

超巨大ブラックホールの周囲に隠れたリング

—時系列データから復元された立体構造—

概要

宇宙に無数に存在する銀河の多くには、その中心部分に太陽の 100 万倍以上の質量の超巨大ブラックホールがあることが知られています。超巨大ブラックホールは、強い重力によって周囲のガスを集めることで質量を獲得し成長します。そのガスの分布や速度の情報は、超巨大ブラックホールの成長過程を理解する上で非常に重要であるにもかかわらず、未解明な点が多く議論が盛んな分野です。

京都大学大学院 理学研究科 名越俊平 学振特別研究員 (PD) らの研究グループは、超巨大ブラックホール周辺に分布するプラズマガスに、これまで知られていなかった構造を発見しました。本研究では、観測史上最大規模の明るさの変動を示した天体 SDSS J125809.31+351943.0 の多波長時系列データを使用して、明るさの変動に伴う周囲のガスへの影響を調べました。その結果、超巨大ブラックホール周辺のガスの構造を従来よりも詳細に推定することに成功し、高速で運動している中心部分のプラズマガスが二つの半径が異なるリング状に分布し、性質も異なることを観測的に明らかにしました (図 1)。この成果は、超巨大ブラックホールの質量測定や宇宙の膨張速度測定の精度向上につながる、宇宙の歴史を知る上で重要な結果です。

本研究は 2024 年 3 月 4 日 00:01 (現地時間) に、イギリスの国際学術誌 *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* にオンライン掲載されました。



図 1 : 本研究結果に基づく、活動銀河核の想像図。超巨大ブラックホールは中心部分にあり、その周囲の降着円盤が光っています。プラズマガスが同心円状に異なる領域に分布していることが本研究で明らかになりました。(Credit: S. Nagoshi et al.)

1. 背景

宇宙には無数の銀河が存在し、その中には太陽の 100 万倍以上の質量を持つ超巨大ブラックホールが多数存在することが知られています。超巨大ブラックホールを取り囲むガスは、中心からの重力に引かれて降着円盤[1]と呼ばれる円盤状の構造を形成します。この降着円盤は重力エネルギーを解放して、明るく光る「活動銀河核」として観測されます。活動銀河核は非常に明るく輝くため、遠く離れた宇宙でも観測可能です。この観測を通じて、私たちは宇宙の過去の姿を見ることができ、宇宙の歴史を解き明かす手がかりを得ます。

宇宙の歴史を通じて、超巨大ブラックホールがどのようにしてその巨大な質量に達したのかは、今なお広く議論されているテーマです。その理解のためには、質量を増やすメカニズムを明らかにすることが必要です。これまでの研究では、複数の活動銀河核で観測される特徴を基にした統計的な分析を通じて、活動銀河核の大まかな構造が推定されてきました。しかし、超巨大ブラックホール近傍に分布するガスの詳細な構造や速度に関する情報には未だに不明な点が多く、活発に議論されています。

中でも、超巨大ブラックホール近傍で高速運動するプラズマガス[2]領域の構造は、超巨大ブラックホールの質量を推定するために最も利用されている重要な要素です。超巨大ブラックホールの質量は、その重力によって束縛されているプラズマガスの動きとその構造が全て分かれば、理論的に求めることができます。しかし、地球からの直接観測では、得られる情報はプラズマガスの視線方向[3]の速度に限られ、他の詳細な速度情報を知るためには構造や運動をモデルとして仮定しなければなりません。多くの研究が、そのようなモデルに基づいて求められた質量を元に様々な議論を展開しています。したがって、より現実に即したモデルを構築することは多くの研究の根幹に影響する大事な要素であり、そのためには観測的に詳細な情報を収集することが必要となります。

観測的に活動銀河核の内部を調査するためには、観測の角度分解能を上げるか、複数回観測して時間分解能を上げる必要があります。観測の角度分解能を上げる手法は、Event Horizon Telescope[4]等の電波天文学で活発な手法ですが、電波を発しない大部分の構造を見ることができません。プラズマガスが強く観測される可視光においては、時間分解能を上げた観測から空間的な構造を復元する手法が最も効果的であると考えました。

2. 研究手法・成果

活動銀河核の高速なプラズマガスの構造を調べるために、我々が着目したのは活動銀河核の「状態遷移現象」と「時系列データ」の2つです。

活動銀河核の中には、急激に質量を獲得している状態と、緩やかに質量を獲得している状態を遷移するような現象を示す天体があります。そのような天体は、質量獲得の効率が変動すると同時に周囲に放射する光の強度も変動し、その変動が周辺の構造へと影響を及ぼすことがあります。そこで我々は、このような状態遷移現象を対象に観測することで、構造の変化の過程から得られる新たな知見を期待して対象天体を選定しました。今回観測対象として、約 30 年間に渡って約 4 等級もの明るさの変動を示した、観測史上最大規模の状態遷移現象を起こした天体、SDSS J125809.31+351943.0 (J1258) を選定しました。

