

2021年1月26日

冬眠するブラックホール ～銀河衝突がもたらす大質量ブラックホールのエネルギー源の流失～

発表者：

三木 洋平（東京大学情報基盤センター 助教）

森 正夫（筑波大学計算科学研究センター 准教授）

川口 俊宏（尾道市立大学経済情報学部 准教授／国立天文台 客員准教授）

発表のポイント：

- ◆銀河中心の大質量ブラックホールの活動性の活性化・不活性化の起源を、銀河の衝突現象と結びつけることで、世界で初めて解明しました。
- ◆小さな銀河が大きな銀河に衝突してブラックホール周辺の物質を剥ぎ取ってしまうことで、ブラックホールの活動を停止させる場合もある事を証明しました。
- ◆本研究はブラックホールと銀河の相互の進化解明のマイルストーンとなることが期待されます。

発表概要：

宇宙には太陽の質量の10万倍を超える大質量ブラックホール（注1）があまねく存在しますが、そのごく一部は落ち込む物質をエネルギー源にして明るく輝き激しく活動しているものの、ほとんどは銀河の中心でひっそりと佇んでいます。こうしたブラックホールの活動と休眠の間の状態変化をつかさどるメカニズムが未解明である中、東京大学情報基盤センターの三木洋平助教、筑波大学計算科学研究センターの森正夫准教授、尾道市立大学経済情報学部／国立天文台の川口俊宏准教授の研究グループは、Oakforest-PACS（オークフォレストボックス、注2）等のスーパーコンピュータを駆使し、銀河衝突と銀河中心ブラックホールの活動性の謎を世界で初めて明らかにしました。

銀河中心ブラックホールは、これまで銀河衝突により激しく活動すると信じられてきました。衝突によって銀河円盤の物質が中心に落下し、ブラックホールに落ち込むことでその活動にスイッチが入ります。しかし銀河衝突が中心で起こった場合、事態は全く異なります。矢が正鵠を射ぬくがごとく、中心に衝突した銀河がブラックホール周辺のガスを持ち去ってしまい、エネルギー源を失ったブラックホールは活動を停止し静かに眠りにつくのです（図1、図2）。

本研究が明らかにしたブラックホール活動性の休眠メカニズムは、最近の観測によって見つかった、銀河中心ブラックホールの活動が急停止した兆候を示す新種族の天体群との関連もうかがうことができ、天文学最大の謎の一つである、銀河の進化に伴う銀河中心ブラックホールの形成解明へのマイルストーンとなることが期待されます。

