

潮汐破壊現象の最高精度の偏光観測

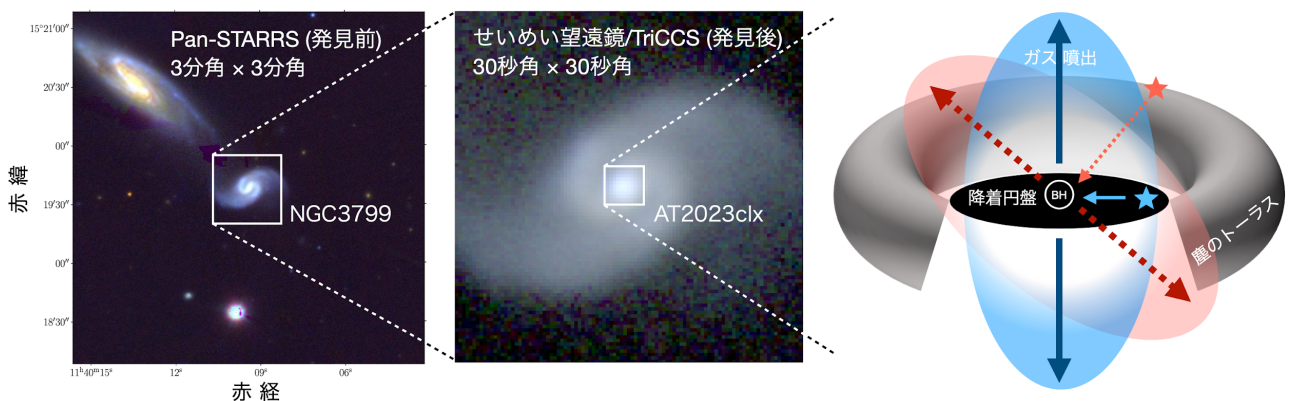
— 超大質量ブラックホールの周囲環境を調査する新たな手がかり —

概要

宇野孔起 理学研究科研究員、前田啓一 同教授を中心とした国際研究グループは、京都大学せいめい望遠鏡・国立天文台すばる望遠鏡をはじめとする国際的な望遠鏡網により潮汐破壊現象 AT2023clx を詳細に観測し、潮汐破壊現象に伴うガスの噴出方向と銀河中心環境が空間的に直交するという、特異な幾何構造を明らかにしました。

銀河の中心に存在する超大質量ブラックホール（SMBH）に恒星が接近すると、その強力な重力によって恒星が引き裂かれ、明るく光り輝きます。潮汐破壊現象と呼ばれる本現象は極めて稀で、詳細な観測例は限られています。本研究グループは、突発的な天体現象として発見された AT2023clx が潮汐破壊現象であることを京都大学せいめい望遠鏡を用いた観測により世界に先駆けて同定し、その直後からすばる望遠鏡や北欧光学望遠鏡を用いた国際連携による追跡観測を実施しました。その結果、ブラックホールから噴き出すガスの流れと銀河中心 SMBH 周辺に存在する塵からなる円盤状（トーラス）の構造が、空間的に 90 度直交するという特異な配置が明らかになりました。一般的には銀河中心の星はランダム運動をすると考えられていますが、本研究結果は、SMBH 周辺環境が銀河中心の恒星軌道に影響を与える可能性を示唆します。本成果は、「せいめい望遠鏡による天体同定から国際的観測網へ」という理想的な観測連携の成果であり、潮汐破壊現象を通じて銀河中心環境の性質や構造まで読み解ける可能性を実証しました。

本成果は、2025 年 6 月 18 日に国際学術誌「*Astrophysical Journal Letters*」に掲載されました。



AT2023clx の発見前(Pan-STARRS)と発見後(せいめい望遠鏡/TrICCS)の画像と、銀河中心領域のイメージ図。塵トーラスの方向からやってきた星(青)が壊されることにより、塵トーラスと超大質量ブラックホールからのガスの噴出方向が直交する。仮に、塵トーラスの方向以外から星がやってくる(赤)と、塵の構造とガス噴出方向は直交しない。（せいめい望遠鏡観測画像提供：京都大学岡山天文台/TrICCS）