本研究では、観測の空間分解能を上げるために時系列データを利用しました。特に、3.8m せいめい望遠鏡[5]を用いて独自にモニター分光観測し、反響マッピングと呼ばれる手法で構造を推定した点が特徴的です。反響マッピングとは、降着円盤から放射される光とプラズマガスから放射される光の波長が異なることを利用した構造推定手法です。プラズマガスは降着円盤からの光によってエネルギーを獲得してプラズマ状態となっているため、降着円盤からの光の強度変化に対して時間差で追従するように強度が変化します。この時間差を光の伝搬時間として降着円盤からプラズマガスまでの距離を推定する方法です (図 2)。

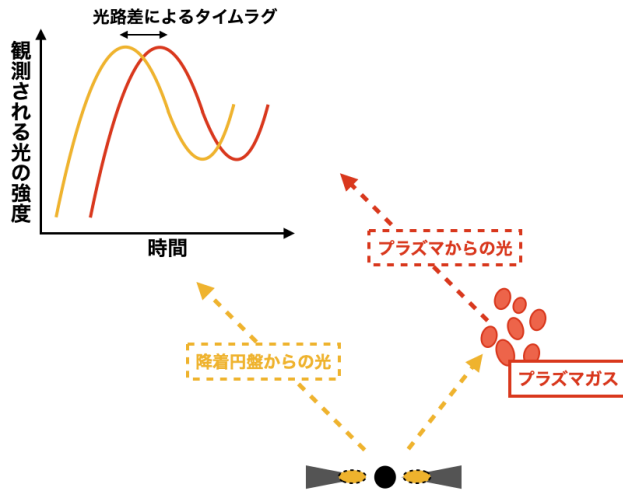


図 2：反響マッピングの概念図。降着円盤からの光でエネルギーをもらい、プラズマ状態となったガスは特定の波長の光を放射します。降着円盤とプラズマガス、それぞれの明るさの変化を記録すると同じ上昇下降パターンとタイムラグが見られ、そのタイムラグを光路差であると解釈することで、元の構造が推定できます。

本研究によって、J1258 の中心部の構造を図 3 のように詳細に推定することに成功しました。特に、大規模な状態遷移現象の前後を比較したことで、中心部分の高エネルギー放射の影響を受けやすい成分と受けにくい成分を明瞭に分離することができました。中心付近の高速なプラズマガスは、従来は降着円盤からの放射を受けやすい領域に一塊で分布していると考えられていましたが、より内側に降着円盤からの放射を受けにくいプラズマガスが分布していることを明らかにしました。