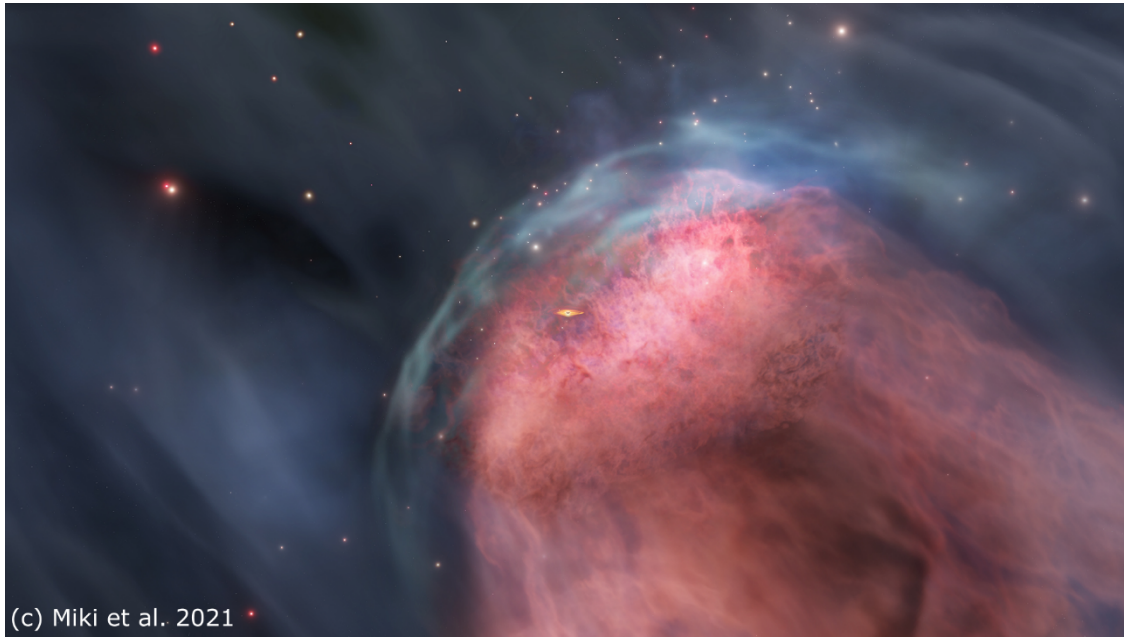


図1. 銀河衝突がブラックホール周辺のガスを持ち去る様子（想像図）。

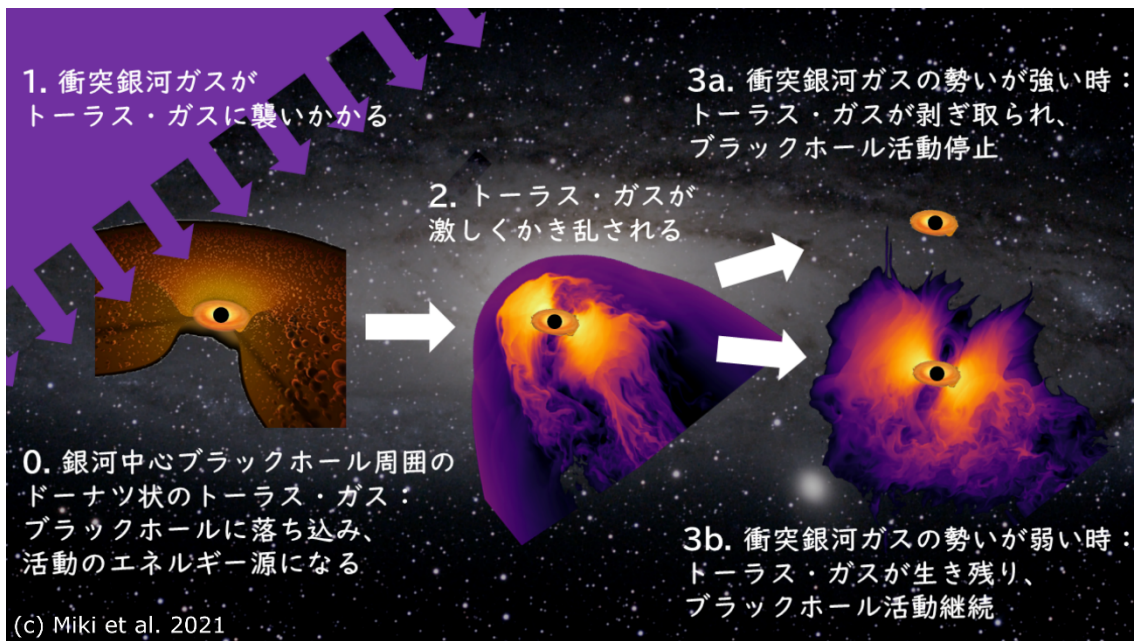


図2. 銀河衝突が中心ブラックホール活動に与える影響。

発表内容：

<研究の背景>

銀河中心の大質量ブラックホールは多くの人々の興味を引き付けてきた魅力的な天体です。2020年のノーベル物理学賞は私たちが住む天の川銀河の中心に大質量ブラックホールが存在することを確信させた観測に対して与えられ、また、2019年にはイベントホライズンテレスコープが楕円銀河 M87 中心の大質量ブラックホールによる影を撮影したことが発表されました。

銀河中心の大質量ブラックホールに十分な量のガスが落下（降着）すれば、ガスの位置エネルギーの解放により、活動銀河核（注3）として明るく輝きます。大質量ブラックホールへのガス供給は角運動量（遠心力）により妨げられ、トーラス（ドーナツ）状の構造がガスの“ため池”の役割を担うと考えられています。

このガスの落下によるブラックホール活動の点火機構は、銀河の進化過程において頻繁に起こる現象である銀河衝突だと考えられていますが、活動性を終了させる機構にはいまだ定説がありません。一方で、大質量ブラックホールが明るく輝いている期間は、宇宙年齢 138 億年のうちわずか 1 億年程度と非常に短いことが知られています。つまり、多くの銀河中心ブラックホールはガス欠でエネルギー源の枯渇状態にあり、我々が住む天の川銀河中心の大質量ブラックホールも例外ではありません。また、急激に活動性が停止した痕跡を示す銀河も近年多数見つかってきており、活動停止機構の特定が待たれていました。

天の川銀河中心の大質量ブラックホールと並んで活動性が非常に低いのが、本研究にも密接に関わるアンドロメダ銀河中心の大質量ブラックホールです。アンドロメダ銀河は銀河考古学（注4）における代表的な研究対象の一つで、天の川銀河とよく似た性質を持つ姉妹銀河であり、さらに、隣の銀河でとても近いこともあって詳細な観測情報を基にしたたくさんの研究が活発に進められてきました。アンドロメダ銀河の周辺には、筋状や貝殻状の恒星分布の巨大な構造があることが分かっています。それらを含む数々の構造は、かつて衛星銀河（注5）がアンドロメダ銀河の中心領域を突き抜けていった際に破壊された残骸であると考えられており、過去の研究によって衛星銀河の大きさや質量、落下軌道などが明らかにされています。つまり、アンドロメダ銀河は銀河衝突が中心ブラックホール活動を停止できるかどうかを検証する上で最適な実験場なのです。

