

## 直角に折れ曲がるジェットから銀河団の巨大な磁場を発見

国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学大学院理学研究科 竹内 努 准教授は、自然科学研究機構国立天文台、ノースウェスト大学(南アフリカ共和国)、東京大学宇宙線研究所(国立大学法人東京大学 大学附置研究所)、オランダ宇宙研究所、国立大学法人鹿児島大学、国立大学法人九州大学、南アフリカ電波天文台、SKA 機構などとの国際研究チームにおいて、はと座の方向 6.4 億光年の距離にある銀河団 Abell 3376 を、南アフリカ電波天文台が運用する電波干渉計「ミーアキャット」<sup>注1)</sup>を使って観測しました。この銀河団は、大小ふたつの銀河団が合体している現場で、この観測から銀河団の中心に位置する銀河から噴射されるジェットが、小さい銀河団の境界面で二手に折れ曲り、細くたなびく様子が初めてとらえられました。

この構造を作るメカニズムを解明するため、国立天文台の天文学専用スーパーコンピュータ「アテルイ II」<sup>注2)</sup>を用いたシミュレーションを実施しました。その結果、銀河団を包み込む磁場にジェットがぶつかることで二手に折れ曲り、折れ曲がった先から磁場に沿って細く伸びる構造を再現することに成功しました。

本研究によって、銀河から吹き出すジェットと銀河団磁場の相互作用の現場が初めて捉えられました。ジェットの構造を詳細に調べることで、直接観測することが難しい磁場の構造を明らかにするという新しい手法が得られたこととなります。

この研究成果は、2021年5月6日付け英国科学雑誌『Nature』に掲載されました。

本研究は、文部科学省/日本学術振興会科学研究費補助金(20J13339,20J12591,19K03916,17H01110,19H05076)の支援を受けて行われました。

## 【ポイント】

- 宇宙に存在する「銀河団」は100から数千の銀河からなり、数千万度から約1億度もの高温の「銀河団ガス」で満たされている。銀河団ガスは磁場を持ち、銀河団同士が衝突を繰り返す過程で、揃った強い磁場が作られると考えられている。
- Abell（エイベル）3376も、大小2つの銀河団の正面衝突が起こっている合体銀河団である。小さい銀河団の冷たいガスが大きい銀河団の熱いガスを押しつけ、コールドフロントと呼ばれる境界面ができている。
- 本研究では、南アフリカ電波天文台が運用する電波干渉計「ミーアキャット」を用い、電波で銀河団 Abell 3376 の中心領域を観測し、銀河団 Abell 3376 の中心に位置する MRC 0600-399 のジェットの詳細な様子を高精度に描き出した。
- ミーアキャットの高感度観測で、銀河団の中心に位置する MRC 0600-399 から上下に伸びる2本のジェットのうち、上に伸びたジェットがコールドフロントの位置で折れ曲がっていることが明らかになった。さらに、非常に細いジェットが風上となる左側に約30万光年も伸びている事に加え、風下となる右側にもジェットが伸びていた。我々国際研究チームは、この両側に曲がったジェットを「両鎌(ダブルサイス)構造」と名付けた。
- この構造解明のため、国立天文台の天文学専用スーパーコンピュータ「アテルイ II」を用いた3次元磁気流体シミュレーションを行い、コールドフロントの位置でジェットが磁場とぶつかった後、ジェットが折れ曲がる様子を再現した。ジェットがぶつかり変形を受けた磁力線が縮もうとする力によってジェットの進行方向が曲げられ、コールドフロントに沿ってジェットが流されていることが明らかになった。
- 本研究によって、銀河から吹き出すジェットと銀河団磁場の相互作用の現場が初めてとらえられた。

## 【研究背景と内容】

宇宙では銀河は一様に分布しているのではなく、銀河同士が100から数千個ほど群れ集まった「銀河団」を構成しています。この銀河団は、数千万度から約1億度もの高温のプラズマガス「銀河団ガス」で満たされていることが、エックス線観測から示唆されています。同時に、プラズマ中の高エネルギー粒子が磁場の周りを旋回運動する際に放射する電波も観測されることから、銀河団ガスは磁場を持つことが分かっています。銀河団は、銀河団同士が衝突することで大きく成長していきますが、衝突を繰り返す過程で、揃った強い磁場が銀河団ガス中に作られていくと考えられています。

はと座の方向6.4億光年先にある銀河団 Abell（エイベル）3376も、大小2つの銀河団の正面衝突が起こっている合体銀河団の一つです。過去の観測から、小さい銀河団は西から東(右から左)に運動していることがわかっています。2つの銀河団にはそれぞれ温度の異なる銀河団ガスが付随し、小さい銀河団の冷たいガスが大きい銀河団の熱いガスを押しつけるように、整ったガスの境界面ができていることが知られています。この境界面が「コールドフロント」と呼ばれ、ちょうど天気図の寒冷前線のような構造