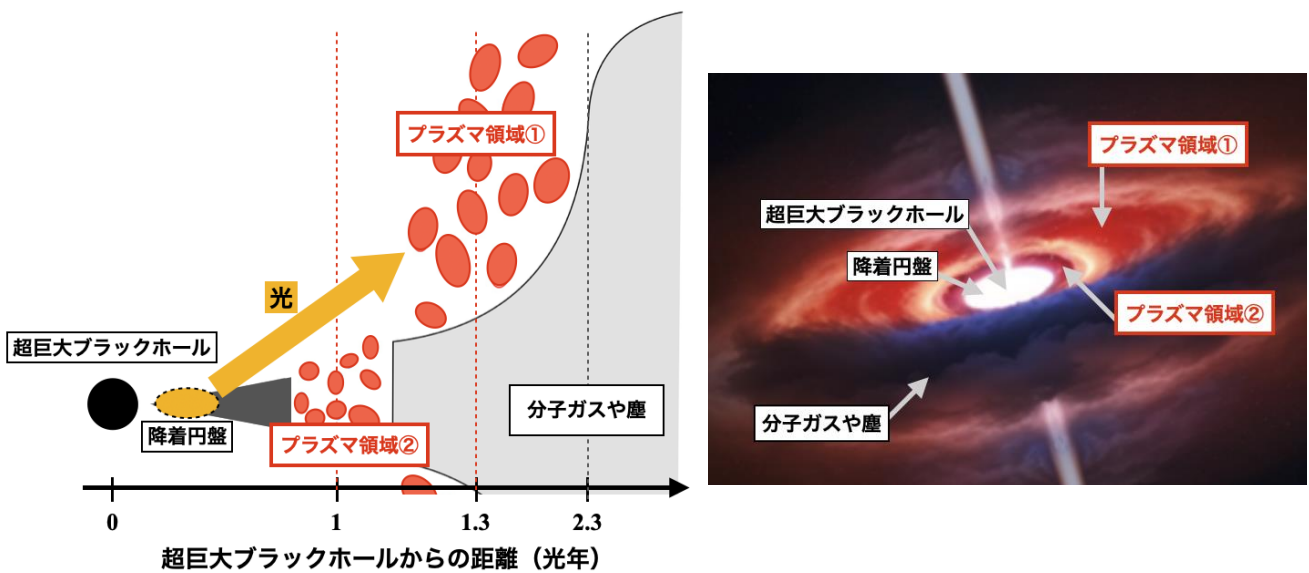


図 3：本研究で推定した J1258 の中心構造。左図は超巨大ブラックホールからのおよその距離を横軸に示していて、ブラックホールを中心に軸対象な分布を表しています。右図は各領域と図 1 との対応を示しています。中心部分に超巨大ブラックホールがあり、内側から降着円盤、プラズマガス、分子ガスや塵が分布しています。本研究では、降着円盤からの高エネルギー照射の影響を受けやすく比較的低速なプラズマ領域①と、受けにくく比較的高速なプラズマ領域②の 2 箇所プラズマガスが分布していることを明らかにしました。(Credit: S. Nagoshi et al.)

3. 波及効果、今後の予定

本研究は、超巨大ブラックホール周辺に分布するプラズマガスが分布領域や性質の異なる2成分から成り立つことを、状態遷移現象を対象とすることで観測的に明瞭に示しました。中でも、降着円盤からの放射の影響を受けにくい位置にプラズマ領域②があることは、本研究によって明らかになった新発見です。プラズマガスの構造を理解することは、特に超巨大ブラックホールの質量の測定や、活動銀河核までの距離測定の精度を高めることに繋がります。そのため、過去から現在にかけての超巨大ブラックホールの質量の分布を調べ、現在の質量まで成長してきた過程を議論する際にも利用される考え方です。また、超巨大ブラックホールまでの距離が正確に求められたら、宇宙膨張の速度も正確に計算できると言われています。現在、宇宙がどれくらいの速さで膨張しているのかは、宇宙の起源に関する重要なパラメータであるにも関わらず議論が収束していない問題です。本成果が、今後の研究においてプラズマガスの構造モデルの信頼性を高めることに貢献し、これらの宇宙の歴史に関わる重要な問題の解決の一助となることを期待しています。

本研究は、J1258という特定の天体が引き起こした大規模な状態遷移に焦点を当て、重要な発見をもたらしました。ただし、観測された現象が活動銀河核で一般的なものなのか、あるいは特定の天体特有の特性なのかは、本研究の範囲では判断できません。この点を明らかにするための検証作業は、今後の課題として残されています。

4. 研究プロジェクトについて

関連研究機関：京都大学、理化学研究所、国立天文台

本研究は科学研究費助成事業（JSPS KAKENHI）の助成番号 22J13428, 22K20391, 23K13154, JP19K03914, 22K03675, JP18H05439, JP20K14521 の助成を受けています。

<用語解説>

※1 **降着円盤**：中心にある天体（通常はブラックホール、中性子星、または若い星など）に向かって角運動量を持ったガスが落ち込んでいく際に形成される、回転する円盤状の構造のこと。物質同士の摩擦によって高温になり電磁波（光）を発する。

※2 **プラズマガス**：原子のほとんどがイオン化（電子が取り除かれること）している状態のガス。

※3 **視線方向**：観測者から見て観測対象に向かう方向。

※4 **Event Horizon Telescope**：世界中の電波望遠鏡を利用して、ブラックホールシャドウの撮像を目指す、国際プロジェクト。

※5 **せいめい望遠鏡**：京都大学岡山天文台にある、主鏡口径が3.8 mの光学赤外線望遠鏡。

<研究者のコメント>

この研究は、状態遷移という現象を解明することで活動銀河核の内部構造に迫る試みでした。状態遷移とは、天体の見た目が変わる不思議な現象で、その背後にあるメカニズムはまだはっきりとした定説が確立されていない段階です。私たちは、可視光から赤外線、X線に至るまでの幅広い波長のカメラを使って何度もこの現象を撮影しました。その研究過程はまるで手品のトリックを暴くかのような高揚感があり、楽しみながら研究を進めることができました。（名越俊平）

<論文タイトルと著者>

タイトル : Probing the origin of the two-component structure of broad line region by reverberation mapping of an extremely variable quasar (「極めて変動性の高いクエーサーの反響マッピングによって探る、広輝線領域の二成分構造の起源」)

著者 : Shumpei Nagoshi, Fumihide Iwamuro, Satoshi Yamada, Yoshihiro Ueda, Yuto Oikawa, Masaaki Otsuka, Keisuke Isogai, Shin Mineshige

掲載誌 : *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* DOI : 10.1093/mnras/stae319