<研究内容>

三木洋平助教（東京大学）、森正夫准教授（筑波大学）、川口俊宏准教授（尾道市立大学／国立天文台）の研究グループは、銀河衝突によって中心ブラックホールへのガス供給源を取り去ってしまうことができれば、やがて中心ブラックホールはガス欠状態に陥り活動停止に追い込まれるため、銀河衝突がブラックホール活動の停止機構としても働くという仮説を立てました（図1、図2）。そして東京大学情報基盤センターと筑波大学計算科学研究センターで共同運用されている Oakforest-PACS などのスーパーコンピュータを用いた 3 次元数値流体シミュレーションや 1 次元解析的モデルを駆使し、この仮説を検証することで、銀河衝突と中心ブラックホールの活動性の関係の解明に挑みました。

研究の第一歩として、銀河衝突の痕跡が見つかっており、なおかつ中心ブラックホールの活動性が極めて低いという特徴を併せ持つアンドロメダ銀河に注目し、銀河衝突による中心ブラックホール周辺のトーラス状ガスの剥ぎ取りが可能であるかを検証しました。この結果、衝突した衛星銀河ガスの柱密度（注6）がトーラス状ガスの柱密度よりも高い場合には、衛星銀河

ガスから運動量が与えられることによって、ほぼ全てのガスが剥ぎ取られることが分かりました（図3）。

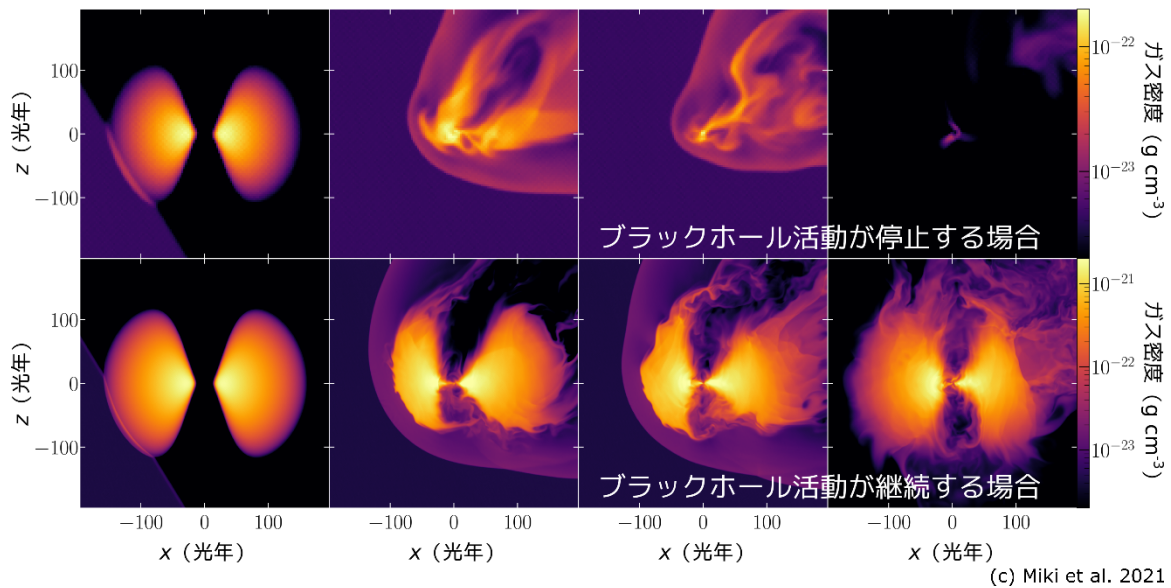


図3. トーラスガスの時間進化。上段にはトーラスガスが剥ぎ取られる場合、下段にはトーラスガスが生き残る場合の結果を、 x - z 子午面上における密度分布を用いて示した。衛星銀河ガスはシミュレーション開始から110万年間に渡って、図中の左下隅から流入し続ける。左から順に、ガス流入開始から2万年、46万年、90万年、136万年後のガス密度分布を示した。

