



報道各位

2022年9月8日

—科学誌「Nature」で准教授が通算3度目の掲載—

活動銀河核「とかけ座 BL」の史上最大の増光と 準周期的振動の駆動源を解明

大阪教育大学・天文学研究室の松本桂准教授を含む14か国の天文学者からなる国際共同研究グループは、ブレイザー（右図）のプロトタイプとして知られる「とかけ座 BL」が2020年に観測史上最大級の規模で明るくなったことを確認。その際に、活動銀河核では稀にしか見られない変動現象である準周期的振動（以降、quasi-periodic oscillation の頭文字から「QPO」と略記）を検出しました。

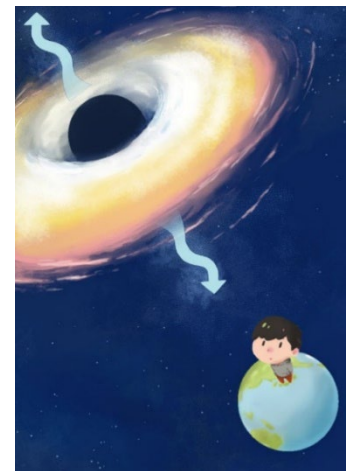
この現象は、とかけ座 BL の中心部に存在する超巨大ブラックホールから吹くプラズマの相対論的ジェットの中で生じた、電流駆動型の磁気流体力学不安定性の一種であるキンク不安定性に起因したものと考えられ、活動銀河核の増光がキンク不安定性によって引き起こされた事例を初めて発見したことになります。

今回の研究結果は、長らく議論的になっていた、数日から数時間程度の時間スケールで生じるブレイザーの短時間 QPO の発生機構について、駆動する主要な機構がプラズマの不安定性であることを示唆し、超巨大ブラックホールが引き起こす大規模な宇宙の活動現象の背後にひそむ物理学の解明につながる成果です。今回を含むこれまでブラックホールに関して挙げた研究成果は、今後も松本准教授が担当する学校への出前授業や教員研修などを通じて社会に還元します。

本研究結果は2022年9月8日発行の科学誌「Nature」に掲載され、これにより松本准教授の論文が同誌に掲載されるのは通算3度目の快挙となりました。※研究の詳細は別添資料ご参照

論文タイトル: Rapid Quasi-Periodic Oscillations in the Relativistic Jet of BL Lacertae

論文 DOI: 10.1038/s41586-022-05038-9



ブレイザー(*)のイメージ

*ブレイザーは、銀河の中心で激しい活動をおこす天体「活動銀河核」のうち、超巨大ブラックホールをエネルギー源として双極方向へ噴出するプラズマの高速噴流「相対論的ジェット」の進行方向がたまたま地球へ向いているもの。今回の研究ではその「捻じれ」（キンク）を捉えることに成功した。

■取材申込方法：下記 URL の「取材依頼フォーム」より申し込み

https://osaka-kyoiku.ac.jp/university/kouhou/pr_procedure/

【本件の取材に関するお問い合わせ先】

国立大学法人大阪教育大学 総務部総務課広報室 伊吹
TEL：072-978-3344 FAX：072-978-3225 E-mail：kouhou@bur.osaka-kyoiku.ac.jp

【本件の研究に関するお問い合わせ先】

国立大学法人大阪教育大学 理数情報教育系准教授 松本
TEL/FAX：072-978-3388 E-mail：katsura@cc.osaka-kyoiku.ac.jp

ブレーザー「とかげ座 BL」とは

星の大集団である銀河の中心部には遍く超巨大ブラックホールが存在すると考えられています。ブラックホールの周囲に大量の物質が供給されると、重力の井戸を螺旋回転しながら落下する物質が降着円盤を形成し莫大な重力エネルギーを解放するとともに、降着円盤の双極方向へ噴出するプラズマの高速流体（相対論的ジェット）が激しい活動性を示すことから、そのような銀河の中心部は活動銀河核と呼ばれます。

相対論的ジェットの進行方向がたまたま地球へ向いている活動銀河核は「ブレーザー」と呼ばれます。ブレーザーではジェットが極めて明るく輝くために、銀河の姿はジェット由来の光に隠され、地球から見るとほぼ点光源となります。そのため一見、恒星と区別ができず、かつ明るさを激しく変えるため、かつては変光星と思われていました。