をしています。この大きな銀河団のガスに存在する磁場が小さな銀河団の表面に揃った磁場を作る事で、境界面を維持しているという説が最も有力ですが、磁場の詳細な構造に関しては詳しくは分かっていませんでした。

さらに、小さい銀河団の中心には MRC 0600-399 と呼ばれる銀河が存在し、過去の観測によって、この銀河の中心にある巨大ブラックホールから「ジェット」と呼ばれる高エネルギー流が噴出していることが知られていました。このジェットは、上下(南北)に差し渡しで約 16 万光年の距離に伸び、あるところから左向きに折れ曲がる不思議な形状をしている事がわかっていました。左側に移動する小さい銀河団は、大きい銀河団に付随する銀河団ガスを向かい風として左から右に受けることとなります。一般的には銀河団ガスの風を受けるとジェットは風下に流れますが、MRC 0600-399 のジェットは風上に向かって伸びる大変奇妙な形をしているのです。

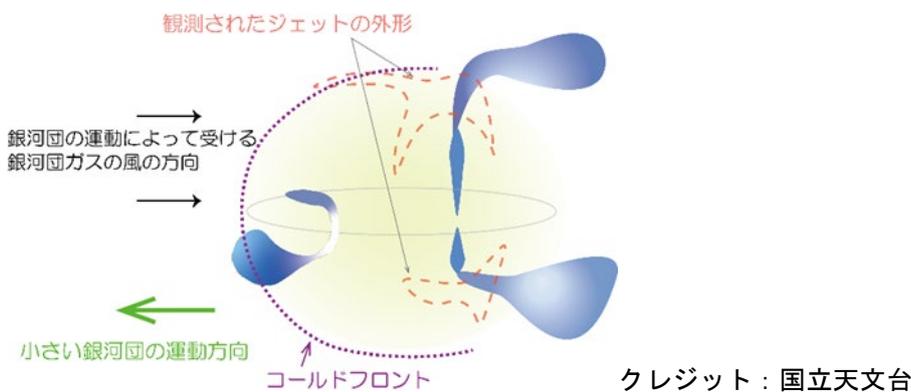
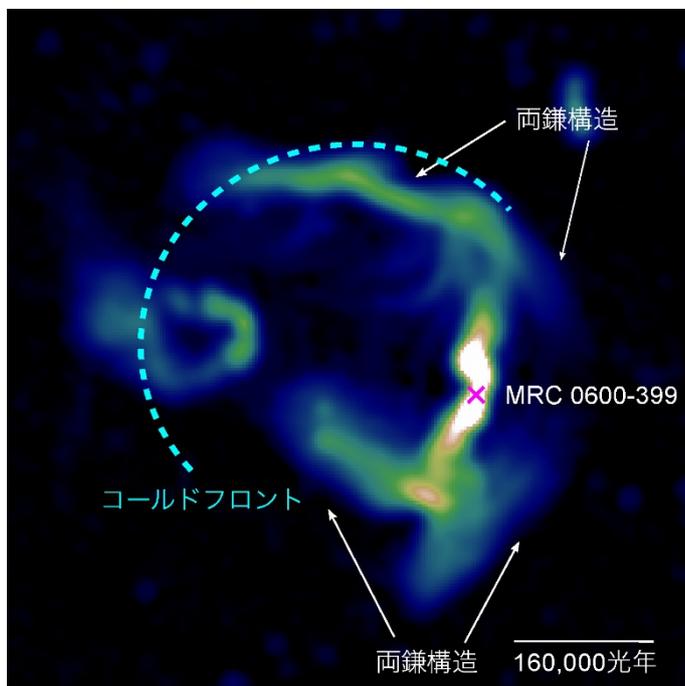


図 1: 一般的に考えられている銀河団とジェットのたなびく向きの関係。オレンジの点線が実際に観測されたジェットの形を示しており、左から右に曲がった青い領域がこの小銀河団の運動によって折れ曲がる場合に予想される構造。紫の点線は小銀河団が右から左へ運動する際に形成されるコールドフロントを示している。