さらに、この銀河衝突による一連の過程について、アンドロメダ銀河以外の他の銀河中心ブラックホール活動の停止機構への拡張可能性を検証しました。その結果、多くの銀河中心ブラックホール周辺のトーラス状ガスの柱密度は銀河衝突によって剥ぎ取り可能な範囲である、つまり銀河衝突によって多くの銀河中心ブラックホール活動の停止が可能であることを示しました（図4）。加えて、銀河衝突による銀河中心ブラックホール活動の停止頻度を見積もるために、位置天文観測衛星 Gaia（ガイア、注7）の世界最高精度の観測データに基づく衛星銀河の精密軌道計算を実施しました。これにより、銀河の中心領域に強い影響を与えられる銀河衝突の頻度が1億年に1回程度であったと推定されることを示しました。この結果は大質量ブラックホールが明るく輝いている期間は1億年程度であるという事実とよく符合しており、銀河衝突と大質量ブラックホール活動の関係性の完全解明に向けての大きな一歩となるものです。

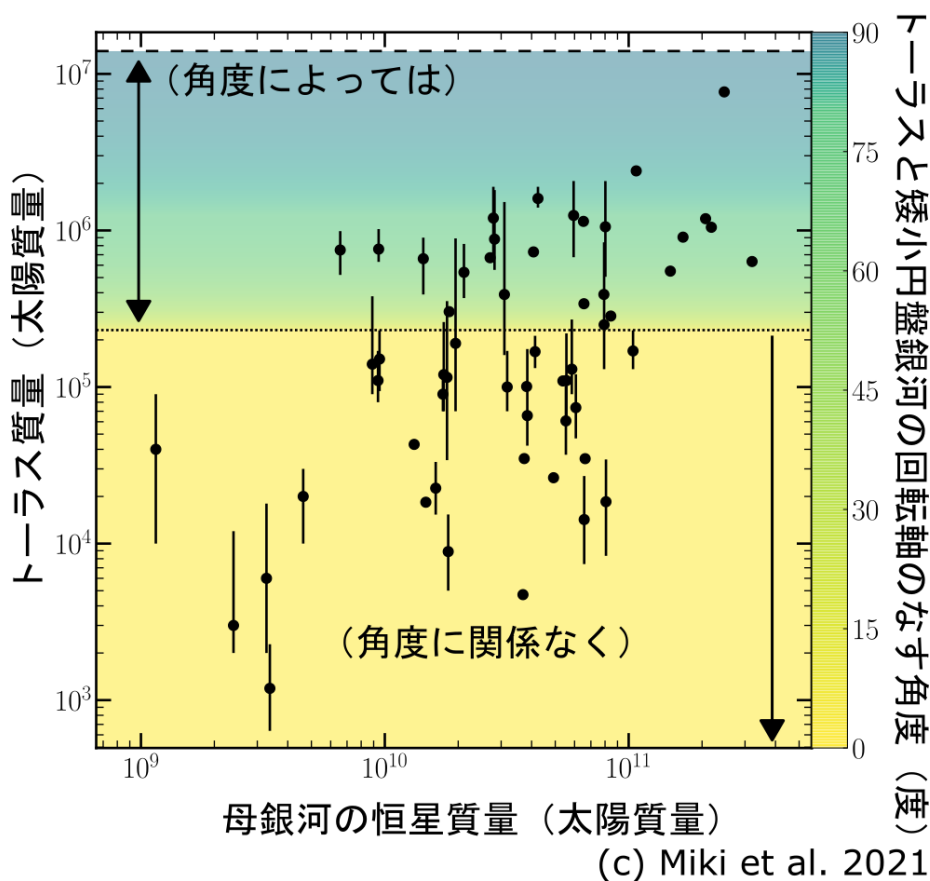


図4. トーラス質量と母銀河の関係。現在活動中の中心ブラックホールを持つ銀河について、トーラス質量と母銀河の恒星質量との関係を調べた。背景の色は銀河衝突によってトーラスが剥ぎ取り可能な領域を示している。銀河中心核へと落下してきた矮小円盤銀河の回転軸とトーラスの回転軸が一致する（なす角度が0度）場合が剥ぎ取り効率最低の場合にあたり、20万太陽質量程度以下のトーラス（黄色の領域）は剥ぎ取り可能である。角度を増やしていくと剥ぎ取り効率が上がっていき、最大で1000万太陽質量程度までのトーラスが剥ぎ取り可能であることが分かる。

<将来の展望>

本研究によって、中心ブラックホールの活動性を活性化するのみと考えられてきた銀河衝突が、実は反対に活動性の停止にも寄与することが明らかになりました。中心ブラックホールの運命を左右するのは衝突してくる衛星銀河の軌道であり、銀河の中心領域に突入する際には活動性を停止、銀河の中心を離れて衝突する際には活動を活性化させると考えられます。こうした軌道の重要性は今まで考えられておらず、銀河とブラックホールの共進化過程への理解を深める上での重要な視点を提供しました。また、近年の観測によって急激に中心ブラックホールの活動性を停止した兆候を示す天体群が新たに発見されており、こうした新天体群の理解にもつながることが期待されます。

