

超巨大ブラックホールを取り巻くドーナツ構造の正体を暴く

★概要★

国立天文台の泉拓磨氏、鹿児島大学の和田桂一氏を中心とする研究チームは、アルマ望遠鏡を使ってコンパス座銀河の中心に位置する超巨大ブラックホールを観測し、その周囲のガスの分布と動きをこれまでになく詳細に明らかにすることに成功しました。活動的な超巨大ブラックホールの周囲にはガスや塵のドーナツ状構造が存在すると考えられてきましたが、その成因は長年の謎でした。今回の観測結果とスーパーコンピュータによるシミュレーションを駆使することで、超巨大ブラックホールの周囲を回りながら落下していく分子ガス円盤と、超巨大ブラックホールのすぐ近くから巻き上げられる原子ガス、イオン化したプラズマの存在が浮かび上がり、これらの「ガスの流れ」が自然とドーナツ的構造を作っていることが確かめられました。この結果は、存在そのものは天文学の教科書に掲載されているながら、その詳しい構造・運動・形成メカニズムがわかっていなかったドーナツ状構造の正体を暴いた、重要な成果といえます。

★本文★

多くの銀河の中心には、太陽の数十万倍から数億倍もの質量を持つ超巨大ブラックホールがあると考えられています。なかでも、非常に大量の物質を吸い込む活動的な超巨大ブラックホールはそれを宿す母銀河にも多大な影響を与えると考えられており、銀河の進化を探る手がかりとしても注目されています。そのような中心核は、「活動銀河核」と呼ばれます。活動銀河核は、超巨大ブラックホールの重力に引かれて落下してくる物質のエネルギーをもとにして非常に明るく光っており、ブラックホールに吸い込まれそこねた物質はそのエネルギーを浴びて噴水のように噴き出していると考えられます。

これまでの観測から、活動銀河核を成す超巨大ブラックホールの周囲には、ガスと塵がドーナツ状に集まった分厚い構造があるという仮説が有力でした。これは、中心領域が非常にはっきりと見えている活動銀河核や、よく見えない活動銀河核が存在するという観測的事実を統一的に説明するためでした。ドーナツ構造があれば、活動銀河核の光が横方向には遮られるので、地球と活動銀河核の位置関係によって見え方が異なることが説明できます。こうした仕組みを、活動銀河核の「統一モデル」と呼びます。アルマ望遠鏡による過去の観測で活動銀河核を取り巻く回転ガス構造がはっきりととらえられ（注）、この「統一モデル」で提唱されたドーナツ構造の实在が確かめられました。しかし、今回の研究チームを率いた国立天文台の泉拓磨氏は「ドーナツ構造の想像図は天文学の教科書や授業でよく出てきますし、近年の観測で存在自体は確認されていますが、いったいどのようにしてあのような分厚い構造ができるのか、その物理的起源はまだわかっていないのです。」

と語ります。

鹿児島大学の和田桂一教授らは、スーパーコンピュータによるシミュレーションでこの謎に挑みました。活動銀河核からの強烈な光が周囲のガスに与える圧力、熱のやり取り、ガスの中での分子の生成と破壊、光の放出などさまざまな過程を組み込み、国立天文台が運用するスーパーコンピュータ Cray XC30「アテルイ」でシミュレーションを行った結果、「統一モデル」で想定されたドーナツ構造が次の3つの成分が合わさってできたものであることが示唆されました(図1)。すなわち、(1) ブラックホールを取り巻く薄い円盤の中で、回転しながらブラックホールに落下するガス、(2) ブラックホール周辺から噴き上げられるガス、(3) (2)の一部が重力によって円盤に落下してくる成分、です。つまり、ガスの流入・流出・落下が「噴水」のような流れをなし、自然にドーナツのような分厚い構造を作っていることが予測されたのです。この結果は、長年の謎であった活動銀河核のドーナツ構造の起源に迫るものとして世界的にも注目されています。

鹿児島大の和田氏は、「これまでの理論モデルは、ドーナツ的な構造を先に仮定して、その形や内部構造をいろいろ変えて活動銀河核の観測結果を説明しようとするものでした。しかし、私達は物理法則に基づく数式をきちんと解けば、自然にドーナツ的構造ができ、さらにさまざまな波長の観測結果も説明できるということを初めて示したのです。」と語ります。

