富山大学 UNIVERSITY OF TOYAMA　名古屋大学 NAGOYA UNIVERSITY

Press Release

令和８年　１１月　６日

報 道 機 関　各位

ブラックホールの間欠泉「宇宙ジェット」の予知がついに可能に
―噴き出る瞬間をとらえる観測体制を事前に整えられる時代へ―

■ ポイント

・宇宙ジェットの発生予報法の開発に世界で初めて成功

・観測体制の根拠のある事前準備による詳細な観測データの取得が可能に

・生命の維持・進化をコントロールしてきた宇宙線の発生起源の解明へ貢献

■ 概要

富山大学 大学院 理工学研究科の川口 俊宏 教授と名古屋大学 宇宙地球環境研究所の山岡 和貴 准教授の研究グループは、ブラックホールからほぼ光の速さで細長くプラズマが噴出するジェット現象の発生を 1 日から 10 日前から予測する手法を、世界で初めて開発しました。

宇宙のあまねく場所に存在するブラックホールは普遍的にジェット現象を起こし、生命の維持・進化をコントロールしてきた宇宙線の主要発生源です。しかしいつ起こるかを予知する手段が無く、詳細な観測データを得ることがとても困難であることが、その理解へのボトルネックになっていました。本研究は、同グループが昨年発表した宇宙ジェットの発生条件が複数天体で共通して成り立つことを明らかにし、発生予知を可能にしました。また、ブラックホールへのガスの大量落下がジェットの発生を起こしているわけではないことも明らかになり、プラズマ噴出が起きる原理の解明へ寄与すると期待されます。

本研究成果は、国際学術雑誌「The Astrophysical Journal」に 2026 年 11 月 5 日付（日本時間）に掲載されました。

■研究の背景

宇宙のあまねく場所に存在するブラックホールは、周辺のガス（プラズマ）を吸い込む直前、ガスの一部をほぼ光の速さ（光の速さの 99%以上）で、水鉄砲や温泉地の間欠泉のように細長く噴出する現象（ジェット現象）を起こします。太陽の数倍程度の質量をもつ恒星質量ブラックホールだけでなく、各銀河の中心に位置し太陽の 10 万倍から数 10 億倍にまでおよぶ質量をもつ巨大ブラックホールまで、普遍的にジェット現象が発生します。

ブラックホールは、それ自身が相対論的天体であり、ほぼ光速で噴き出すプラズマジェットも物理法則を検証する「天然の実験場」といえます。さらにジェットは、銀河外まで影響を及ぼし銀河の成長の歴史をコントロールしてきたとも考えられています。また、突然遠方の宇宙で光り輝き太古の宇宙の調査を可能にしてくれるガンマ線バーストも、ジェットがたまたま地球を向いている時に観える現象です。

しかしながら、この宇宙のどこでも起こるジェット現象は発見から 100 年以上経つものの、どのように・なぜ発生するのかを、未だ人類は理解していません。日本物理学会が 2017 年にまとめた「物理学 70 の不思議」にも記載されている大きな謎です。

地球周辺に限らず宇宙空間では、ニュートリノなど高いエネルギーを持つ粒子が飛び回っており、「宇宙線」（宇宙放射線）（※１）と呼ばれています。宇宙線は生物の DNA に損傷を与えガンや白内障の発生など、生命の起源・維持・進化をコントロールしてきた要因の一つです。2026 年のノーベル物理学賞の対象研究で示されたように、宇宙ジェット現象は高エネルギーニュートリノや高エネルギーガンマ線の発生源として最有力候補です（※２）。

これまでジェット噴出を捉える観測データが少なかった最大の原因は、いつ噴出するのかを予測できず、良いデータが得られるのはかなり稀な例のみでした。そこで本研究では、ジェットが発生する条件と噴出前の予兆現象を複数天体について調査を行い、噴出時期を予報する「ジェット予報（※３）」手法を開拓しました。

■研究の内容・成果

私達は高速ガス噴出流が発生する理由を明らかにするため、ブラックホールと太陽のような恒星が重心の周りを互いに周る連星を成している天体のうち、多数回ジェットを噴出させている天体の X 線と電波での観測データを分析しました。その結果、ブラックホールへ流れ込むガスが形成する円盤状の構造において、最もブラックホールに近い位置（内縁半径）が、(i)充分速くブラックホールへ向けて近付いて急激に小さくなり、(ii)安定してブラックホールの周りを回転することができる最内縁安定軌道（※４）に達すること――の 2 つが噴出条件であることを明らかにし、昨年論文発表しました（Yamaoka, Kawaguchi et al. 2025; 図 1）。

