



2017年12月5日

活動銀河の中心核が不規則に突然輝く理由を解明 —超巨大ブラックホールが噴射するジェットを観測—

大阪教育大学を含む、イタリアのトリノ天文台を中心とする研究グループは、2016年末～2017年始めにかけて史上最大の明るさで突如輝きだした活動銀河核を観測し、その中心に潜む超巨大ブラックホールから噴き出すジェットがへビのように蛇行しながら地球へ向いていることを、世界で初めて解明しました。

星の大集団である銀河の中心部には、超巨大ブラックホールが少なくとも一つ存在していると考えられており、そのうち顕著な活動性を示すものを活動銀河核（または活動銀河中心核）と呼びます。今回観測した天体は、活動銀河核の一種で、きわめて明るく、かつ不規則に明るさが変化する「ブレーザー」の一つです。ブレーザーの明るさが極端に変化するメカニズムはこれまでわかっておらず、長らく論争の対象となっていました。今回の研究により、ブラックホールから噴き出すジェットが、ロケットの噴流などでイメージされるようにずっと直線状ではなく蛇行しており、地球へ向かってくる部分の光が増幅されて明るく見えることが判明しました。

研究の詳細は別添資料をご参照ください。

本研究成果は英国時間2017年12月4日（日本時間5日）配信の英科学誌「Nature」先行電子版（Advance Online Publication）に掲載されます。（DOI: 10.1038/nature24623）後日、Nature誌面にも掲載されます。

【研究に関するお問い合わせ先】

大阪教育大学理科教育講座准教授 松本 桂

TEL/FAX : 072-978-3388 E-mail : katsura@cc.osaka-kyoiku.ac.jp



51cm 反射式望遠鏡
(大阪教育大学柏原キャンパス)

余談となりますが、今回の研究対象であるブレーザー「CTA 102」は、かつて、高度な宇宙文明からの電波信号ではないかと疑われたことがありました。そのためアメリカのロックバンド「The Byrds」の曲の題材に使われたこともあります。別添資料にてこの点も紹介しています。

ブレーザーの研究の背景

地球が属する天の川銀河も含め、星の大集団である銀河の中心部には、超巨大ブラックホールが少なくとも一つ存在していると考えられています。このとき、ブラックホールの周辺に大量の物質が存在すると、それらが落下する際に顕著な活動性を示します。そのような銀河の中心部は活動銀河核（または活動銀河中心核）と呼ばれます。

活動銀河核の一種であるブレーザーは、活動銀河核のなかでも極めて明るく、また規則性を持たない予測不能の急激な明るさの変化を示すことが特徴です。ブレーザーの強い輝きの理由は、超巨大ブラックホールから噴射される光速に迫る速度を持つジェット（物質の高速噴流）が地球へ向いている位置関係にあるため、その相対論的効果による光度の増幅で説明されます。一方で、急激な明るさの変化がなぜ起こるのかについては様々な理論が提唱されており、議論が続いていました。

ブレーザーの変光の仕組みを解明するために、国際的な研究の枠組みである「全地球ブレーザー望遠鏡」(Whole Earth Blazar Telescope; WEBT) が組織されています。日本からは、大阪教育大学の天文学グループが参加しており、我々はこれまでも 3C 454.3 や OJ 287 などのブレーザーについて、WEBT の枠組みの内外で研究成果をあげています。それらを含む、大阪教育大学天文台（図 1）の成果の一覧については次の URI をご覧ください。

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

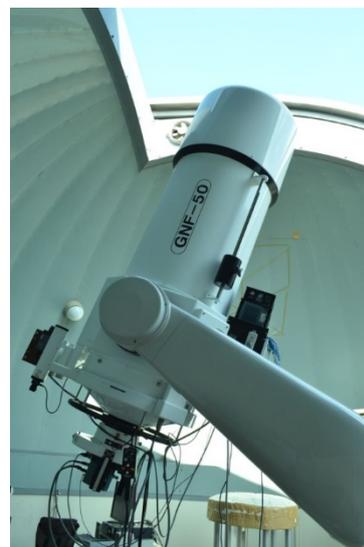
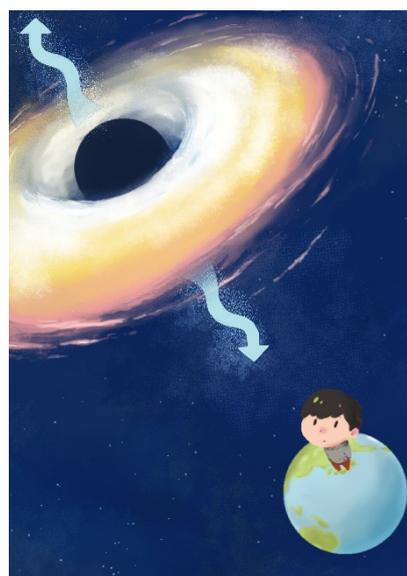