活動銀河核「とかげ座 BL」（学名: BL Lac）はブレーザーの代表天体（艦船でいうネームシップ）として知られており、ブレーザーはとかげ座 BL 型天体とも呼ばれます。名称の BL とは、とかげ座に属する 89 番目の変光星を意味する、星の命名規則に基づいた符号です。しかし、とかげ座 BL の正体は星ではなく、地球から約 10 億光年の距離（宇宙の膨張による赤方偏移は 0.069）の楕円銀河の中心部に位置する、太陽の 1 億 7000 万倍の質量を持つ超巨大ブラックホールです。そこから最大で光速の 99.8% におよぶ相対論的ジェットが地球へ向かって吹いています。

ブレーザーの研究を行う国際的な枠組みとして「全地球ブレーザー望遠鏡」（Whole Earth Blazar Telescope）が組織されています。日本からは大阪教育大学・天文学研究室が参加しており、我々はこれまでも多くのブレーザーについて、その枠組みの内外で研究成果をあげています。それらの研究成果については、大阪教育大学・天文台（図 1）のウェブサイトをご覧ください。

<http://galaxy.cc.osaka-kyoiku.ac.jp/>

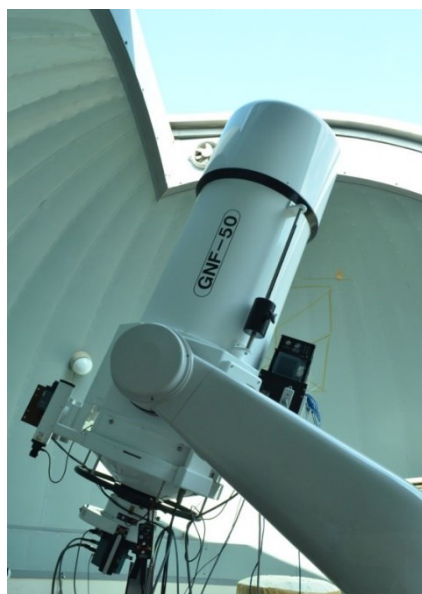


図 1：大阪教育大学天文台の口径 51cm 反射式望遠鏡

とかげ座 BL が 2020 年に起こした大増光と準周期的振動

ブレーザーの明るさは、さまざまな時間スケールで激しく変動します。ほとんどの場合、それらの変動はランダムに生じますが、明るさの変化が準周期的振動（以降、quasi-periodic oscillation の頭文字を取り QPO と略記します）となるブレーザーもあり、QPO はなんらかの系統的な変動現象の発生を示唆しています。変動の時間スケールとして数日～数時間程度で生じる短時間 QPO は特にめずらしく、その原因はいまだ議論的となっています。

そのような背景のなか、大阪教育大学を含むボストン大学などからなる国際共同研究の過程において、とかげ座 BL が 2020 年の 7 月 20 日頃に大規模な増光（アウトバースト）

を起こしました。そして全地球ブレイザー望遠鏡の 37 の天文台が明るさと偏光、またフェルミ天文衛星の広視野望遠鏡がガンマ線での集中的な観測を行いました。とかげ座 BL のアウトバーストは 10 月 17 日頃まで継続し、その過程において 8 月 21 日と 10 月 5 日に観測史上で最大級の明るさを記録しました。またこの国際共同観測によって、アウトバーストの最も明るい時期において顕著な短時間変動が検出されました。特に最短で約 13 時間周期で生じる可視光、偏光、およびガンマ線の QPO の発生が明らかにされました (図 2)。