今回の研究によって、中心ブラックホールの活動性が銀河衝突によりコントロールされることを示しました。しかし、ブラックホール活動をどの程度の期間にわたって停止し続けられるかを明らかにするためには、銀河中心領域を十分な精度で取り扱ったうえで銀河全体の進化を長時間に渡って計算する超大規模シミュレーションを遂行する必要があります。しかし、このような研究はいまだ未踏領域にあります。今後、東京大学情報基盤センターが導入予定の

Wisteria/BDEC-01（ウイステリア／ビーデックゼロワン、注 8）や筑波大学計算科学研究センター学際共同利用などの最新のスーパーコンピュータを最大限活用した超大規模シミュレーションの遂行によって、銀河とブラックホールの共進化過程の解明に向けての探求を続けていきます。

<研究支援>

本研究は、以下の支援を受けて実施されました。

- ・ 日本学術振興会 科学研究費補助金（基盤研究（S）20224002、基盤研究（A）21244013、基盤研究（C）17K05389、若手研究 20K14517、基盤研究（C）20K04022）
- ・ 文部科学省 特別推進研究（16002003）
- ・ 筑波大学計算科学研究センター 学際共同利用プログラム（課題名：近傍銀河の形成・進化の探求）
- ・ 自然科学研究機構 国立天文台 研究交流委員会 助成（20DS-0502）

発表雑誌：

雑誌名：「Nature Astronomy」（1月26日付）

論文タイトル：Destruction of the central black hole gas reservoir through head-on galaxy collisions（邦訳：銀河の正面衝突による中心ブラックホールのガス供給源の破壊）

著者：Yohei Miki*, Masao Mori, and Toshihiro Kawaguchi

DOI 番号：10.1038/s41550-020-01286-9

アブストラクト URL：<https://www.nature.com/articles/s41550-020-01286-9>

プレプリント URL：<https://arxiv.org/abs/2012.05700>

問い合わせ先：

東京大学情報基盤センター

助教 三木 洋平

用語解説：

（注 1）大質量ブラックホール、銀河中心ブラックホール

太陽質量の数十万倍以上の質量を持つブラックホールを大質量ブラックホール、あるいは超大質量ブラックホールや巨大ブラックホールなどと呼びます。ほとんどの銀河の中心には大質量ブラックホールが存在することが知られており、我々が住む天の川銀河中心には 400 万太陽質量、お隣のアンドロメダ銀河中心には 1 億太陽質量もの大質量ブラックホールがあると考えられています。銀河中心ブラックホールの質量と銀河バルジの質量の間には比例関係（マゴリアン関係）が成り立つことが知られており、銀河と中心ブラックホールはお互いに影響を及ぼしあいながら共進化してきたと考えられています。しかし、共進化過程の詳細はいまだによく分かっておらず、天文学最大の謎の一つとなっています。

（注 2）Oakforest-PACS（オークフォレストボックス）

東京大学情報基盤センターと筑波大学計算科学研究センターが共同運営している最先端共同 HPC 基盤施設に設置、運用されているスーパーコンピュータです。総ピーク性能は 25.0 PFlop/s であ

り、2020年11月のTOP500リスト (<https://www.top500.org/>) では世界第22位、国内第4位にランクインしています。

(注3) 活動銀河核 (Active Galactic Nuclei)

銀河中心部の非常に狭い領域から、銀河全体からの光度をも超えるほど強い電磁波が放射される天体が観測されており、こうした活動銀河の中心核を活動銀河核と言います。Active Galactic Nucleiの頭文字をとってAGNと呼ばれることが多いです。活動銀河核のエネルギー源は、銀河中心の大質量ブラックホールへと落下する(降着する)ガスの位置エネルギーであると考えられています。銀河中心核の活動を誘発するためには銀河中心へとガスを落としてあげることが必要であり、銀河衝突が活性化のトリガーであると考えられています。また近傍銀河の観測からは、全体の銀河の中の数%程度が活動銀河であることが知られています。宇宙年齢は138億年であるので、活動銀河核として明るく光り輝いていられる期間は1億年程度と、比較的短期間にすぎないということが示唆されています。

(注4) 銀河考古学

銀河内の恒星の分布や運動状態、金属量といったデータは、銀河がどのように誕生し、成長してきたかという化石情報を含んでいます。人類の歴史を調べるために過去の文明の痕跡を丹念に調べる考古学と同じように、銀河考古学では銀河の形成・進化史を調べるための手がかりとしてこうした化石情報を利用します。恒星を一つ一つ分解した観測や、非常にぼんやりとした構造の検出が必要であるため、天の川銀河やアンドロメダ銀河といったごくごく近くの銀河が主要なターゲットです。