図 1：大阪教育大学天文台の口径 51cm 反射式望遠鏡

今回の研究成果

今回の研究対象である CTA 102 は、2012 年の小規模な増光の後、長らく静穏期にありました。ところが 2016 年に入ると徐々に活動性を帯び出し、同年 10 月に大増光を始めました。そして 12 月 28 日に最も明るくなった際は、静穏期に比べ 6 等級（250 倍）以上も明るくなりました（図 2）。これは同天体における観測史上最大の明るさでした。さらに、この明るさは地球からの距離を加味した元々の明るさの比較でいえば、これまでに知られていたブレーザーの光度の記録（ビーミング補正前）を抜いた新記録となりました。

（右図：ブレーザー CTA 102 のイメージイラスト）



イラスト：中西星子

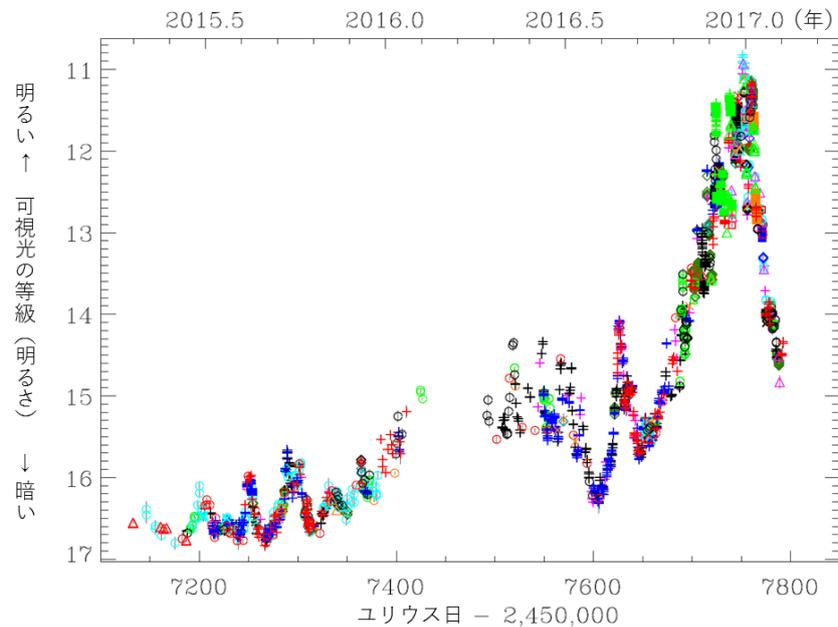


図2：WEBTの観測によるCTA 102の大増光の様子(2015年から2017年初頭までの明るさの変化)。縦軸は可視光の明るさを表し、上ほど明るく下ほど暗いことを示しています。横軸は時間の経過を表します。上の横軸に西暦を記載しています(たとえば2017.0は2017年1月1日)。CTA 102は2016年末に、2015年半ば頃に比べ250倍以上も明るくなりました。今回の観測で、大阪教育大学天文台は可視光の観測を2016年12月から2017年2月までの間に計24夜行い、大増光の時期のデータ収集に大きく貢献しました。

このような大増光の様子を、様々な振動数の電磁波(光、赤外線、電波など)で観測することで、ブレーザーの激しい変動現象を理解するための手がかりが得られます。光と赤外線の増光の様子から、増光の原因はジェット非熱的放射だけでなく、超巨大ブラックホールの周囲に存在する気体でできた光る降着円盤などからの熱的放射の寄与があることがわかりました。一方、熱的放射の成分は基本的には安定していると考えられるため、激しい変光の仕組みを探るには、ジェット起源の非熱的放射であるシンクロトロン放射を分析する必要があります。そのため、熱的放射の成分をモデル化し、観測された明るさから差し引くことで、ジェット由来の成分を抽出しました(図3)

