

巨大ブラックホールを取り巻く数百光年スケールの 3次元構造

岸 本 真

要 旨

ほとんどの銀河の中心には巨大ブラックホールが存在すると考えられている。そこにガスが落ち込んでいっている場合、ガスの放出も同時に起き、これが銀河自身に影響を及ぼす。ここ数年、宇宙物理学の分野で大きな潮流となっている、高空間分解能の面分光（撮像分光）データを用いると、こうしたブラックホールを取り巻く数百光年スケールの3次元構造を、データから直接引き出すことができる。そこから見えてくる物理構造を解説する。

キーワード：巨大ブラックホール，活動銀河中心核，撮像分光データ，3次元分布，赤外干渉計

1 研究の背景

(1) 巨大ブラックホールとその母銀河

宇宙に数ある銀河の中心には、太陽質量の1億倍程度の巨大なブラックホールが潜むと考えられている。中でも、そのブラックホールにガスが定常的に落ち込み、解放された重力エネルギーでガスが高温になって大量の輻射を放出している場合があり、こうした天体は活動銀河中心核、Active Galactic Nuclei (AGN) と呼ばれる。中心からの強い輻射のために、AGN 付近では、周囲のガスが電離され、かつ輻射圧で加速されて外側に向かって放出されており、こうしたガスの流れをアウトフローという。

こうしたガスの落ち込み（質量降着）とアウトフロー（質量放出）の過程は、AGN と母銀河（巨大ブラックホールを中心に宿すという意味で「母」銀河と呼ばれる）の相互作用の過程である。こうした過程の理解は、銀河の形成、ひいては宇宙の構造形成の理解へとつながる可能性がある。というのは、母銀河の質量（正確にはバルジと呼ばれる部分の質量）とブラックホール質量とが、様々な銀河について、何桁にもわたって比例関係を示すことが知られており（例えば Ferrarese & Merritt 2000）、これは、銀河と中心のブラックホールの形成・進化過程が密接に関連していることを示している。つまり、2つの間の相互作用は宇宙の進化を担ってきたかもしれないのである。

(2) 中心部 100 pc の構造と「統一モデル」

こうした中心部の構造を理解するには、高い空間分解能で直接撮像を行うことが欠かせない。また、

AGN は電波から X 線まで、実に幅広い波長域にわたって電磁波を放出しているが、最もエネルギー放出量が多い波長域が紫外／可視領域である。可視光観測では、通常の地上観測の場合、地球大気のために良くても空間分解能は 1 秒角程度が限界である。1 秒角は、近傍の銀河で数百光年、約 100 パーセク (pc; 1 pc ~ 3 光年) にあたる。従って、通常の地上可視観測では、物理的大きさにして、これ以下のスケールは空間分解できないことになる。

これを大きく変えたのが、1990 年代に運用が開始されたハッブル宇宙望遠鏡 (Hubble Space Telescope; HST) であった。大気圏外にあり、回折限界まで空間分解能が出せ、可視域では 0.05 秒角を達成する。これによって、AGN 100pc スケールの構造が分解された。結果は、いわゆる「AGN の統一モデル」(Antonucci & Miller, 1985; Antonucci, 1993) と呼ばれるものが予想する通りであった。1980 年代後半に提唱されたこの統一モデルによると、中心核を赤道方向に隠す何かトーラス状のものがあって、中心核からの光は極方向には円錐状に漏れ出ていると考えられる。AGN は、そのスペクトルから、強い連続光及び幅の広い輝線が観測される 1 型と、幅の狭い輝線だけが観測される 2 型に分類される —— 統一モデルによれば、トーラスを極方向から見れば中心核が直接見えるので、これが 1 型 AGN にあたり、赤道方向から見ると中心核が隠されてしまうので、これが 2 型 AGN にあたる。つまり、1 型と 2 型は同じもので、見る角度だけが異なる、と考えるのである。HST で 2 型 AGN の中心部 100pc を分解すると、予想されていたように、円錐状に光が漏れ出ている構造が見えたのである (Macchetto et al. 1994; 図 1 a 参照)。