(注5) 衛星銀河

天の川銀河やアンドロメダ銀河程度の質量の銀河周辺では、数十個の小質量銀河(矮小銀河)が見つかっており、こうした天の川銀河やアンドロメダ銀河(母銀河)に付随する銀河を衛星銀河と呼びます。衛星銀河が母銀河に衝突して破壊されたり、衛星銀河が母銀河からの潮汐力によって引き延ばされることも起こっており、こうした銀河の衝突現象の痕跡を手掛かりとした銀河の形成・進化史の探求も進められています。また、現在の標準的な構造形成モデルは、天の川銀河くらいの質量の銀河には数百個程度のサブ構造が付随することを予言しており、こうしたサブ構造の数について理論と観測の間には1桁程度の不一致があることが知られています。この不一致は衛星銀河問題と呼ばれており、現代宇宙論が解決すべき深刻な問題の一つです。

(注6) 柱密度

単に密度というと単位体積あたりの質量を意味する体積密度のことを指しますが、天文学においては視線などの一方向に沿っての総質量を意味する柱密度もよく使われます。単位面積あたりの質量を指し、体積密度を一方向に沿って積分することで求められます。本研究では、落下してきた衛星銀河ガスの総量が重要なので、衛星銀河ガスの落下方向に沿って積分した柱密度を用いています。

(注7) Gaia

欧州宇宙機関(ESA)がヒッパルコス衛星の後継機として打ち上げた位置天文観測用の宇宙望遠鏡です。2016年9月14日から科学観測を開始し、2018年4月25日に第2次リリース(Gaia Data Release 2: Gaia DR2)が、2020年12月3日に第3次初期リリース(Gaia Early Data

Release 3: Gaia EDR3) が公開されました。本研究で用いた Gaia DR2 には、約 17 億天体のデータが含まれています。

(注 8) Wisteria/BDEC-01 (ウイステリア/ビーデックゼロワン)

東京大学情報基盤センターが導入を決定した「計算・データ・学習」融合スーパーコンピュータシステムであり、2021 年 5 月 14 日に稼働開始予定です。シミュレーションノード群 (Odyssey、25.9 PFlop/s) とデータ・学習ノード群 (Aquarius、7.2 PFlop/s) の 2 つの計算ノード群からなるシステムで、総ピーク性能は合計で 33.1 PFlop/s であり、2020 年 11 月の TOP500 リスト (<https://www.top500.org/>) では「富岳」に続く国内第 2 位の性能に相当します。