その結果、2012年の小規模な増光では光が電波より先に明るくなった一方で、2016年の大規模な増光では逆に電波が先に明るくなったことがわかりました。また2008年~2009年の期間には電波で明るい状態が続いていましたが、光では静穏な状態が続いていました。このような電磁波の振動数に対する複雑な相関関係は、CTA 102の非熱的放射が振動数によってジェットの異なる領域から放射されていることを示唆します。その原因をジェットそのものの物理状態の違いに求めようとすると、それぞれの観測時期によって極めて大きく変化する物理パラメータを選択する必要があります。そのため、CTA 102の長期的な光度変化は地球からのジェットの見え方が変化したからだとして解釈の方が論理的に適切です。

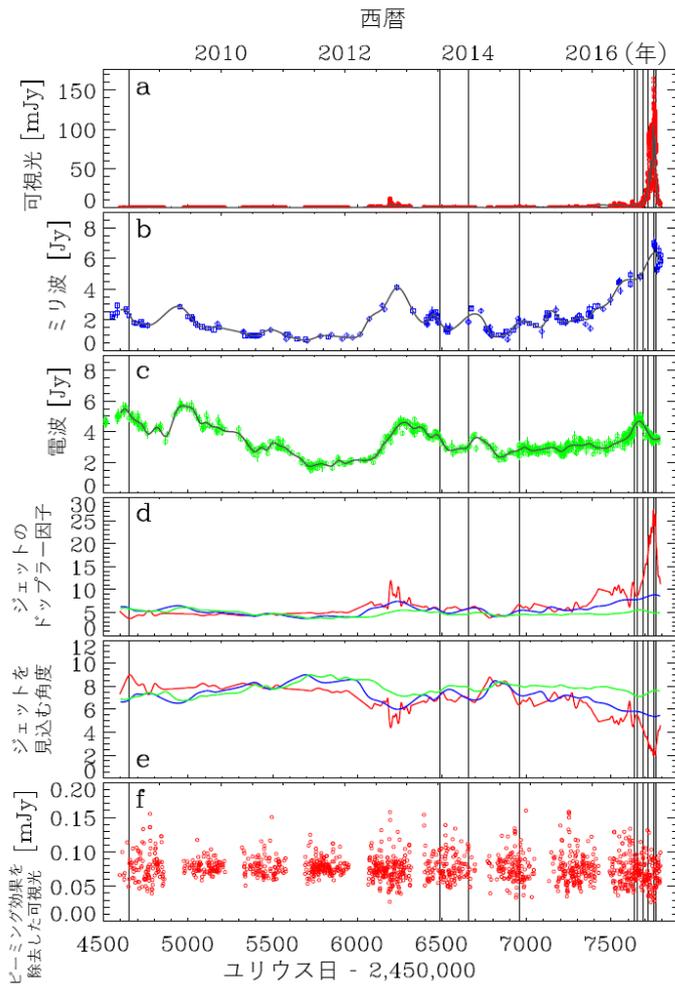


図3 : (a, b, c) WEBT の観測による CTA 102 のジェットに由来する明るさの長期的な変化の様子。横軸は時間の経過を表します。上の横軸に西暦を記載しています。縦軸の単位である Jy (ジャンスキー) は天体の明るさを表し、 $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ と定義されます (mJy はその 1/1000)。図中の 9 本の縦線は今回の研究においてスペクトルエネルギー分布の分析に使われた時期を示しています。(d) CTA 102 のジェットにおけるドップラー因子の時間変化。相対論的効果による光の増幅や時間の短縮の度合いを示します。(e) ドップラー因子から推定される、地球からジェットを見込む角度の時間変化。(f) 観測された可視光の明るさからドップラービーミングの効果による増幅の影響を取り除いた明るさの時間変化。d~f については末尾の用語集も参考にしてください。

このアイデアを検証するため、ジェットを見込む角度がどのように変化したか推定しました。CTA 102 の光度変化は、全体的に明るい時期ほど激しくなる、すなわちより短時間で大きな振幅の変化になることが長期的な観測結果からわかります (図 3a)。これはドップラー因子の変化による相対論的効果が観測される光度 (増幅される)・時間スケール (短縮される)・振動数 (高くなる) へ影響を与えていると解釈できます。これらの効果をもたらすローレンツ変換を補正するため、ジェットのドップラー因子の最小値モデルと観測された明るさや周波数を用い、様々な観測時期におけるドップラー因子を推定しました (図 3d)。このドップラー因子の値は、(1)ローレンツ因子および(2)ジェットを見込む角度に対して依存性があります。(1)ローレンツ因子をジェット中の場所あるいは時間とともに変化させることは原理的には可能なのですが、CTA 102 の激しい明るさの変化を説明するためにはジェット中の異なる場所での大幅な加速や減速を必要とします。したがって、ドップラー因子の変化は(2)ジェットの方向が変化したことが原因であると解釈の方が自然です。