(3) 中心核付近の運動状態

一方で、ガスの運動状態を調べるには分光が必要である。天体からの輻射を分光してスペクトルを取得するためには、通常、輻射を長いスリットに通して、スリットと垂直な方向に光を分散させる。2 次的に広がった領域全体にわたってスペクトルが欲しい場合、このような通常の長いスリットしかなければ、スリットをその幅分だけずらしながら長時間かけて何度も繰り返し分光データを取得することになる (ここではこれをマルチスリットデータと呼ぶことにする)。地上観測では、こうしている間に大気に変化してしまっ、均質なデータが取れないのだが、HST による観測では地球大気は関係ないので均質なマルチスリットデータの取得が可能である。2000 年代初頭あたりから、HST で AGN に対してこうしたデータが取られ、高空間分解能の分光データが 2 次的に広がった領域全体にわたって取られることになった (例えば Crenshaw & Kraemer 2000; Cecil et al. 2002)。そこで見てきたのが、各視線方向に大雑把には速度成分が 2 つあることが多く、さらに奇妙にもその速度と中心核からの距離、正確には視線速度と中心核からの投影距離が比例しているように見える、ということであった。この分光結果と上記の撮像結果から推測されたのは、中空円錐状のアウトフロー構造で、こうした構造モデルを用いると観測結果が大体説明できる、と言われてきた (Crenshaw & Kraemer 2000; Das et al. 2005, 2006)。

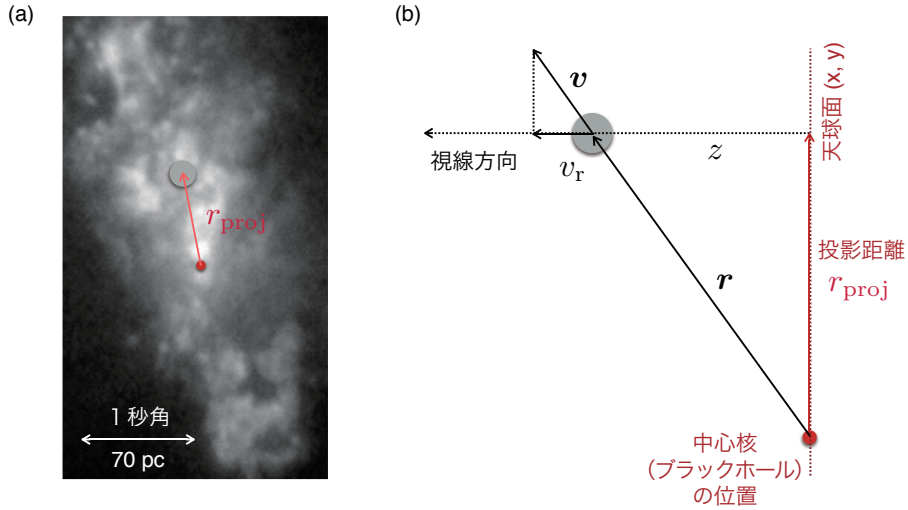


図1: (a) HST による 2 型 AGN NGC1068 の撮像結果 (Macchetto et al. 1994) (b) 3 次元分布再構築における, 一つのガス雲の観測量と他の変数の関係

(4) 3次元構造視覚化解析

その幾何学的構造および速度構造の物理的意味は以下 4 章で述べるが, ここで指摘したいのは, こうした幾何学的構造がモデリングによって示されている, という点である。データから直接に, ではないために, 少なくとも直感的な説得力に欠ける。しかしである。実は, 速度場を仮定すると, 3次元分布が面分光データから直接引き出せる。奥行き方向の構造は, 天文学では通常よくわからないのだが, この場合はデータから直接再構築することができる。筆者は, 大学院生の宮内隆治氏とこうした 3 次元構造解析を行ない, これは宮内氏の修士論文としてまとめられた。さらに, 最近の赤外干渉計観測によって, さらに小さい pc スケールで見えてきた構造とを比較し, AGN トーラスについての一般的な知見, 物理的な理解と合わせて, 詳しい結果を Miyauchi & Kishimoto (2020) にまとめた。以下の章では, これらの結果について短い解説を述べる。

(5) 面分光データ

上記のような, 2 次元的に広がった領域に対して全て分光データがセットで存在しているものを「面分光」データと呼ぶが, ここ数年宇宙物理学の分野では, 可視光における高空間分解能の, いわゆる「面分光装置」あるいは「撮像分光装置」が急速に普及しつつある。長い単一スリットによる観測ではスリットの外側の光は蹴ってしまうので, スリットを動かしながら取るマルチスリットデータは非常に取得効率が悪い。これに対し, 面分光装置では, 無駄なく, ある 2 次元範囲にわたる領域全てのスペクトルを一気に取れる。こうした面分光装置にさらに最近は可視域での補償光学装置を組み合わせ