南アフリカ共和国のノースウェスト大学で研究を進めているジェームズ・チブエゼ准教授を中心に、名古屋大学の竹内 努准教授、国立天文台の酒見 はる香研究員(日本学術振興会特別研究員 PD. 論文採択時は九州大学大学院生)、町田 真美准教授、赤堀 卓也任研究員、鹿児島大の中西 裕之准教授らによる国際研究チームは、宇宙における磁場の構造や役割を観測と理論の両面から解明を目指し、南アフリカ電波天文台が運用する電波干渉計「ミーアキャット」(MeerKAT)を用い、周波数 1.28 GHz の電波で銀河団 Abell 3376 の中心領域を観測しました。この周波数では、プラズマ中の高エネルギー粒子が磁場に沿って旋回運動するときに放射される電波を観測することができます。この観測によって、銀河団 Abell 3376 の中心に位置する MRC 0600-399 のジェットの細かい様子までかつてないほど高精度に描き出すことに成功しました。観測をリードしたチブエゼ氏は「もともとは、銀河団 Abell 3376 の広範囲な磁場構造を調べる目的の観測でした。しかし、ミーアキャットの高い感度によって、銀河団の中心に位置

していた MRC 0600-399 に、予想外の構造が見つかったのです。そこでまず私たちは、この銀河を詳細に調べることにしました。」と述べています。

この観測から、上下に伸びる 2 本のジェットのうち特に上に伸びたジェットの折れ曲がる位置が、コールドフロントの位置と一致していることが明らかになりました。さらに、非常に細く絞られたジェットが風上となる左側に約 30 万光年も伸びている事に加えて、風下となる右側にもジェットが伸びていたのです。「銀河団の運動によって受ける風でジェットが折れ曲がる場合は、向かい風の方にはジェットは伸びません。また、向かい風を受けて折れ曲がるジェットは、銀河団ガスと混ざり合い、一般的には太くなる傾向がありますが、今回観測されたジェットは、折れ曲がった後も細く絞られた構造を維持しています。これまで知られていた構造とは明らかに異なるジェットの姿に大変驚きました」とデータ解析で中心的役割を担った酒見氏は語ります。国際研究チームは、この両側に曲がったジェットを両鎌に見立て、「両鎌(ダブルサイズ)構造」と名付けました。

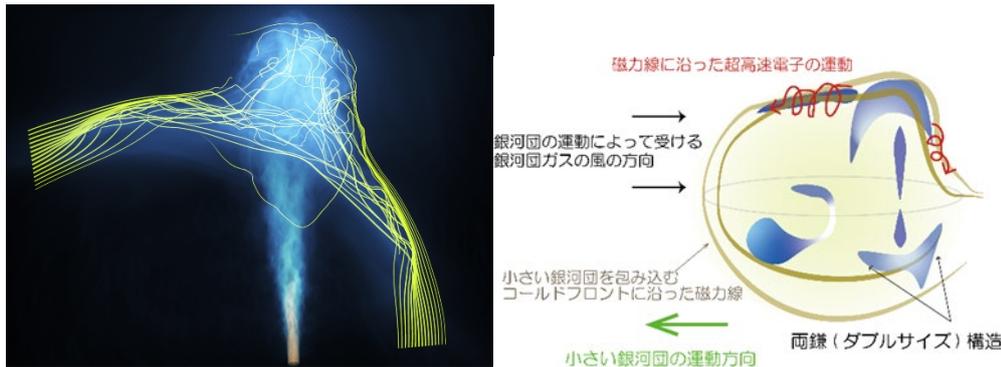


クレジット: Chibueze, Sakemi, Ohmura et al. (2021) Nature Fig. 1 (b)より一部改変

図 2: 電波干渉計ミーアキャットで観測された銀河 MRC 0600-399 のジェットの姿。×印のところにブラックホールが存在し、そこから上下にジェットが吹き出している。上下に吹き出したジェットは、途中で左右に折れ曲がり、特に左側に細長く伸びた構造を持っている。過去の観測との比較から、上に伸びたジェットは、コールドフロントの位置で折れ曲がっていることがわかった。

銀河団から受ける風と逆向きにジェットが細く伸びるメカニズムの解明のため、国際研究チームは、国立天文台の天文学専用スーパーコンピュータ「アテルイ II」を用いた 3 次元磁気流体シミュレーションを行いました。国際研究チームは、コールドフ

ロントに沿った磁場がジェット運動を妨げているのではないかと考え、コールドフロントを模したアーチ状の磁場とジェットがどのように相互作用するのかを数値計算で確かめました。その結果、コールドフロントの位置でジェットが磁場とぶつかった後、ジェットが折れ曲がる様子を再現しました。計算を行った東京大学宇宙線研究所の大村 匠 研究員(論文採択時は九州大学大学院生、日本学術振興会特別研究員)は次のように語ります。「私たちの計算によって、コールドフロントの位置に揃った磁場が存在する可能性が示されました。アーチ状の磁場を作る磁力線はゴム紐のように振る舞います。ジェットがぶつかり変形を受けた磁力線が縮もうとする力によってジェットの進行方向が曲げられ、コールドフロントに沿ってジェットが流されていると解釈することができます。」