1. 背景

宇宙に存在する多数の銀河の中心には、太陽の 100 万倍以上の質量をもつ超大質量ブラックホール(SMBH)が存在しています。恒星が SMBH に接近すると、その強い重力場による潮汐力で恒星が引き裂かれ、ガスが SMBH に落ち込みます。この際に、銀河そのものに匹敵するほど突発的に明るく輝きます。「潮汐破壊現象(Tidal Disruption Event: TDE)」と呼ばれる本現象は、恒星が一生の最後に起こす爆発現象である超新星爆発のおよそ 1000 分の 1 程度の頻度でしか発生しません。超大質量ブラックホールやその周辺環境、銀河中心における恒星集団の進化等の理解のためには、この稀な現象をいち早く発見し詳細に観測することが重要です。

TDE の観測を難しくする理由の一つに、TDE は銀河の中心で起こるため、その他の SMBH の活動と混同されやすいということが挙げられます。銀河の一部には「活動銀河核(Active Galactic Nucleus: AGN)」と呼ばれる、巨大な塵のトーラスとそこから供給される物質が SMBH に落ち込むことで形成される円盤(降着円盤)の活動現象が付随します。AGN と TDE を区別するのは難しいため、過去の多くの観測では AGN を持つ銀河を除外した上で TDE を探していました。このため、AGN と TDE の関係性も理解が不十分となっています。さらに近年は、AGN と TDE の性質を併せ持つ「Ambiguous Nuclear Transient: ANT」という新たな銀河中心の活動現象も報告されており、混沌を極めています。

2. 研究手法・成果

2023 年 2 月 22 日に、地球から約 50Mpc の距離にある銀河 NGC3799 の中心で、急激に増光する AT2023clx という現象が発見されました。発見報告の後、本研究グループは京都大学 3.8m せいめい望遠鏡を用いて迅速な観測を行い、AT2023clx が TDE であることを世界に先駆けて同定しました。AT2023clx の特筆すべき点は、その発生銀河が「低電離中心核輝線領域(Low Ionization Nuclear Emission Region: LINER)」と呼ばれる「弱い」AGN として考えられている銀河で起こったという点です。AT2023clx の性質の解明は、未だ謎に包まれている AGN と TDE の関係の解明にも繋がりますという点で注目を集めました。本研究グループは同定に引き続き、ハワイにあるすばる 8.2m 望遠鏡、スペイン・ラパルマ島にある北欧光学望遠鏡 (NOT) 2m 望遠鏡等を用いた国際的な追跡観測を行いました。

本研究グループは、すばる望遠鏡を用いて、偏光分光観測という手法で AT2023clx を観測しました。偏光分光とは、天体からの光を波長ごとに分ける分光観測に加え、光の振動面の偏りである偏光を測定する手法です。偏光は、光源の幾何学的な非対称性の情報を我々に届けてくれる非常に強力な手法です。しかし、極めて高い測定精度が必要なため、明るい天体かつ大口径望遠鏡での観測が必要となります。潮汐破壊現象は一般に地球から遠く離れた宇宙で生じるため暗く、偏光分光観測を行ったサンプルはこれまで数天体しかなく、そのほとんどが一つの天体に対し一回の観測にとどまっています。AT2023clx は 50Mpc という観測史上最近傍で生じた（したがって見かけ上明るい）TDE の一つであり、すばる望遠鏡を用いることで非常に高精度の偏光分光観測を TDE の明るさの変化に沿って 3 回行うという、これまでにない観測が実現しました。