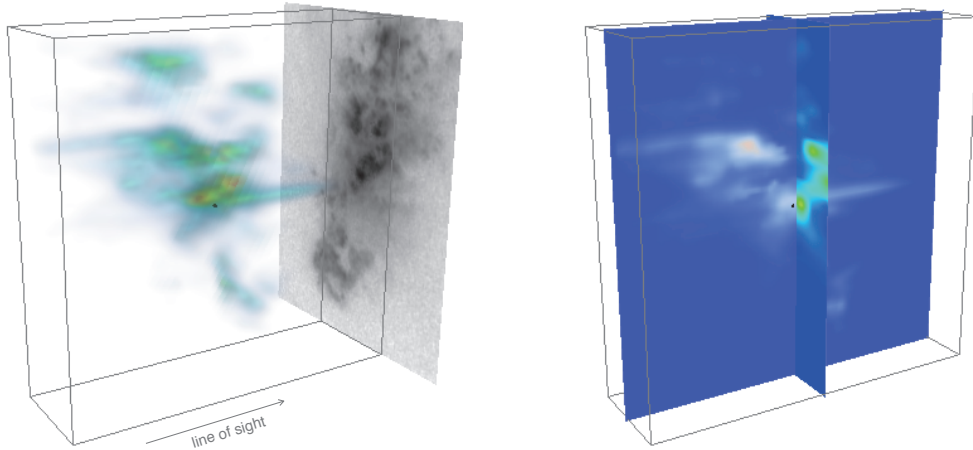
せることができるようになってきたため、こうした可視域の「高空間分解能」「面分光」データが、続々と取られ始めている。従って、以下で述べる3次元構造解析のような、面分光データに関する解析手法の開発は、これからとても重要になってくると思われる。

2 3次元構造の再構築

こうした高空間分解能の面分光で得られる輝線視線速度スペクトル（一つの輝線のスペクトルを、波長ではなく視線速度の関数としたもの）からの、輝線強度3次元分布再構築は、速度場について以下の2つを仮定すれば可能になる（図1参照）。すなわち、(i) 速度場ベクトル v が中心核に対する位置ベクトル r と平行 ($v \parallel r$)、(ii) 速さ v が距離 r のある関数 $v = f(r)$ になっていること、この2つである。ここで、観測から指摘されてきた、また物理的な解釈が可能な（4章参照） $v = kr$ (k はある定数) の場合、つまり、速さ v が中心核からの距離 r に比例する場合を考えると、実に単純に $v_r = kz$ となる。ここで、 v_r は視線速度、 z は天球面からの距離（つまり奥行き方向の位置）である。この場合は、天球面の2次元 + 視線速度 v_r 方向の3次元分布が、定数 k によるスケージング以外はそのまま3次元空間分布となる。定数 k は、私たちの視線方向が特別でないと考えて、天球面上の分布の広がりとお奥行き方向の分布の広がりが同等となるように決めることができる。もちろん不確かさはあるものの、3次元分布の全体的な形は決まってしまう。また、もう少し一般の関数 $f(r)$ を考える場合でも、観測量2つ、すなわち視線速度 v_r と投影距離 r_{proj} （図1参照）から z を逆算して求めればよい。ただし、 $f(r)$ が単調増加／減少でないと解が一意に決まらないが、以下では、（単調増加関数の場合である） $v = kr$ が成り立っていると思われる中心部 100pc 付近のみに対して、3次元分布を求めている。

3 観測データと再構築された3次元分布

図2が、全天で最も明るい2型AGNであるNGC1068のHSTによるマルチスリットデータ（Cecil et al., 2002）に対して、上記の3次元分布再構築を行なった結果である。2次元撮像（つまり通常の撮像：図1a, 図2aのグレースケール画像）から想像されていたとおり、この100pcスケールにおいて、ガスはブラックホールの位置を頂点とする上下2つの円錐状にほぼ分布している。が、さらに、その円錐は中空になっているように見える。つまり、円錐の表面あたりにガスが集中して分布しており、こうした中空円錐状のアウトフローとなっている、ということになる。これは、1章で紹介した、同じデータのモデリングの結果（Das et al., 2006）と一致する。ここで新しいのは、この分布が、データから直接可視化された、ということである。実は、コンピュータ上で、この3次元分布をくるくる回したり、中に入ったりしてリアルタイムに吟味することもできる。この他にも同様のデータは数多くある。現在、これらに対して同様の3次元分布再構築を行なっているところであり、同様の結果が得られつつある。