このような解釈を前提として、ドップラー因子の時間変化からジェットを見込む角度を推定できます (図 3 e)。それによると、図 3 a~c のいずれの波長域でもジェットを見込む角度が小さくなるほど明るさが増大していることがわかります。また、観測された明るさからその効果を補正することができます。つまり、仮にジェットの見込み角が時間によって変化しない場合にどのような明るさで観測されるかを知ることができます (図 3 f)。その残差は、CTA 102 が示す比較的短時間の変光現象に相当しますが、その範囲は全観測期間にわたってせいぜい 2 倍以内に収まっており、元々 600 倍あった残差 (図 3 a) に比べれば有意に小さい、つまりジェット内での激しい活動性は大きくないことを示しています。

今回の研究のまとめ

以上のシナリオは、様々な振動数で観測される CTA 102 の明るさはジェットの別々の領域に由来している (すなわち非均一である) こと、またその見込み角が時間とともに変化していることを示しています。CTA 102 のジェットはヘビのように蛇行しており、ジェットの噴流は場所ごとに様々な方向へ向きます。それらのうち、地球へ向いた部分で卓越する放射が地球では明るく見えることとなります (図 4)。

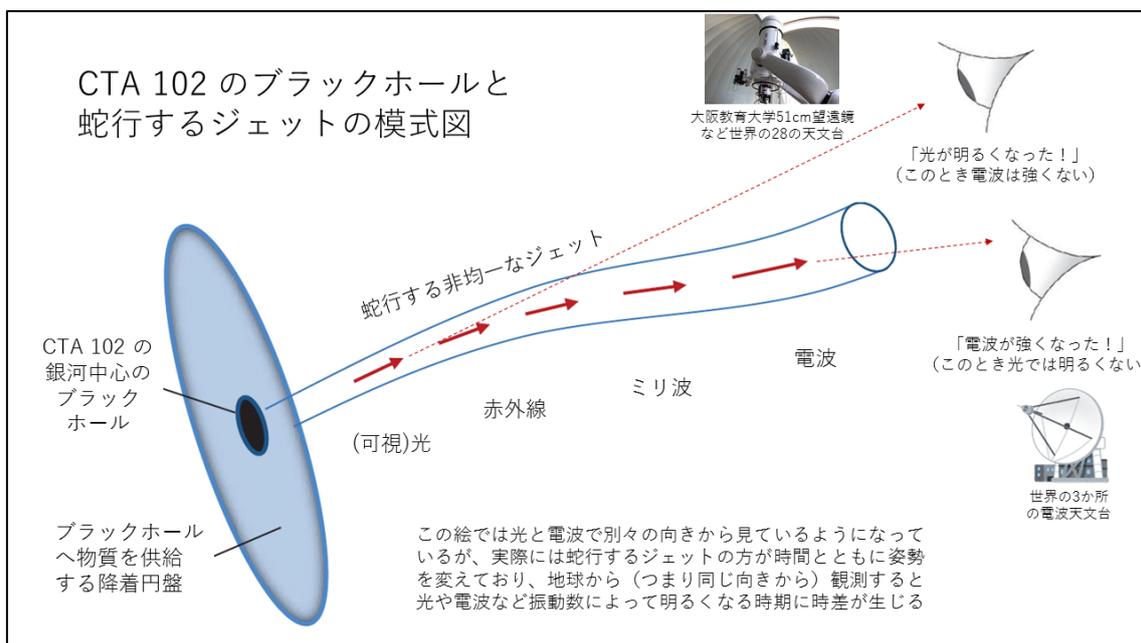


図 4：今回の研究で提案された CTA 102 の蛇行するジェットの模式図。光や電波などの電磁波は振動数によってジェットの異なる場所から放射されています。ジェットの曲がりによって、ジェット中の様々な場所が別々の方向へ向きます。また、それぞれの場所の放射はそれぞれの方向に対しドップラー因子に応じて増幅されます。このようなジェットを地球から観測すると、光や電波などは異なる時期に増幅されて届くことになり、電磁波の種類によって明るくなる時期に時差が生じるようになります。