観測の結果、1 度目の観測と 2 度目の観測で偏光を特徴づける量である光の主要な振動面の角度が 90 度変わっていることが明らかとなりました(図 1)。この振る舞いは、1 度目の偏光を形成した TDE により引き起こされる SMBH からの質量噴出の方向と、2 度目の偏光を形成した銀河中心ブラックホール周辺の塵トーラスの方向が幾何学的に 90 度直交するという、予想外の構造を持っていたことを意味します。このような特徴的な偏光の振る舞いは過去の TDE では観測されていません。TDE に対するこれまでで最も高精度かつ詳細な観測により得られた、極めて重要な情報です。この 90 度の直交という配置は、SMBH に壊された星が SMBH 周囲の塵トーラスの方向から接近したことを示唆します。通常、銀河中心の星の運動はランダムであると考えられます。しかし、AT2023clx が発生した NGC3799 が弱い AGN を持つことを考慮すると、TDE で壊された星が塵トーラスの中で形成された可能性や、AGN の降着円盤と SMBH 周囲の星が相互作用することにより星軌道が降着円盤方向に強制的に揃えられた可能性が考えられます。さらには、AT2023clx は純粋な TDE ではなく、降着円盤の活動現象を観測している可能性も考えられます。これらの可能性は、未解明な TDE と

AGN の関係性、さらには ANT のメカニズムに迫る重要な手がかりとなると期待されます。

3. 波及効果、今後の予定

本成果は、過去最高の TDE の偏光データの取得にとどまらず、未だ謎とされている AGN と TDE の性質解明の手がかりにもなり得ます。これまで、降着円盤や塵トーラスを持つ AGN においては、それらが銀河中心の星の軌道に影響を与え TDE の発生確率が上昇することが理論的に提示されていましたが、具体的な観測例はありませんでした。AT2023clx において、発生した TDE が超大質量ブラックホール周辺の塵トーラスの影響を受けた可能性を示した本研究は、TDE 発生に関する上記の理論を裏付ける証拠になり得ます。

さらに、本成果は TDE を銀河中心の環境を照らす「灯台」として用いることができる可能性を示唆しています。TDE のように突発的に銀河中心を内側から照らす光源が発生すると、周辺環境が照らされ、それは偏光情報となって我々に届きます。これを用いることで、空間的に分解できない銀河中心大質量ブラックホール周辺環境を調べることが可能となります。本成果は、銀河中心領域の物理環境を探索する新しい手段にもつながるものです。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、JSPS 科研費「特別研究員奨励費 (22J22705, 22KJ1986)」、「基盤研究(A) (JP20H00174)」、「新学術領域研究(研究領域提案型) (JP20H04737)」、「学術変革領域研究(A) (JP24H01810)」、「国際共同研究加速基金(海外連携研究) (JP24KK0070)」、「日本・フィンランド二国間交流事業 (JPJSBP120229923)」および日本天文学会「早川基金」の支援により実施されました。

本研究成果は、宇野孔起 理学研究科研究員の博士学位論文(京都大学理学研究科、2025 年 3 月)の一部に基づくものであり、本研究科卒業生である長尾崇史 トゥルク大学研究員(フィンランド)や田口健太 京都大学理学研究科研究員も参加しています。さらに、川端美穂 京都大学附属天文台研究員も協力しています。

また、京都大学岡山天文台せいめい 3.8m 望遠鏡、国立天文台すばる 8.2m 望遠鏡、北欧光学 2m 望遠鏡、および電波干渉計 e-MERLIN を用いた観測を行いました。

<用語解説>

(1) 潮汐力

重力源からの位置の違い(例:SMBH から見て恒星の近い側と遠い側)による重力差が引き起こす、物体を引き伸ばす方向に働く力。潮汐力が恒星自身の重力に打ち勝つと、恒星はバラバラに引きちぎられる。

<研究者のコメント>

「せいめいで同定した翌日、すばるで観測を実施しました。ちょうど観測装置が搭載されていた最終日で、関係者の迅速な対応と幸運が重なり、貴重なデータが得られました。こうした Serendipitous な発見は観測研究の醍醐味です。次にどんなデータが出てくるのか、ワクワクしながら研究を進めることが出来ました。また、せいめいとすばるの連携が実現した本研究は、せいめいの設計理念に沿った理想的な形であり、運用開始から観測を行ってきた身として、非常に嬉しいです。」(宇野孔起)