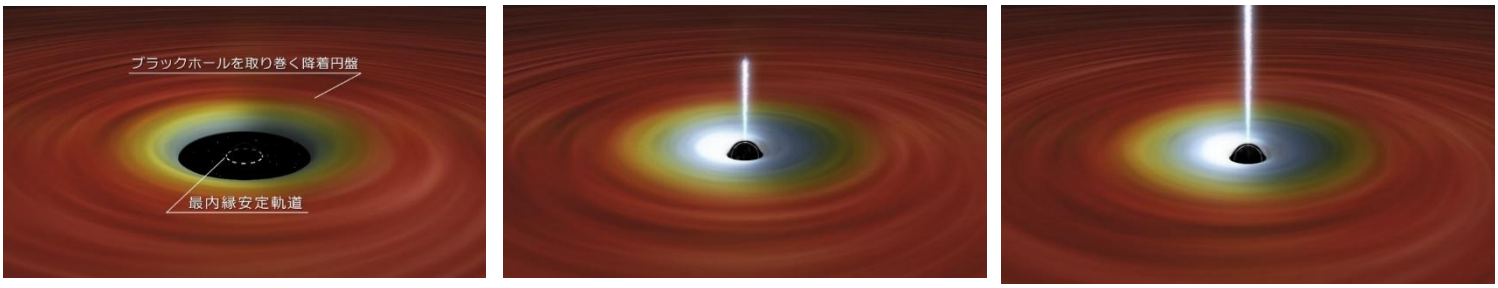


図 1: ジェット発生の前には、ブラックホールの周りを回っているガス円盤の内縁半径は、ブラックホールから遠い位置にある状態（左）から、最内縁半径に向けて縮みます（中央）。円盤の内縁半径が十分速く最内縁半径軌道まで縮むと、ジェットがしばらく噴出します（中央・右）。しかし円盤の内縁半径の縮む動きが止まると、ジェット噴出自体も止まります。（川口・山岡のホームページにて動画ファイルをダウンロードできます。）

本研究では、私達が昨年明らかにしたこのジェット噴出前の予兆現象が、単一の天体での特殊な振る舞いではなく、ブラックホール天体全般に普遍的に成立すると実証することを

目的に、計 4 天体(XTE J1859, XTE J1550-564, GX 339-4, MAXI J1820+070)の振る舞いを詳細に調べました。その結果、調べた全 4 天体で共通の振る舞いをしていることが明らかになりました(図 2)。つまり、ガス円盤の内縁半径がジェット発生の 1 日から 10 日程度前から急速に縮み始めて、X 線変動率も減少を続けることがわかりました。また、前者は後者よりも先に発生し始めることもわかり、内縁半径の継続した計測(モニター)がジェット予報にとても便利な手法であることを明らかにしました。