CTA 102 について

CTA 102 はブレーザーに分類される活動銀河核です。ブレーザーはさらに「フラットスペクトル電波クエーサー」と「とかげ座 BL 型天体」に細分類されることがありますが、CTA 102 は前者に分類されます。宇宙の膨張による赤方偏移は 1.037 で、共動距離に換算すると地球からおよそ 110 億光年に位置していることとなります（ただし距離は採用する宇宙論パラメータにより変わります）。この天体は元々、カリフォルニア工科大学（Caltech）オーエンズヴァレイ（Owens Valley）電波天文台の周波数 90 MHz の掃天観測によって、電波源として発見されました。Caltech のリスト A（電波源カタログ第 1 版）の 102 番目に記載された天体という意味です。

旧ソ連の天文学者ニコライ・カルダシェフは、CTA 102 からの電波放射の（当時までに知られていたものとしては）不自然な特性に着目し、高度な地球外文明から送られている電波信号ではないかと提案しました（Kardashev, 1964 年, *Soviet Astronomy* 第 8 巻, 217 頁）。カルダシェフは、その論文で提唱した宇宙文明の発展度を示す尺度「カルダシェフ・スケール」でも知られています。そして後に CTA 102 からの電波強度が変動していることが判明したことにより（Sholomitsky, 1965 年, *IBVS* 第 83 号）、世界的な反響を呼んだそうです。ただし、これはまだ活動銀河核の理解が今ほど得られていなかった時代のお話です。その後のパロマー天文台の観測などによって CTA 102 は遠方宇宙の活動銀河核と判明し、地球外文明説は棄却されました。そのため、やはり地球外文明からの信号と誤認された史上最初に発見されたパルサーと並んで、地球外文明探査における 2 大誤認といわれています。ちなみに、アメリカのロックバンドであるバーズ（The Byrds）が 1967 年に発表したアルバム「*Younger Than Yesterday*」の 3 曲目に「C.T.A.-102」という曲が収録されていますが、これはまさしく地球外文明からの信号と誤認された CTA 102 を題材としたものです。



用語解説

・超巨大ブラックホール

厳密な定義ではありませんが太陽質量のおよそ 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、重た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（super-massive black hole）と呼ばれます。

・ブレーザー

活動銀河核の一種で、他の活動銀河核と同様に、銀河中心の超巨大ブラックホールへ落下する大量の物質から解放される重力エネルギーにより活動性を帯びます。また、落下物質が形

成する降着円盤面の垂直方向へ細く絞られたジェットが吹いています。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ています。また可視光域で激しい変光を示し、スペクトルの輝線が弱いかほとんど検出されません。このような特徴から、ブレーザーは活動銀河核のなかでもジェットがたまたま地球へ向いている位置関係にあるものと考えられています。

・ドップラー因子（ビーミング因子とも）

運動している光源から出た光を静止した観測者から見ると、光の振動数と波長が本来の値からずれます。このような現象はドップラー効果と呼ばれます。光源の運動方向が観測者へ向いている場合、光の振動数が大きくなり、光のエネルギーが本来よりも高くなって観測されます。ドップラー効果の度合いは、光源の運動速度（より厳密にはお互いの相対速度）と、それをどのような角度 θ で見ているかに依存します。この度合いを表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 $\beta = v/c$ （下記参照）を用いて、

$$\delta = \frac{1}{\Gamma(1 - \beta \cos\theta)} = \frac{\nu}{\nu_0}$$

で定義されます（ ν はドップラー効果を受けた振動数、 ν_0 は本来の振動数）。

・ローレンツ因子

光速に迫る速度で運動している光源から出た光を観測すると、相対性理論による時間と空間の短縮の効果が無視できなくなるために、観測者にとっては光源の時間が実際より短く感じ、長さは縮んだと感じ、光の振動数（エネルギー）は高くなったと感じます。この現象はオランダの物理学者ヘンドリック・ローレンツにちなみ、ローレンツ変換と呼ばれます。ローレンツ因子とは、ローレンツ変換において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。この度合いは運動速度 v によって決まり、また光速 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、

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

で定義されます。運動していない $v=0$ の場合ローレンツ因子は 1 になり、その影響は生じません。なお、 Γ （ガンマ）は小文字で γ と書かれることもあります。

（2017 年 12 月 22 日追記）

英国時間 2017 年 12 月 4 日に Nature 先行電子版（Advance Online Publication）で公開された本論文は、12 月 21 日付の Nature 本誌（第 52 巻 374 頁）に掲載されました。