



名古屋大学
NAGOYA UNIVERSITY



富山大学
UNIVERSITY OF TOYAMA

配布先: 文部科学記者会、科学記者会、名古屋教育記者会、富山大学関係報道機関

2025 年 4 月 10 日

報道機関 各位

ブラックホール長年の謎“ジェット現象”の噴出条件を解明 新たな理論モデルとブラックホール観測の進展へ貢献

【本研究のポイント】

- ・ブラックホール周辺からほぼ光の速さでガスが噴き出るジェット現象の発生条件を解明。
- ・流れ込むガスが十分速くブラックホールへ近付くことが噴出する条件。
- ・これまで提案されてきた多くの理論モデルは大きく見直しが必要。
- ・宇宙の歴史をコントロールしてきたプロセスの理解へ前進。

【研究概要】

名古屋大学宇宙地球環境研究所の山岡 和貴 特任准教授、富山大学大学院理工学研究科の川口 俊宏 教授らの国際研究グループは、ブラックホールからほぼ光の速さで噴出するジェット現象の発生条件を明らかにしました。

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発生させ、そのメカニズムは長年の謎とされてきました。本研究はその一端である、発生条件について観測的に解明しました。

本グループは、ブラックホールと恒星からなる連星系の X 線と電波での観測データについて、時間微分量や時間積分量を用いて分析しました。その結果、ブラックホールへ流れ込むガスが形成するガス円盤において、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^{注 1)}に達すること——の 2 つが噴出条件であると分かりました。

本研究により(1)動的な条件でジェット噴出が起きることが分かったため、静的な条件でジェット噴出する多くの理論モデルに修正が必要であることが分かりました。また、(2)ジェット噴出の予兆現象が分かったことで、噴出を捉えるための緊急好機観測の成功率が上昇すること、(3)ジェットが当分噴出しない条件も分かったことから、噴出が予想されるタイミングに観測資源を集中できること、および(4)各銀河の進化史をコントロールしてきたと考えられるジェット現象の理解を前進させることなどが期待されます。

本研究成果は、2025 年 4 月 8 日付(日本時間)国際学術雑誌『Publications of the Astronomical Society of Japan』に掲載されました。

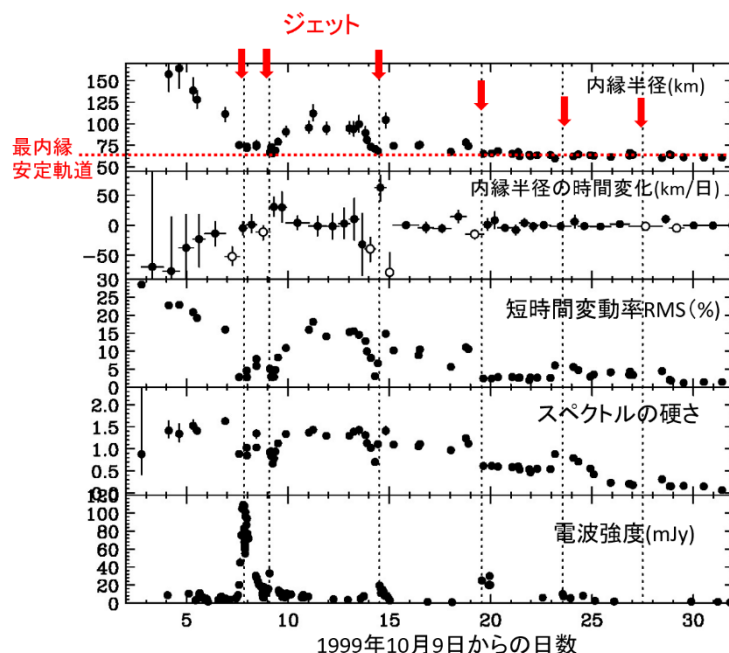
【研究背景と内容】

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。後者は、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、突然光り輝き太古の宇宙の情報を我々に知らせ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だと理解されています。