次は、観測でこの3つの成分が実際に存在しているかを確かめる番です。泉氏は、シミュレーション研究を行った和田氏らと一緒に、アルマ望遠鏡を使ってコンパス座銀河を観測しました。コンパス座銀河は地球からおよそ1400万光年の距離にある渦巻の形をした銀河で、もっとも地球に近い活動銀河核のひとつを有しており、詳細な観測に最適なターゲットです。

研究チームが観測したのは、一酸化炭素分子が放つ電波と、炭素原子が放つ電波でした。一酸化炭素は低温で高密度なガス円盤に含まれる一方、炭素原子は活動銀河核からの強烈な光によって一酸化炭素分子が壊れることで作られると予測されています。つまり、炭素原子はより高温なガスに含まれるのです。研究チームはこれらを観測することで、異なる性質をもつガスの分布を詳しく調べ、さらに電波のドップラー効果を利用してそれぞれのガスの動きも捉えることを目指しました。

観測の結果、一酸化炭素分子は超巨大ブラックホール周りを整然と運動する薄い円盤構造を作っていることが分かりました(シミュレーションのドーナツ構造の(1)の成分に相当)。その一方、炭素原子は、活動銀河核から噴き出すような動きをしていることが明らか

かになりました。しかしその速度は、超巨大ブラックホールとガス円盤の重力を振り切るほど速いものではありませんでした。つまりこの吹き出たガスの少なくとも一部は、やがて重力に引かれてまたブラックホールの近くに戻ってくると考えられるのです。この特徴もシミュレーション結果と一致するものであり、ドーナツ構造を構成する(2)と(3)の成分と考えられます。

また円盤部分の炭素原子は、一酸化炭素分子よりも乱雑に運動していることがわかりました。原子や分子の運動が乱雑であることは、すなわち圧力が高いことを意味します。今回の場合では炭素原子ガスの圧力が高く、その分ガスの厚みが大きくなっていると考えられます。ガスの運動が乱雑なのは、ドーナツ構造を構成する(3)の成分として落下してきた炭素原子ガスが円盤部分のガスと衝突してかきまぜられるためと解釈でき、(3)の成分が存在する証拠と考えられます。

「活動銀河核を取り巻くドーナツ構造をつくるガスの起源をはっきり示すことができた、と私たちは考えています。アルマ望遠鏡を使って、原子ガスと分子ガスの両方の分布や動きを詳細に調査することで初めて成し得た成果です。」と泉氏はコメントしています。

アルマ望遠鏡に搭載された炭素原子が放つ電波（周波数 492 GHz）を観測することができる受信機は、日本が開発を分担したものでした。今回の結果は日本発のアイデアと技術が活かされた成果であり、また理論・シミュレーション研究と観測との協働の威力を示す成果ともいえるでしょう。

一方、(2)の吹き上げられている成分についても、活動銀河核からの強烈な光によって電離（プラズマ化）しており、そこから発生する酸素や窒素などの輝線の強度が活動銀河核に特徴的に観測される、「コーン状の電離ガス領域」を再現し、コンパス座銀河のハッブル宇宙望遠鏡などの可視光の観測結果とよく合うことも、鹿児島大学の大学院生を含むチームで明らかにしました。

今後の展望として和田氏は、「今回の理論と観測の共同研究では、活動銀河核のまわりの原子ガスと分子ガスの動きと分布を詳しく調べることができました。また、それらが電離ガスとも関連していることも明らかになりました。今後、NASAが開発中のジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡とアルマ望遠鏡と組み合わせれば、コンパス座銀河のように近い活動銀河核だけではなく、クエーサーなど遠くの活動銀河での超巨大ブラックホールの周辺構造を理解できると考えています。世界中の研究者と協力して、そのための研究計画を練っているところです」と語っています。