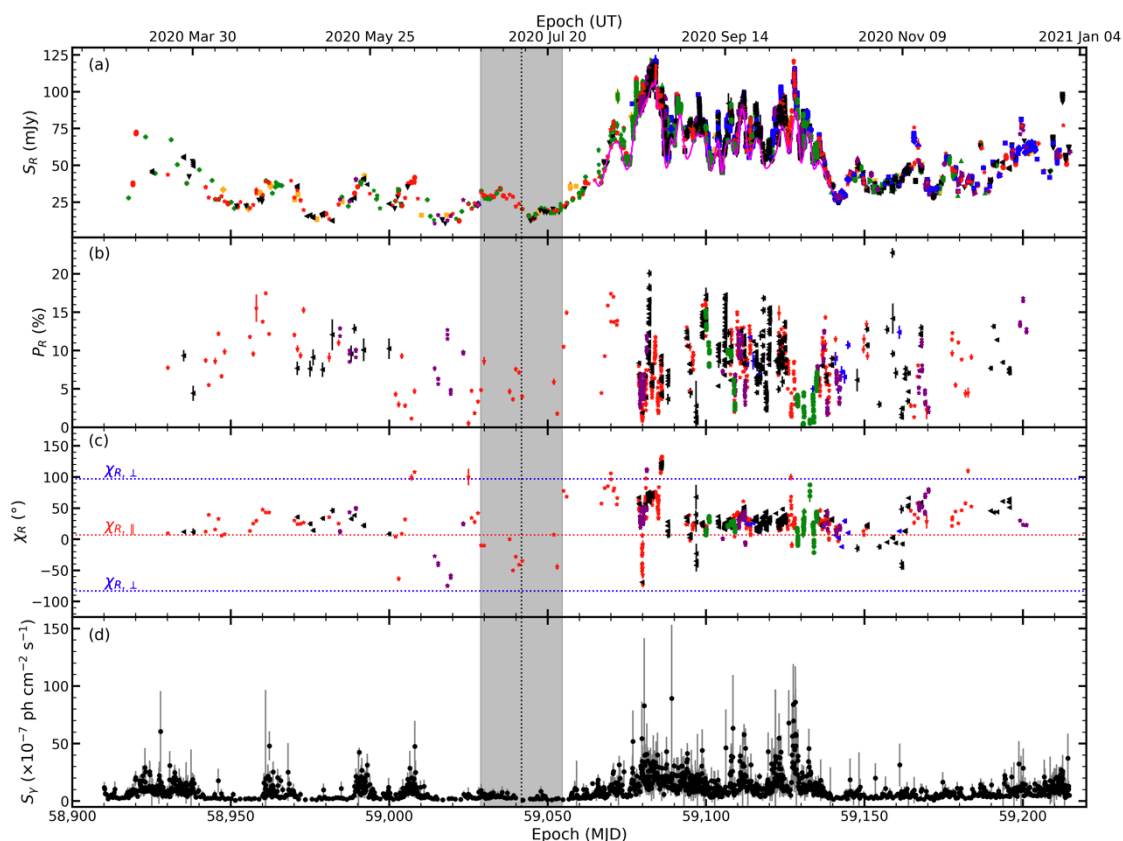


図 2 : とかげ座 BL の 2020 年の光度曲線と偏光の様子。横軸は日数の経過を表しており、上軸にカレンダーの日付を記しています。(a) 可視光の明るさを表しており、上側ほど明るく下側ほど暗いことを示しています。とかげ座 BL は 2020 年 7 月にアウトバーストを開始し、その後、観測史上で最大規模まで明るくなりました。(b) 可視光の偏光度および (c) 偏光方位角。(d) ガンマ線の明るさを表しており、上側ほど明るく下側ほど暗いことを示しています。

QPO は天の川銀河内の X 線連星でも観測されることがありますが、活動銀河核では稀な現象です。そしていずれにせよ QPO が生じる原因はまだよくわかっていません。これまでにブレイザーを含む電波が強い活動銀河で観測された QPO は 1 か月以上の時間スケールで起こり、相対論的ジェットやその磁場の螺旋構造に起因すると解釈されてきました。今回とかげ座 BL で観測された QPO では、明るさと偏光度に相関がみられないことから、強い

乱流に伴うものと示唆されます。また光は大きく偏光しており、明るさと偏光度は類似する時間スケールを示すことから、その起源は相対論的ジェットにあり、降着円盤起源の可能性は棄却されます。可視光とガンマ線の明るさの変動は強く相関し遅延が見られないことから、それらの発光源は共通であることが示唆されます。