(a) 電離ガス輝線強度3次元空間分布

(b) 同じ3次元分布を巨大ブラックホールを通る2つの面で切ったもの。

図2: 銀河 NGC1068 の中心にある巨大ブラックホール（中心の黒い点で示されている）の周辺数百 pc に存在する電離ガスからの輝線強度の3次元空間分布（Miyauchi & Kishimoto 2020）。私たちの視線方向（つまり奥行き方向）が矢印で示されており、ハッブル宇宙望遠鏡による高空間分解能2次元画像がグレースケールで視線方向と垂直に示されている。灰色で示されている3次元ボックスのサイズが $84 \times 280 \times 280$ pc である。

4 得られた3次元分布と速度場の物理的解釈

これらの結果はどのようなことを意味するのであろうか。まず、 $v = kr$ という速度場であるが、単純に考えると、あるガス雲が中心核から離れるにしたがって少しずつ加速されることによって、距離に比例する速度をもつことになる、と思いたくなる。しかし、これは非常に実現しにくい状況であるということが知られている (Das et al., 2007)。これに対し、Miyauchi & Kishimoto (2020) では、「中心核付近において過去のある時点で一度にガスが加速され、その後はほぼ等速度運動をしてきた」と考えた方が理解しやすいとした。こうすると、各ガス雲はその速度に比例した距離にあることになり、 $v = kr$ という「速度場」の観測が説明できる。こうした考えは Ozaki (2009) によって以前から指摘されていた。宇宙論でいうところのハッブルフローのようなものである。ただ、そうすると、この過去のある時点で、ある「加速イベント」なるものが起きた、と考えることになる。これが一度だけでないとするれば、これは何か散発的な加速イベント・活動 (episodic acceleration / activity) が起こっていることを示唆する。

一方で、中空の円錐状3次元構造についてはどうだろうか。実は、さらに中心部の 1 pc スケールの赤外干渉計観測からだけでも、中空円錐状の分布が示唆される。というのは、近年の赤外干渉計観測で少しずつ見えてきた pc スケールの「トーラス」は、意外にも赤道方向にではなく極方向に広がっており (Hönig et al., 2012, 2013)、かつ、この輻射体は紫外線に対してやはり光学的に厚いこともわかってきている¹。後者は、この pc スケールの輻射体が、中心核を「隠している」ものであること

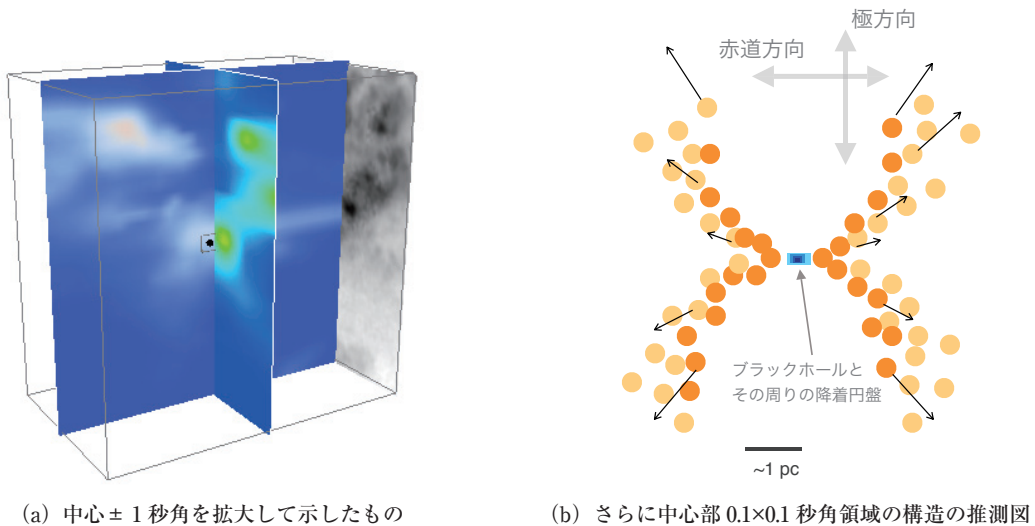


図3: 図2bの中心付近を拡大したものが(a)である。中心の0.1×0.1秒角(〜7×7pc)の領域が黒実線で示されており、この領域の構造を推測したものが(b)である。