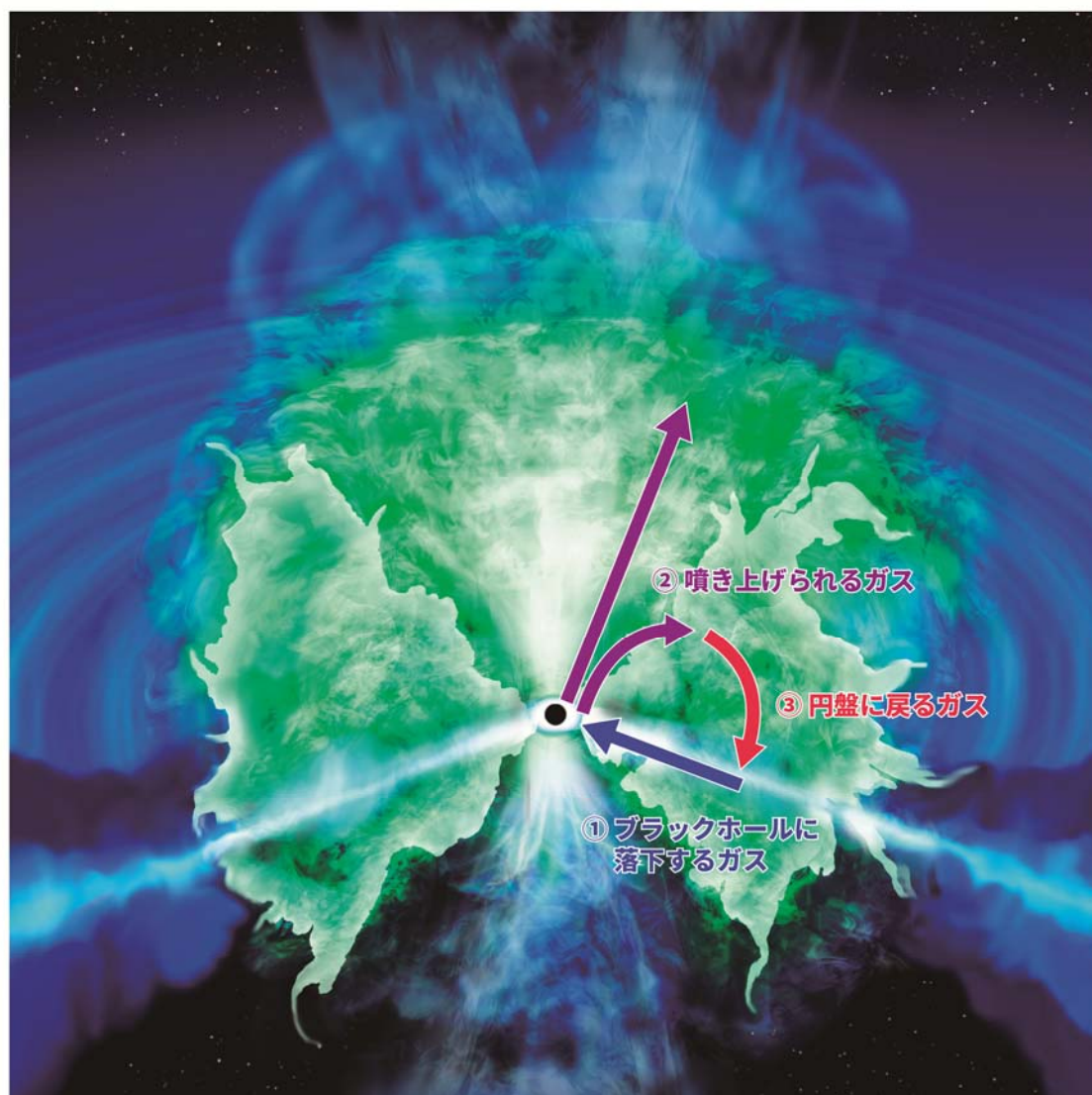


図1. 超巨大ブラックホールを取り巻くガスのイメージ図。(1) ブラックホールを取り巻く円盤の中で、回転しながらブラックホールに落下するガス、(2) ブラックホール周辺から噴き上げられるガス、(3) (2)の一部が重力によって円盤に落下してくる成分、の3つが合わさることでドーナツ構造ができると考えられる。