とかげ座 BL の QPO を駆動したキンク不安定性

可視光とガンマ線の観測に加え、アメリカ国立電波天文台の超長基線電波干渉計 VLBA による周波数 43 GHz の電波観測が行われ、およそ 0.1 ミリ秒角（現地において 0.13 パーセク = 0.42 光年の距離に相当）の解像度で撮像が行われました。その結果、とかげ座 BL の相対論的ジェットの構造として静的な電波コア A0、およびいくつかの準静的な塊（ノット）成分 A1~A3 が見られました（図 3）。これらの成分は、相対論的ジェットとその周囲の圧力の違いに起因する斜め衝撃波の一連の流れと解釈されます。さらに、観測史上最速となる 1 年あたり 3.32 ミリ秒角（光速の約 15 倍に相当する超光速運動）で動く別の明るいノット成分 K が見出されました（図 3）。

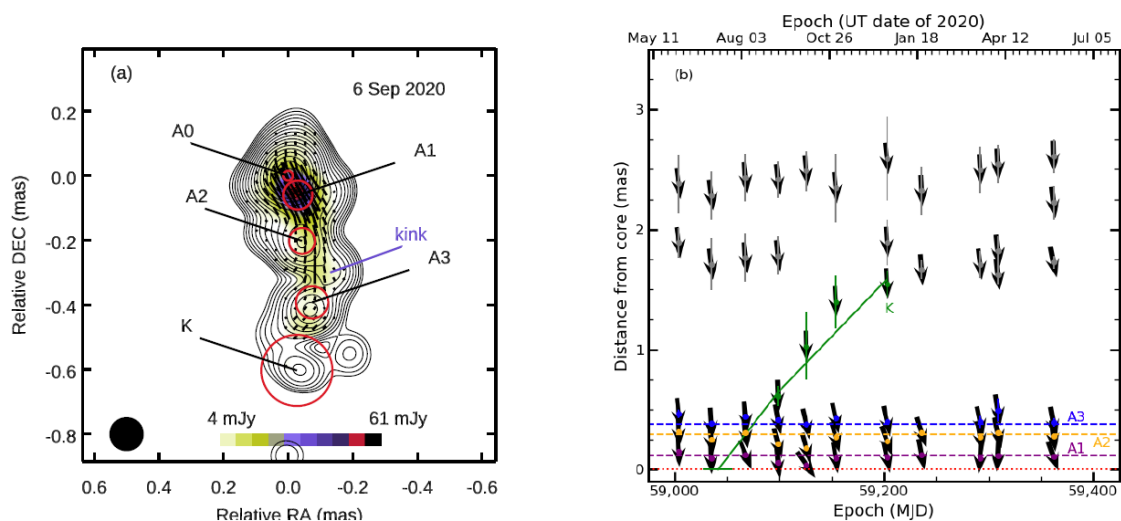


図 3 : (a) VLBA を用いて 2020 年 9 月 6 日に観測された、とかげ座 BL の周波数 43 GHz における電波強度画像。(b) 電波コア A0 に対する各ノット成分の角距離（縦軸）の時間変化（横軸）。

この明るいノット K は、とかげ座 BL の今回のアウトバーストが始まった 2020 年 7 月 11 日に電波コア A0 を通過し、約 2 週間の間隔でノット A1~A3 を通過して行きました。特にアウトバースト期間における最初の最大光度時および QPO が出現し始めた時に、内側から 2 番目のノット A2 を通過しました。とかげ座 BL の過去の観測からは、その相対論的ジェットは通常ローレンツ因子 $\Gamma = 6$ 、見込み角が 5° 程度となっていますが、今回観測されたノット K の超光速運動からは、2020 年中旬には相対論的ジェットは $\Gamma = 15$ まで加速

しており、見込み角も 3.8° 程度へ変化したことを示しています。その際には相対論的ジェットの見込み角 δ は 9 から 15 まで増大していました。

ノット K はアウトバーストの最初の最大光度時にノット A2 を通過しました。このノット A2 は中心の超巨大ブラックホールから約 5 パーセク (16.3 光年) の距離に位置します。そこでは螺旋磁場によるプラズマの圧力が支配的であり、相対論的ジェットの内部で電流駆動型キンク不安定性が成長するのに適した物理的状況となっています (図 4)。また実際に増光時の VLBA の電波画像にキンク不安定性の大きな捻じれが捉えられています。