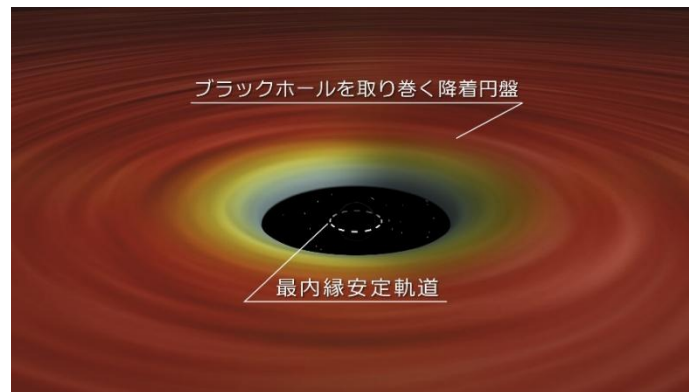
しかしながら、この宇宙のどこでも起こるジェット現象は発見から 100 年以上経つものの、どのように・いつ・なぜ発生するのかを、未だ人類は理解していません。日本物理学会が2017年にまとめた「物理学 70 の不思議」にも記載されている大きな謎です。

我々はこの未解決問題に対して、約 20 日間の中に 5 回から 6 回のジェット噴出を起こすという噴出現象を調べるのに最適の天体(XTE J1859+226)に着目しました。この天体は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ます。1999 年から 2000 年にかけて観測された X 線と電波での観測データを我々は改めて見直し、解析を進めました。具体的には、X 線観測から求まる物理量の時間変化率(時間微分量)と電波観測データの総エネルギー量(時間積分量)を比較するという新しい手法を用いて分析しました。ブラックホールへ流れ込むガスは円盤状の構造を形成します。我々は分析の結果、「円盤の内縁半径が急激に小さくなり、最内縁安定軌道に達した時」に、ジェットが噴出することを明らかにしました。

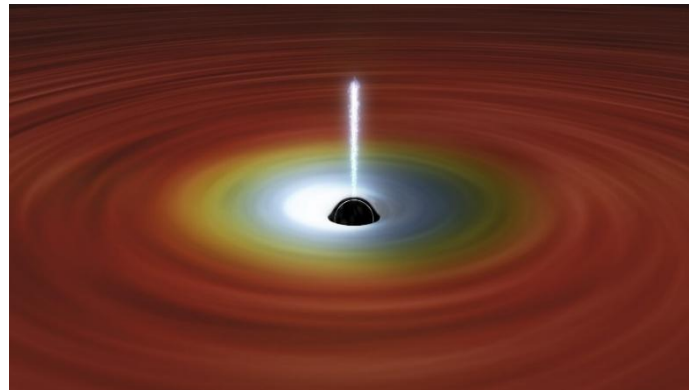
(a) ガス円盤の状態や X 線の特性の時間変化: 横軸は 1999 年 10 月 9 日からの経過日数。上段から、ガス円盤の内縁半径[km]、内縁半径の時間変化[km/日]、X 線放射の短時間変動率[%]、X 線放射のスペクトルの形状(硬さ)、電波帯域での強度[mJy]を表示しています。縦の破線は電波観測から推定されたジェット噴出のタイミングを表しています。



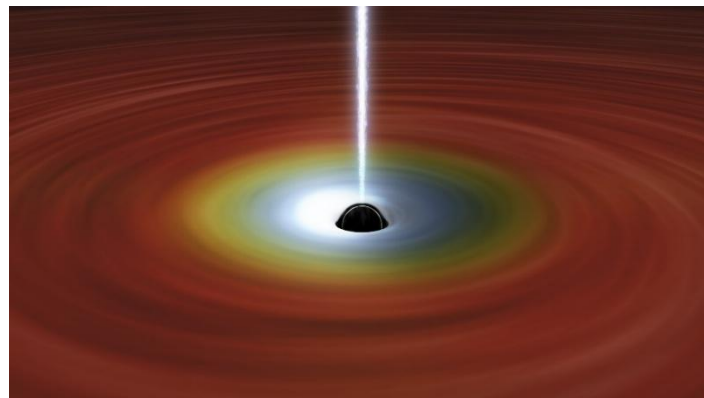
(b) 観測が開始された頃: ガス円盤の内縁半径はブラックホールから遠い位置にありました。



(c) 円盤の内縁半径が十分速く最内縁安定軌道まで縮むとジェットが噴出し始めます。



(d) ジェットがしばらく噴出します。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。



動画 (山岡・川口のホームページにて高解像度ファイルがダウンロードできます。)