Credit: 国立天文台

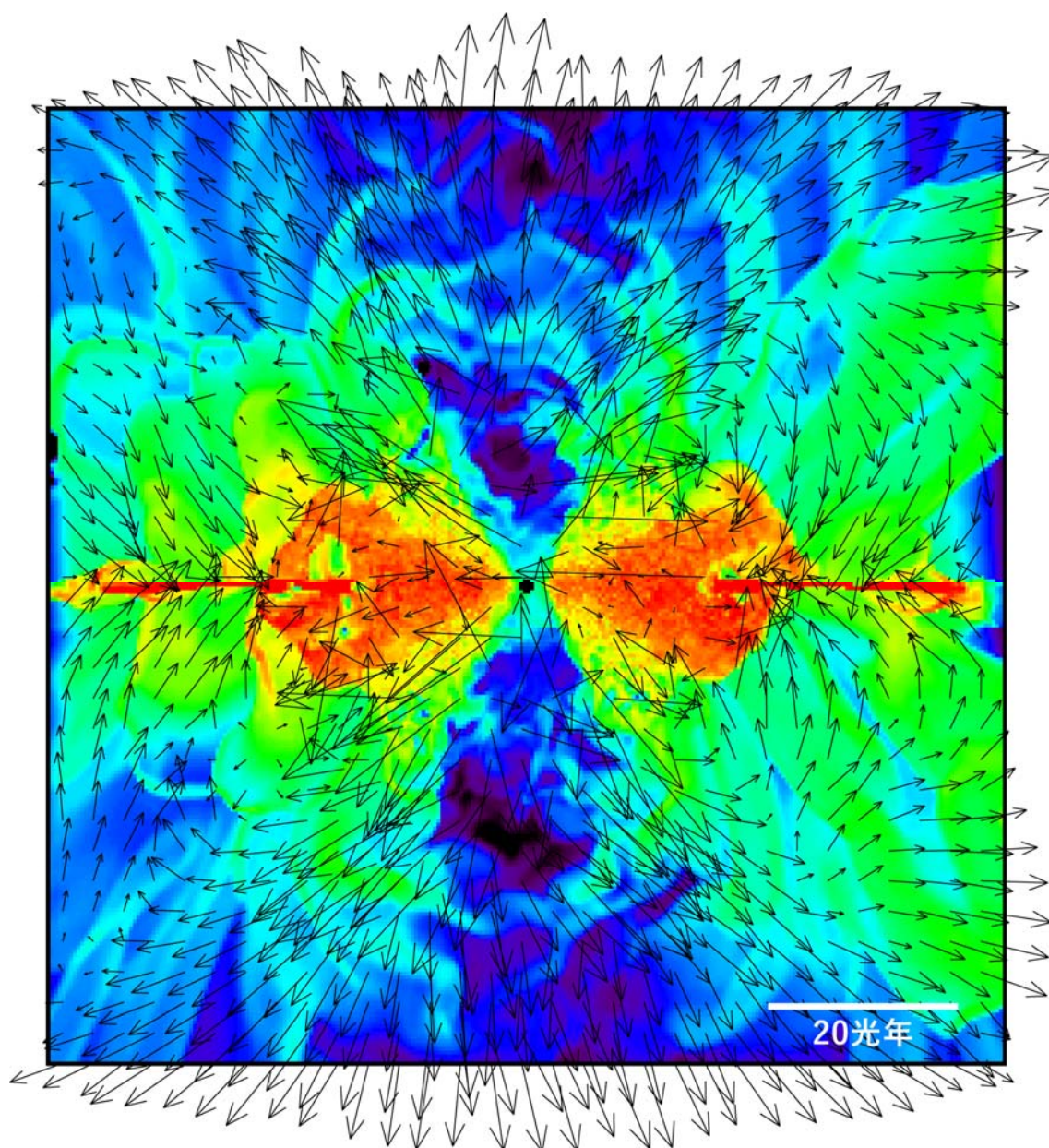


図2. スーパーコンピュータ「アテルイ」によるシミュレーションで示された超巨大ブラックホール周囲のガスの分布の断面図。矢印でガスの動きをあらわしています。中央のブラックホールに向かって落下するガス、両極方向（図の上下方向）に噴き出すガス、そして重力に引かれて円盤部分に落下するガスの動きと分布が示されています。黄色や赤の部分は密度が高い領域で、ブラックホールの両側に厚みのある構造ができていることがわかります。

credit: 国立天文台, Wada et al.