添付資料：

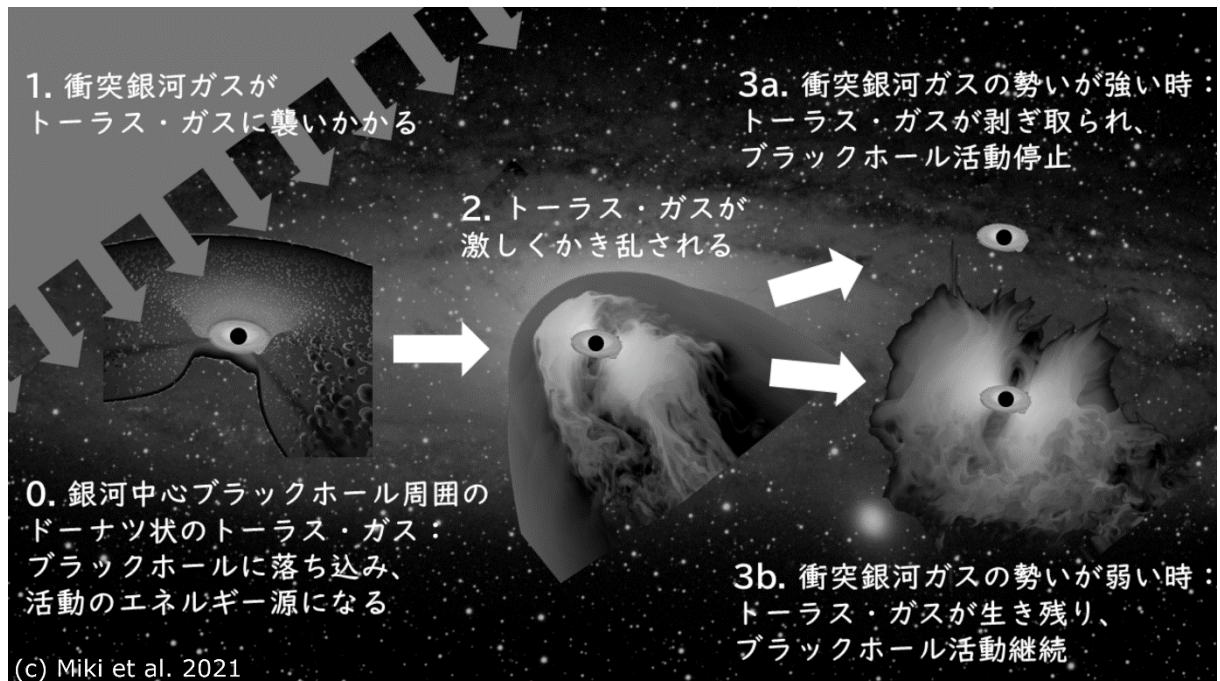


図5. 図2のモノクロ版。

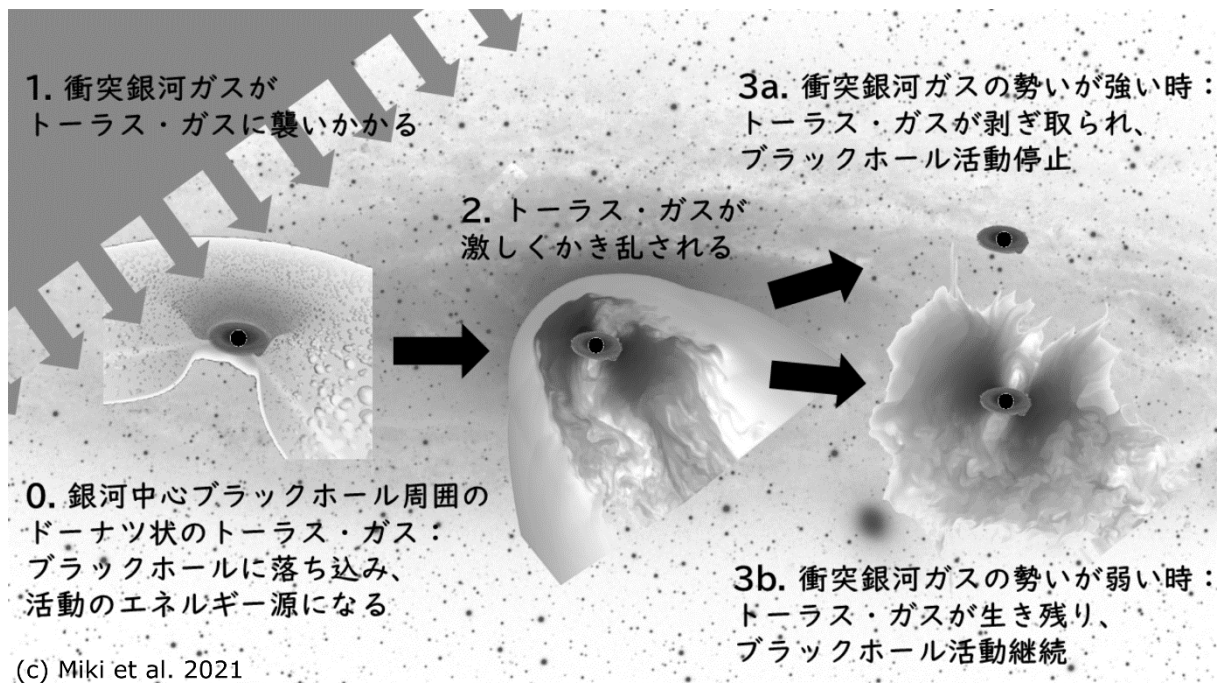


図6. 図5の白黒反転版。