これまで、ジェット噴出が起きる時には、X線スペクトルの形状(硬さ, エネルギーの高いX線(硬X線)とエネルギーの低いX線(軟X線)の強度比)が急に軟化することと、X線の短時間の変動割合(強度変動率, root mean square, RMS)が急減少することが知られてきました。一方、本研究ではこれら以前からある現象論的な指標ではなく、ガス円盤の内縁半径の時間微分量が本質的なジェット噴出条件であることを明らかにしました。つまり、円盤の内縁半径が小さくなると、時間変動の激しい硬X線を放射している領域が小さくなり、時間変動が少ない軟X線を放射している円盤の放射領域が増大します。

この結果、X線スペクトルの形状は軟化し、変動割合も小さくなります。これが我々の提案する、X線の硬さと強度変動率がジェット現象となぜ関連していたかの物理的背景です。

【成果の意義】

多数の天体について、本研究で明らかにしたジェット噴出条件が成り立つことを検証する必要はありますが、この条件がブラックホール天体全般に普遍的に成り立つことが実証されれば、次のような波及効果が期待できます。

- (1) 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ブランドフォード・ズナエック機構など、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ると考えられます。
- (2) ジェット噴出現象を捉える観測を行う目的で、これまで緊急好機観測(Target-of-Opportunity 観測, ToO 観測^{注2)})が行われてきました。観測を開始するかどうかや、いつ開始するのかの判断は勘頼みの状況でしたが、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、ToO 観測の成功率(ジェット現象の高頻度・高感度観測)が上昇すると期待されます。
- (3) 円盤内縁が最内縁安定軌道に達すると、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ません。この間、落ち着いて ToO 観測網を構築する余裕ができます。
- (4) ジェット現象という、宇宙の長い歴史において各銀河の成長史をコントロールしてきたと考えられる重要なプロセスの理解の前進につながります。

従来から知られていた X 線の硬さや強度変動率を指標とするジェット噴出条件に対して、我々が提唱している円盤内縁半径の時間変化を鍵とする手法には大きな強みがあります。X線の硬さも強度変動率も、どこからどこまで下がるとジェットが噴出するのかが、各ジェット噴出一回ごとに異なっています。つまり、両者を継続してモニターしていても、いつジェットが噴出するのかの予言力がありません。一方、円盤の内縁半径には、最内縁安定軌道という目安があります。「ここにもう少しで到達しそうだ」というタイミングでジェット噴出が予測できるため、そこで ToO 観測を行えばよいという実効的な指標です。

本研究は、2022 年度から始まった公益財団法人 住友財団『基礎科学研究助成』(代表: 川口 俊宏)の支援のもとで行われたものです。

【用語説明】

注 1) 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(この場合は太陽)からの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遠心力と重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。この天体の最内縁安定軌道の半径は約 64km です。

注 2) ToO 観測(緊急好機観測, Target-of-Opportunity 観測):

通常の観測提案は「この天体を何万秒(あるいは何夜)観測させてください」という内容で多数の提案書から審査員陣が選定します。しかし中には、「こういった現象が観測された際には、その天体になるべく早い日時に観測させて下さい」という内容の提案があり、この提案枠を ToO 観測と呼びます。この提案が採択された場合、事前に指定している現象を提案者が見つけると、観測実施の可否を急いで判断し、人工衛星や地上望遠鏡/天文台へ連絡して観測準備を進めます。

【論文情報】

雑誌名: Publications of the Astronomical Society of Japan

論文タイトル: X-ray Spectral and Timing Properties of the Black Hole Binary XTE J1859+226 and their Relation to Jets

著者: K. Yamaoka (名古屋大学), T. Kawaguchi (富山大学), M.L. McCollough (ハーバード-スミソニアン天体物理センター), R. Farinelli (イタリア国立天文学研究所) and S. Trushkin (カザン連邦大学)

DOI: <https://doi.org/10.1093/pasj/psae113>

【研究者連絡先】

名古屋大学宇宙地球環境研究所

特任准教授 山岡 和貴 (やまおか かずたか)

Homepage:

<https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/~yamaoka/research/blackhole/>

X(旧 Twitter): @KazutakaYamaoka

富山大学 大学院理工学研究科 (学術研究部工学系)

教授 川口 俊宏 (かわぐち としひろ)

Homepage: <http://www3.u-toyama.ac.jp/kawaguti/index-j.html>