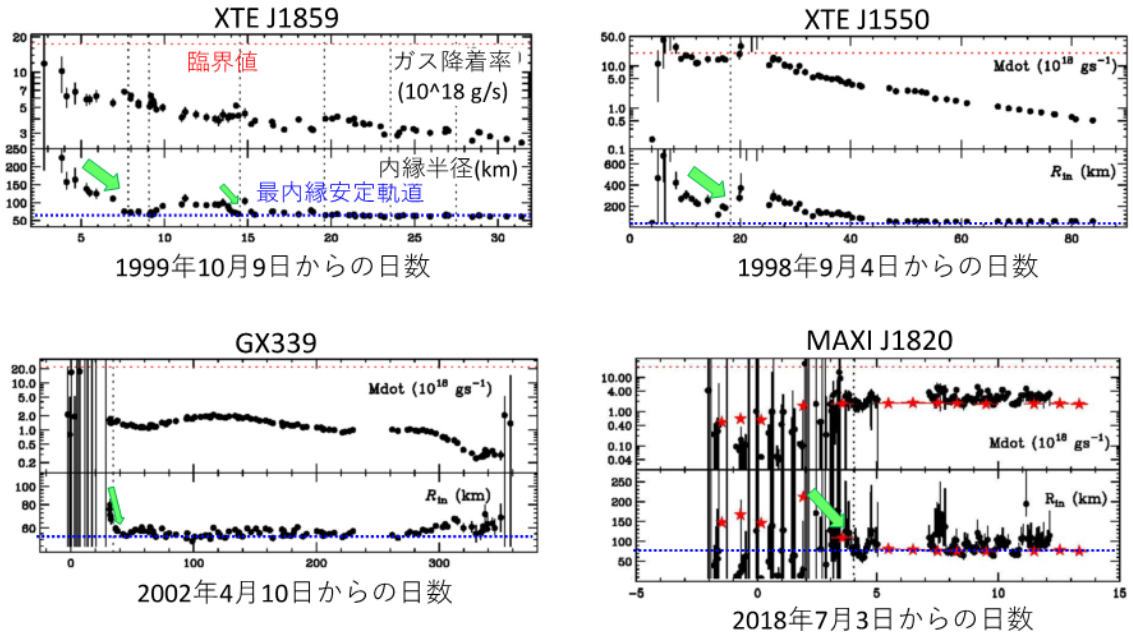


図 2: 調査した 4 天体におけるガス円盤の内縁半径とガス降着率の時間変化。縦の破線は、電波観測から推定されたジェット噴出のタイミングを表し、水平な点線は、降着率の臨界値(赤色)と最内縁安定軌道の半径(青色)を示しています。共通して、ジェット噴出前に円盤の内縁半径が急減少していること(緑色矢印)がわかりました。

X 線データの観測によりガス円盤の内縁半径と X 線変動率の減少が続き、もうすぐ最内縁半径に着きそうな状況になれば、「〇日〇時頃にジェット発生が予想される」と世界の研究者に緊急連絡(アラート発令)し、観測装置の準備を整えることができるようになります。

また、ブラックホールへのガス落下率(ガス降着率)の時間変化を推定する手法も本研究で開発し、ジェット噴出の前後の増減を調べました(図 2)。その結果、ジェット噴出時に降着率の急増は発生していないこと、および(少なくとも 2 天体では)降着率の臨界値よりも十分小さい状況でジェットが発生していることを明らかにしました(※５)。つまり、「ガスが一時に大量にブラックホールへ流れ込み、その一部が 90 度向きを曲げられてガス円盤の回転軸方向に細く流れ出す」という描像ではないことがわかりました。ジェット生成にはガスをたくさん落とすことを必須とする、あるいは必ず誘発してしまう理論モデルは実際の

宇宙を表現していない事を意味します。

■今後の展開

私達が明らかにしたジェット噴出前の予兆現象が、多くの天体で成り立つことを確認・検証できました。本研究から次の 2 つの波及効果が期待できます。

(1) 良質な観測データの取得: 「噴出が予測されるタイミングに先立ち、緊急観測へ向けたアラートを発する」ジェット予報を確立できました。これまで、ジェット噴出現象を捉える目的の観測を開始するかどうかや、いつ開始するのかの判断はとても困難でした。長く謎であったジェットの噴出条件が明らかになったことで、予測される時期に観測資源を集中でき、高感度検出装置を用いた高頻度観測に繋がります。噴出する日時の予報だけでなく、円盤内縁が最内縁安定軌道に達した後は、内縁半径が一旦離れてまた速く縮まることができるようになるまでジェット噴出は起きないことから、観測体制を当面休養させることができ、落ち着いて次のジェット噴出へ向けて追加の多波長にわたる観測網を構築する余裕もできます。

得られる良質なデータにより、これまで不明点ばかりであったジェット噴出・宇宙線発生の物理過程を明らかにする研究を加速させます。例えば、どのように超高エネルギーの光子(ガンマ線)や粒子(宇宙線)が発生しているのか、ブラックホールの回転エネルギーは取り出せるのか、取り出せるならどのようにか、宇宙の長い歴史において各銀河の成長史にジェット現象はどのように影響を及ぼしてきたかなどの解明に大きく寄与できます。

予報により得られたデータは、ジェット予知自体の精度向上にも役立ちます。ジェット噴出には内縁半径の縮む速さはどれぐらい速い必要があるのか、噴出前の予兆現象が起き始める１日から１０日という長さは何が決めているのかなどが明らかになると期待できます。