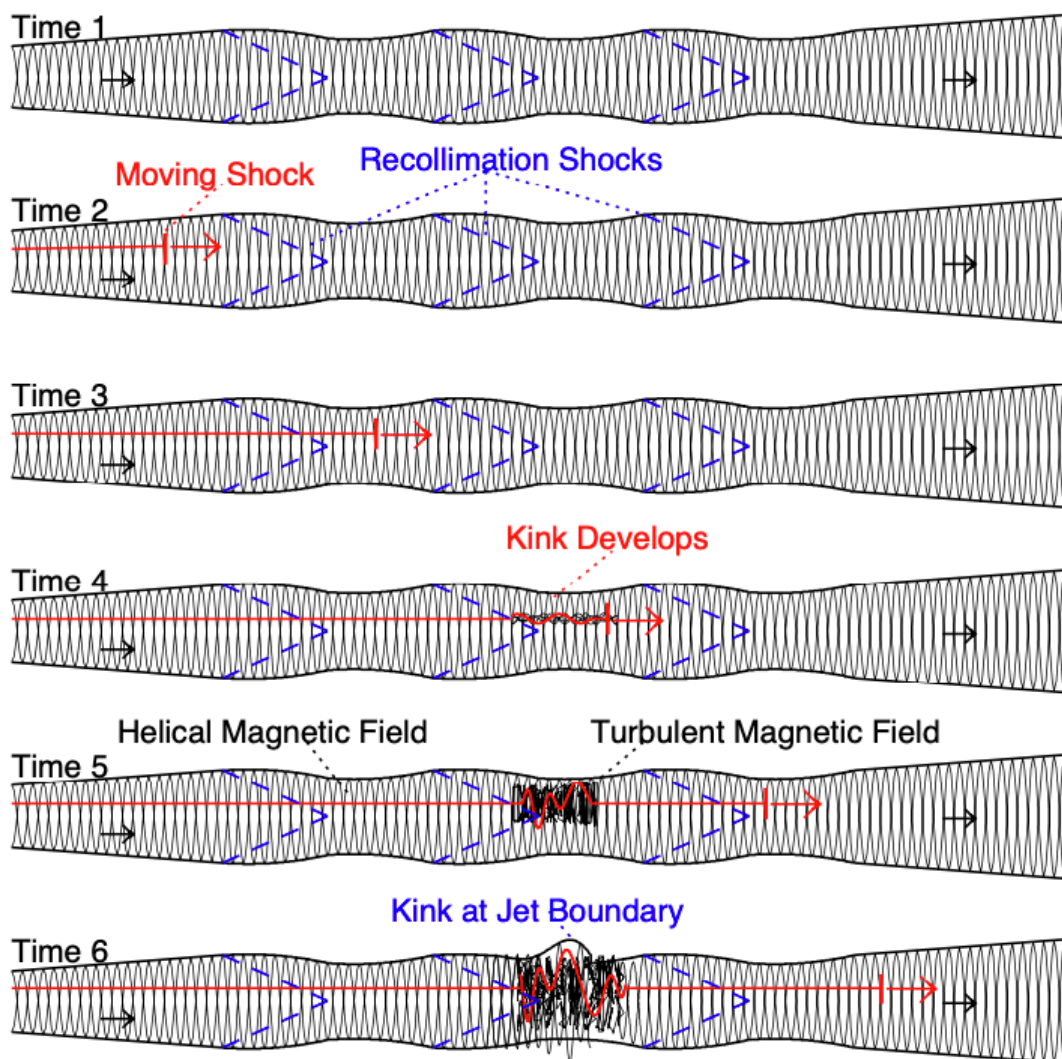


図 4 : とかげ座 BL の QPO の成長過程の模式図。相対論的ジェットは左から右 (天球では北から南に相当) へ流れており、移動する非軸衝撃波と斜め衝撃波との相互作用がキンク不安定性を励起します。その成長によって準周期的構造が形成され、QPO 放射が生じます。また磁場構造が破壊され、螺旋構造から乱流構造へ変化します。Time 5~6 が 2020 年のアウトバーストの極大光度時に相当します。