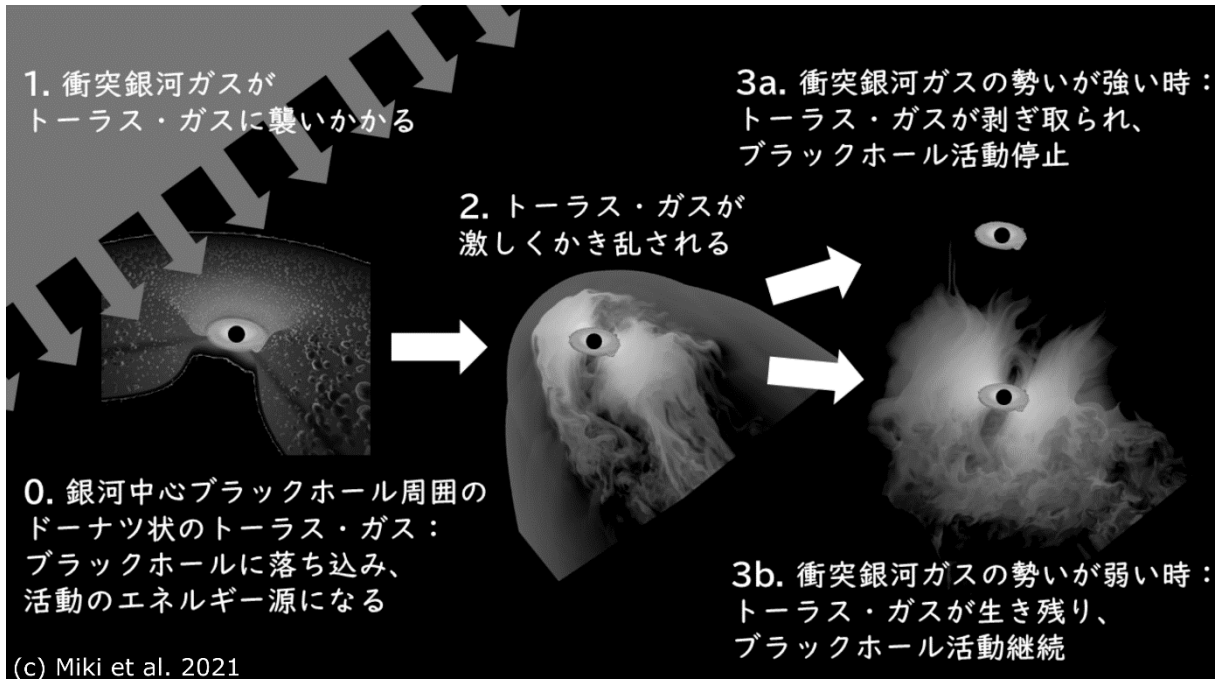


図7. 図5の背景のアンドロメダ銀河を消したもの。

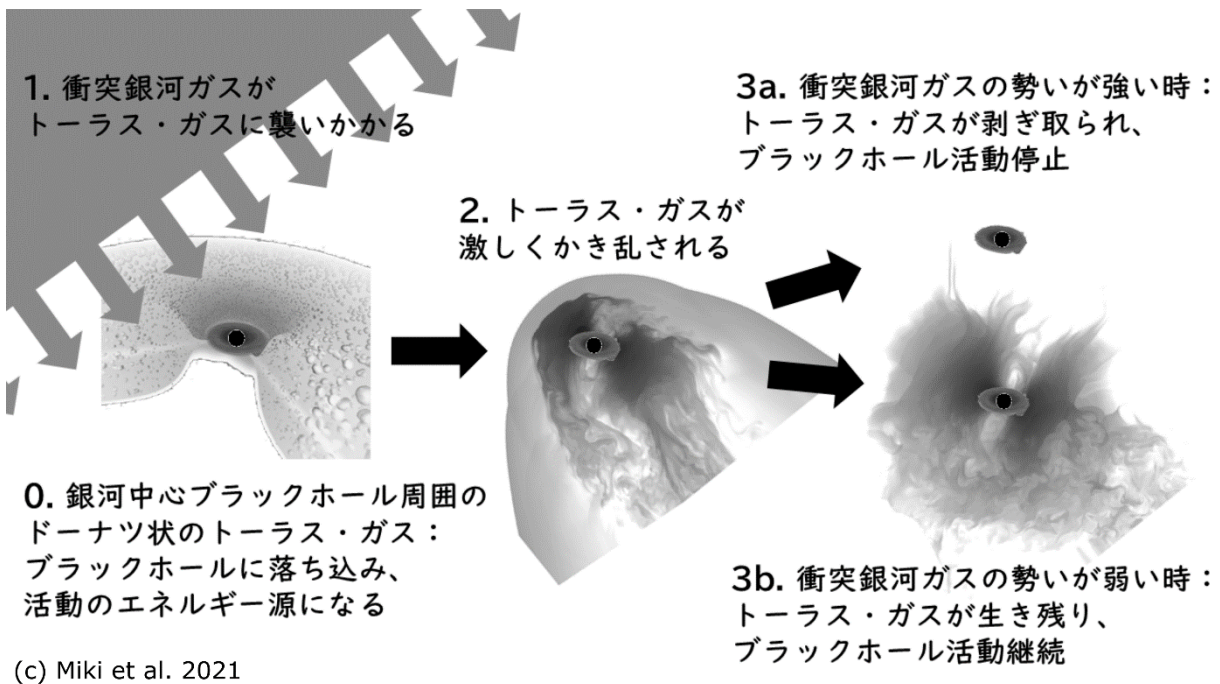


図8. 図6の背景のアンドロメダ銀河を消したもの。