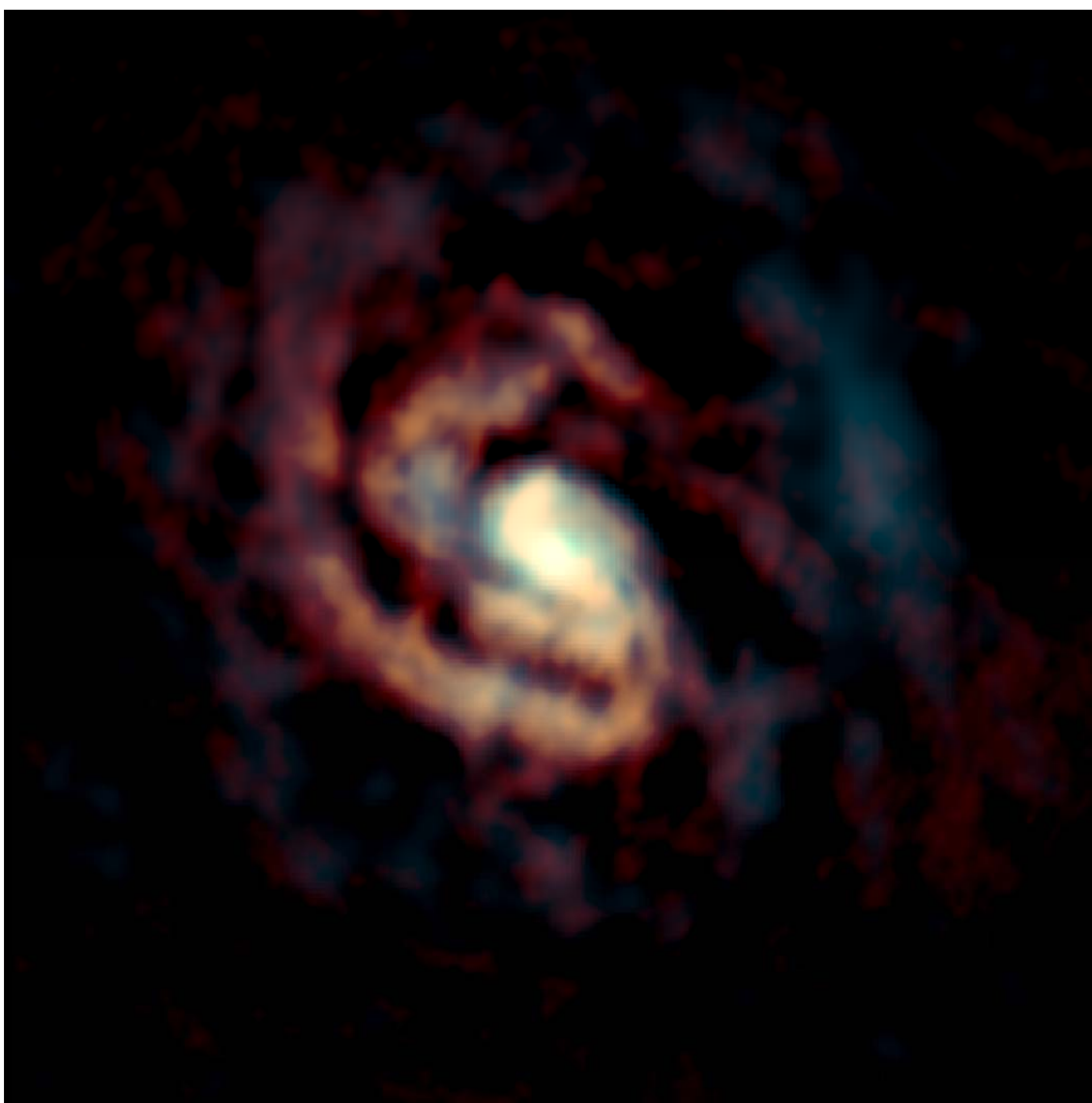


図 3. アルマ望遠鏡で観測した、コンパス座銀河の中心部。オレンジ色で一酸化炭素の分布を、水色で炭素原子の分布を示している。

Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), Izumi et al.

注：詳しくは、2018年2月14日付プレスリリース「[活動的な超巨大ブラックホールを取り巻くガスと塵のドーナツ — 予言されていた回転ガス雲を初めて観測で確認](#)」をご覧ください。

論文・研究チーム

今回の研究成果は、

T. Izumi et al. “Circumnuclear Multi-phase Gas in the Circinus Galaxy II: The Molecular and Atomic Obscuring Structures Revealed with ALMA”

K. Wada et al. “Circumnuclear Multi-phase Gas in the Circinus Galaxy III: Structure of the Nuclear Ionized Gas”

の2本の論文として、2018年10月30日発行の米国天文学会誌「アストロフィジカル・ジャーナル」に掲載されました。

この研究を行った研究チームのメンバーは、以下の通りです。

泉拓磨（国立天文台）、和田桂一（鹿児島大学/愛媛大学/北海道大学）、福重亮佑（鹿児島大学）、濱村颯太（鹿児島大学）、米倉健介（NEC 航空宇宙システム/鹿児島大学）、河野孝太郎（東京大学）

この研究は、日本学術振興会科学研究費補助金（No. 17K14247、16H03959、JP17H06130）による支援を受けています。