すなわち、約 13 時間周期の QPO は最内縁ジェットのスピン磁場を破壊するキック不安定性によって引き起こされたと考えられます。これはランダムな過程で、アルベーン波が励起され斜め衝撃波の影響を受けているノット A2 付近で生じました。アウトバーストの後半に現れた約 4 日周期の QPO も、時間とともに成長した捻じれの大きさの現れと説明できます。一方でアウトバーストの前半に現れた約 2 週間の QPO は、ノット K がノット A0 から A3 を次々に通過した際に引き起こされたと考えられます。これらの結論は、ブレーザーの短時間 QPO を駆動する主要な機構がプラズマの不安定性であることを支持しています。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP19K03930 の助成を受けたものです。

用語解説

・活動銀河核（活動銀河中心核とも）

銀河の中心部に存在する $10^6 \sim 10^{10}$ 太陽質量の超巨大ブラックホールへの質量降着によって活動性を帯びた天体です。また回転しながら落下する物質が作る円盤構造（降着円盤）に対し垂直方向へ細く絞られた相対論的速度のプラズマジェットが吹いています。活動銀河核の約 0.1% は、視線方向から約 10 度以内に指向されたジェットに由来する激しい変動を示すブレーザーに分類されます。ブレーザーは活動銀河核の中でも電波放射が比較的強く、電波から X 線にわたってジェット由来のシンクロトロン放射が卓越します。

・超巨大ブラックホール

厳密な定義はありませんが、おおよそ 10^6 太陽質量（太陽質量の 100 万倍）を超えるようなブラックホールを指します。ブラックホールはその質量と大きさに正比例の関係があるため、重いブラックホールほど巨大であるといえます。専門用語としては、超大質量ブラックホール（supermassive black hole）と呼ばれます。ブラックホールは観測的に、超巨大ブラックホールと太陽質量の数倍から数十倍の恒星質量ブラックホール、およびそれらのギャップを埋める中間質量ブラックホールに大別されます。降着円盤が付随する恒星質量ブラックホールや中性子星と普通の恒星との連星系は X 線連星と呼ばれます。

・ローレンツ因子 Γ

光速に迫る速度で運動する光源から出た光を観測すると、相対性理論の時間と空間の短縮の効果が無視できなくなるため、観測者にとって光源の時間は実際より短く、長さは縮み、光の振動数（エネルギー）は高くなったと感じます。ローレンツ因子とは、運動している側と静止している側での時間と空間の相違の度合いを表す指標です。これは運動速度 v によって決まり、光速 c に近くなるほど相違が著しく大きくなります。具体的には光速の何割の

速度で運動しているかを示す値 $\beta = v/c$ を用いて、

$$\Gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

と定義されます。運動していない場合 ($v = 0$) ローレンツ因子は 1 になり、上記の相違は生じません。なお Γ (ガンマ) は小文字で γ と書かれることもあります。

・ドップラー因子 δ (ビーミング因子とも)

光源の運動が観測者へ向いている場合、ドップラー効果により光の振動数は大きくなり、光のエネルギーは本来よりも高くなって観測されます。ドップラー効果の大きさは光源との相対速度と、それをどのような角度 θ で見ているかに依存します。この度合いを示す指標がドップラー因子です。具体的にはローレンツ因子 Γ および光速の何割の速度で運動しているかを示す値 β (上記参照) を用いて、

$$\delta = \frac{1}{\Gamma(1 - \beta \cos\theta)} = \frac{v}{v_0}$$

と定義されます (v はドップラー効果を受けた振動数、 v_0 は本来の振動数)。

・VLBA

Very Long Baseline Array の頭文字を取った略称で、アメリカ国内の 10 基の電波望遠鏡から構成される超長基線電波干渉計の観測網です。特に活動銀河核のジェットの高解像度観測で多数の成果を上げています。 <https://science.nrao.edu/facilities/vlba>

・キンク不安定性 (kink instability)

電流駆動型の磁気流体力学不安定性の一種です。プラズマの流れになんらかの理由で捻じれ (kink) が生じると、捻じれの曲率によって電流による磁場の強さが異なるためプラズマの捻じれがさらに大きく成長します。そのような特徴が名前の由来となっています。