 つの「生まれたての巨大衝撃波」の存在を初めて発見しました。さらに一歩進んで、衝突の全体像をモデル化したことで、この衝撃波の運動エネルギーを推定できました。過去のデータでも新しい視点でしっかり解析すると新しい発見があることが、科学研究の面白いところです。

新世代の電波望遠鏡によるシンクロトロン電波観測は、我々が発見した「生まれたての巨大衝撃波」で、すでに粒子加速が始まっている証拠を捉えました。本年打ち上げ予定の X 線天文衛星「XRISM」を使えば、衝撃波の運動エネルギーが高温ガスの「乱流」をうむ姿を初めて捉えられます。この 2 つは画期的で、宇宙の巨大衝撃波の中で生み出される莫大なエネルギーが生み出す、激しい高エネルギー現象を明らかにしていきたいと考えています。

【用語説明】

注 1)シンクロトロン電波:

光に近い速度の電子が磁場から力を受けて螺旋状に運動することで放射する電波。

注 2)uGMRT(upgraded Giant Metrewave Radio Telescope):

インドにある 30 台のアンテナからなる電波干渉計。50 MHz-1.5GHz までの 5 帯域をカバーする。

【論文情報】

雑誌名:日本天文学会 欧文研究報告(PASJ)

論文タイトル:XMM-Newton view of the shock heating in an early merging cluster, CIZA J1358.9-4750

著者 : Yuki OMIYA(1), Kazuhiro NAKAZAWA(1,2), Kyoko MATSUSHITA(3), Shogo B. KOBAYASHI(3), Nobuhiro OKABE(4), Kosuke SATO(5), Takayuki TAMURA(6), Yutaka FUJITA (7), Liyi GU(8), Tetsu KITAYAMA (9), Takuya AKAHORI(10), Kohei KURAHARA(10) and Tomohiro YAMAGUCHI(1)

(1) 名古屋大学大学院理学研究科

(2) 名古屋大学 素粒子宇宙起源研究所

(3) 東京理科大学 理学部

(4) 広島大学大学院先進理工系科学研究科

(5) 埼玉大学大学院理工学研究科

(6) JAXA 宇宙科学研究所

(7) 東京都立大学大学院理学研究科

(8) SRON Netherlands Institute for Space Research

(9) 東邦大学大学院理学研究科

(10) 国立天文台 水沢 VLBI 観測所

DOI: 10.1093/pasj/psac087

URL: <https://academic.oup.com/pasj/article/75/1/37/6862036>