シミュレーション画像・動画クレジット：大村匠、町田真美、中山弘敬、国立天文台4次元デジタル宇宙プロジェクト

解説画像クレジット：Chibueze, Sakemi, Ohmura et al. (2021) Nature Fig. 4 より一部改変

図3: (シミュレーションの画像・動画) <https://youtu.be/-I9nMMDUncE>

(左)スーパーコンピュータ「アテルイ II」による、ジェットと銀河団磁場の相互作用の3次元磁気流体シミュレーション。オレンジから青の部分はガスの速度を表し、赤いほど速度が速い。黄色い線は磁力線を表している。まっすぐに進んだジェットはアーチ型の磁場にぶつかる事で、ジェットの進む向きを磁力線の方向に徐々に変えていく。ジェットの内側のガスは様々な向きに運動しているため、最初は揃っていた磁場も複雑に絡まり合う。磁力線に沿ってジェットが伝わる際に、ジェットが上向きに進む力が少し残っているために、左右に伸びた磁力線がジェットによって持ち上げられる様子が見て取れる。この磁力線が持ち上がった部分が、折れ曲がったジェットの先端になる。

(右)本研究が提唱するシナリオの模式図。小さな銀河団は右から左へ運動している。そのため、小さな銀河団は左から右へ風を受けている状態である。この時、小さな銀河団と大きな銀河団の境界であるコールドフロントには、大きな銀河団の磁場が掃き集められて、小さな銀河団を磁力線が包み込む(図中の茶色の曲線)。MRC0600-399 から上下に噴出したジェットがコールドフロントの磁力線とぶつかり、磁場の力によってジェットの進行方向を変え、ジェットは磁場に沿って伝わる。今回の数値計算では、ジェットが磁場に沿って進む様子のみを再現している。実際には、ジェットの中で作られた超高速粒子が更に磁力線を伝わっていく事でより長く電波で明るく光る構造を作っていると考えている。

## 【成果の意義】

本研究が提唱するシナリオでは、ジェットはコールドフロントに沿った磁力線に沿って伸びるため、曲がった後のジェットが細く絞られた状態で伸びるという特徴を説明することが可能です。さらに、上下に噴出するジェットの電波強度が途中で弱くなり、ジェットの折れ曲がりの位置で再度強くなるという観測的特徴が、このシミュレーションにおいても再現されました。このように観測の様々な特徴を再現することから、コールドフロントの磁場によってジェットが曲げられていることが強く示唆されます。

本研究は、銀河から吹き出すジェットと銀河団磁場の相互作用の現場をとらえた初めての成果です。議論全体を監修した研究チームの竹内は「今回の研究は、ジェットと銀河団ガスの相互作用を長波長電波で観測することによって、一般に直接検証の難しい銀河団磁場の構造を知ることができることを明快に示しました。これは天文学に残されたフロンティアの一つである、長波長電波観測の強力を示す一例とみなせます。いよいよ建設の始まる超大型伝播干渉計スクエア・キロメートル・アレイ (Square Kilometre Array: SKA) 計画をはじめとする装置により、宇宙磁場の起源と役割、そして広く宇宙進化の全体像を検証することができると期待されます。」と述べています。

## 【用語説明】

(注1) 電波干渉計「ミーアキャット」:

南アフリカ共和国のカルー砂漠に設置された電波望遠鏡で、6.4 台のアンテナをつないで干渉計として用いることで観測をしている。1 台の直径は 13.5 メートルで、これらのアンテナを 8 キロメートルの範囲に配置することで、直径 8 キロメートルの望遠鏡と同じ分解能で観測することが可能となる。

(注2) 天文学専用スーパーコンピュータ「アテルイ II」:

国立天文台天文シミュレーションプロジェクトが運用する、シミュレーション天文学専用のスーパーコンピュータ。岩手県奥州市の国立天文台水沢キャンパスに設置され、3.087 ペタフロップス(1 秒間に約 3000 兆回の浮動小数点演算を行う)の理論演算性能を誇る。

<https://www.nao.ac.jp/research/telescope/aterui2.html>

## 【論文情報】

雑誌名: Nature

論文タイトル: “Jets from MRC 0600–399 bent by magnetic fields in the cluster Abell 3376”

著者: Chibueze, Sakemi, Ohmura et al.

DOI: 10.1038/s41586-021-03434-1

URL: <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03434-1>