(2) 理論への制限: ジェット噴出機構について、ブラックホールの自転のエネルギーを磁場を介して引き抜く機構など、多くの理論的提案がされてきました。本研究による、動的な条件が噴出に本質的だという結果を受けて、円盤内縁が最内縁安定軌道にある時にずっとジェットが出てしまう機構、つまり静的な条件で噴出してしまう多くの理論モデルに修正が必要になります。

さらに、もしブラックホールの速い自転がジェット噴出の原因であった場合、多数のブラックホールのジェット噴出時の振る舞いを本研究と同様に調べると、ゆっくり回転するブラックホールではガス円盤の内縁半径が急激に縮む予兆現象を示してもジェットを出さないはずです。10 天体から 20 天体程度で調査を行い、内縁半径の予兆現象を示した後に全ての天体で必ずジェットが出ていた場合、「ブラックホールの回転エネルギーによるジェット生成」という現代の宇宙物理学・天文学における一大パラダイムの終焉が予想されます。

【用語解説】

※１）宇宙線・宇宙放射線

地上では大気と地磁気が守ってくれているため生物への悪影響を減らしていますが、宇宙線は生物の DNA に損傷を与えガンや白内障の発生など、生命の起源・維持・進化、ひいては人類の発生をコントロールしてきた要因の一つです。国際宇宙ステーションへ滞在する飛行士の船外活動や航空機のパイロットや客室乗務員の被ばく量は安全な範囲に収まる運用が留意されています。銀河の中で宇宙線強度が強過ぎない場所でのみ生命が発生・生存できる「銀河ハビタブルゾーン」という研究も、第 2 の地球探しなどの観点で進められています。

※２）ジェット起源のガンマ線

恒星程度の質量を持つブラックホールからジェットが噴出している天体はマイクロクェーサーと呼ばれ、高エネルギーガンマ線が検出される例が多数あります。天の川銀河の中を飛び交っている宇宙線の加速源(Pevatron)の有力候補として脚光を浴びています。このガンマ線の発生にジェット現象が関与していると考えられています。名古屋大学も参加している建設中のチェレンコフ望遠鏡アレイ天文台(CTAO)による TeV ガンマ線観測が期待できます。

※３）ジェット予報

太陽表面でのフレア現象などが地球へ届き磁気嵐が発生すると、人工衛星の電子機器の損傷、漁業無線などの通信障害、送電線の異常電流発生・火災、宇宙空間で作業する宇宙飛行士の健康被害など、通信・放送・送電インフラへ多大な障害をもたらします。これらの被害の軽減を目指して日々行われている宇宙天気予報(Space Weather Forecast)を模して、ジェット予報(Jet Forecast)と造語しました。

※４）最内縁安定軌道

太陽の周りを回転する地球のように、一般には中心天体からの重力と遠心力が釣り合う速度が、中心天体からの距離それぞれに存在します。しかし、ブラックホールのごく近傍では、相対論的効果により両者が釣り合うことができる距離に下限値があります。最もブラックホールに近い位置で重力と遠心力が釣り合うことができる円軌道を、最内縁安定軌道と呼びます。そこよりも近い位置では、釣り合って距離を保つことができないため、ガスは速やかにブラックホールへ向けて流れ込みます。

※５）ガス降着率の臨界値

ブラックホールへ向けてガスが落下(降着)すると、最内縁安定軌道まではガスどうしがこすれ合い高温になることにより、ガスは明るく光ります。光の強さは、ガスの落下率(降着率)に比例する場合が多いです。この光が外向きにガスを押す(放射圧)ため、ガスの落下運動を妨げます。最も単純に球対称の形状を考えた際に、光が押し出す効果のためにガスはこれ以上の降着率では落下できないという臨界値があります。この臨界値に近い、又は超える量のガスが落ちる時、ガスは噴き出される方向(ブラックホールから遠ざかる方向)によ

り強く力を受けます。

【論文詳細】

論文名： Jet Forecast: Timing of Discrete Jet Ejections of Stellar-Mass Black Holes Anticipated via X-ray Properties
著者： T. Kawaguchi（富山大学）and K. Yamaoka（名古屋大学）
掲載誌： The Astrophysical Journal 誌
DOI： https://doi.org/10.3847/1538-4357/aeacc6

本研究は、国立天文台　TMT 戦略基礎開発研究経費、名古屋大学 宇宙地球環境研究所 一般共同研究、科学研究費補助金(課題番号：25K07370)の支援のもとで行われました。