「世界中で TDE 研究が盛り上がってきた中で、それまで超新星の研究で培ってきた経験を生かして独自の成果に繋がる戦略として、TDE の同定観測及び偏光追観測を柱としたプロジェクトを開始したのが 2022 年。その直後に AT2023clx が発生したのは幸運でした。TDE であることを示すスペクトル(せいめい望遠鏡)が表示された瞬間、偏光データ(すばる望遠鏡)が美しい波長依存性と時間進化を示したことを見た瞬間、それが塵トーラスによる反射という解釈で見事に説明できると気が付いた瞬間—こういう瞬間があるので、研究ってやめられないのです。」(前田啓一)

<論文タイトルと著者>

タイトル：Spectropolarimetry of A Nuclear Transient AT2023clx: Revealing The Geometrical Alignment between The Transient Outflow and The Nuclear Dusty Region (銀河中心の突発天体 AT2023clx の偏光分光観測: 突発天体由来のアウトフローと銀河中心の塵領域の幾何学的整列の解明)

著者：Uno, K., Maeda, K., Nagao, T., Leloudas, G., Charalampopoulos, P., Mattila, S., Aoki, K., Taguchi, K., Kawabata, M., Moldon, J., Pérez-Torres, M., Pursiainen, M., Reynolds, T.

掲載誌：Astrophysical Journal Letters

DOI：10.3847/2041-8213/add71b

プレプリント (arXiv.org のページ): <https://arxiv.org/abs/2503.19024>

<参考図表>

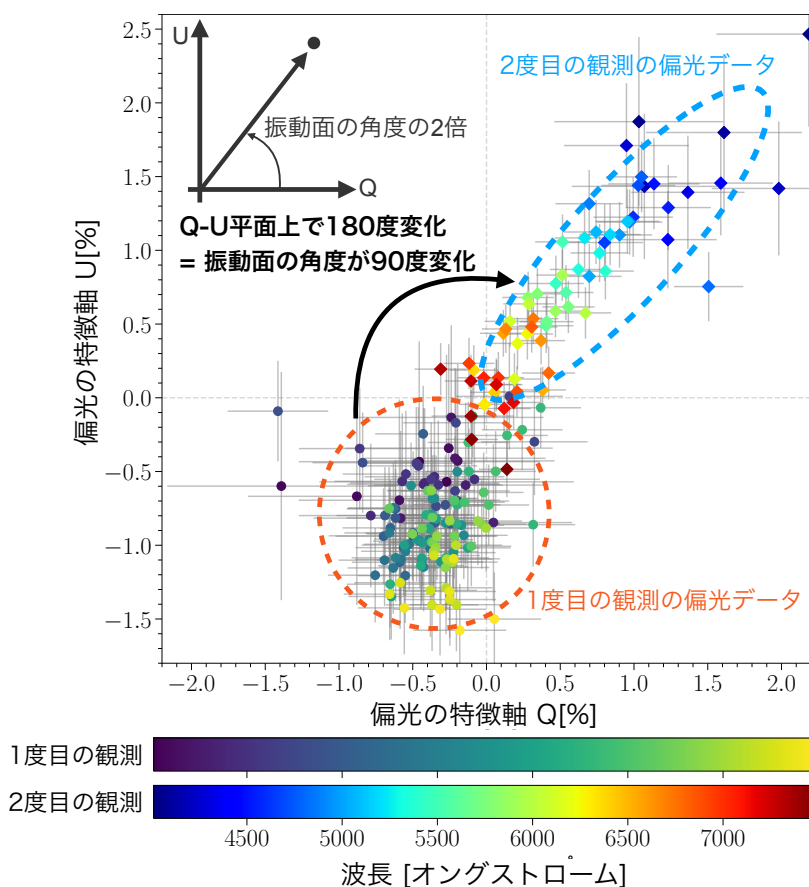


図 1: 偏光分光観測の結果。偏光の特徴量である Q と U からなる平面上に、各波長ごとの偏光の観測点を表示した。この図では、Q の正方向から測った角度の 2 倍が偏光の振動面の角度として表される。1 度目の観測と 2 度目の観測でデータ点の角度が約 180 度変化しているため、偏光の振動面の角度が 90 度変化していることが分かる。