を示している。これら2つの条件を満たしつつ、極方向からは中心核が直接見えるようにするには、中心部付近が中空円錐状でかつ湾曲したような形、すなわち図3bのような構造を考えるしかないと思われるのである。

これに対し、100pcスケールの構造が3次元分布再構築で示されたように中空円錐状で、かつアウトフローであることから、(1) そもそもこの構造の中心部方向への延長としてpcスケールでもおそらく中空円錐状の分布をしていると推測され、これは上記の赤外干渉計観測の結果と合致する；(2) すると、中心部pcスケールもアウトフローになっていると推測される。ならば、今までAGNの「トーラス」と呼ばれてきたものは、実は「中心部を隠しつつ、外へと流れるアウトフロー」であった、ということになる。こういった考えは、全く新しいものというわけではなく、Konigl & Kartje(1994) や、近年ではWada (2012) など、以前から理論的に提唱されていた。しかし(1) この分野の大半の研究者は、Nenkova et al. (2008) に代表される、「赤道方向」に分布する「静的」なトーラスを念頭においてきたと考えられ、こうした描像を観測によって直接塗り替えるものである；(2) $v = kr$ という速度関係の解釈から考えると、このトーラスそのものが散発的(episodic)なものであると観測から推測できる——こうした2点がとても新しいと言える。今後、これらの考えをさらに高空間分解能面分光データに基づいて追究していく予定である。

¹ 赤外干渉計観測で測定されたサイズと、輻射フラックスから、輻射体の表面輝度なるものがわかるが、これが、いわゆる黒体輻射の表面輝度の0.2-0.3倍程度になっていることがわかっている(こういった比のことを放射率 emissivity と呼ぶ)。赤外線での放射率がこの程度であることは、この輻射体が、紫外線に対して光学的に厚く、紫外線で直接照らされたものであることを強く示唆する。詳しくは Miyauchi & Kishimoto, 2020, section 5.4 を参照。

引用文献

- Antonucci, R. 1993, ARA&A, 31, 473, doi: 10.1146/annurev.aa.31.090193.002353
- Antonucci, R. R. J., & Miller, J. S. 1985, ApJ, 297, 621, doi: 10.1086/163559
- Cecil, G., Dopita, M. A., Groves, B., et al. 2002, ApJ, 568, 627, doi: 10.1086/338950
- Crenshaw, D. M., & Kraemer, S. B. 2000, ApJ, 532, L101, doi: 10.1086/312581
- Das, V., Crenshaw, D. M., & Kraemer, S. B. 2007, ApJ, 656, 699, doi: 10.1086/510580
- Das, V., Crenshaw, D. M., Kraemer, S. B., & Deo, R. P. 2006, AJ, 132, 620, doi: 10.1086/504899
- Das, V., Crenshaw, D. M., Hutchings, J. B., et al. 2005, AJ, 130, 945, doi: 10.1086/432255
- Ferrarese, L., & Merritt, D. 2000, ApJ, 539, L9, doi: 10.1086/312838
- Hönig, S. F., Kishimoto, M., Antonucci, R., et al. 2012, ApJ, 755, 149, doi: 10.1088/0004-637X/755/2/149
- Hönig, S. F., Kishimoto, M., Tristram, K. R. W., et al. 2013, ApJ, 771, 87, doi: 10.1088/0004-637X/771/2/87
- Konigl, A., & Kartje, J. F. 1994, ApJ, 434, 446, doi: 10.1086/174746
- Macchetto, F., Capetti, A., Sparks, W. B., Axon, D. J., & Boksenberg, A. 1994, ApJ, 435, L15, doi: 10.1086/187583
- Miyauchi, R., & Kishimoto, M. 2020, ApJ, submitted
- Nenkova, M., Sirocky, M. M., Ivezić, Ž., & Elitzur, M. 2008, ApJ, 685, 147, doi: 10.1086/590482
- Ozaki, S. 2009, PASJ, 61, 259, doi: 10.1093/pasj/61.2.259
- Wada, K. 2012, ApJ, 758, 66, doi: 10.1088/0004-637X/758/1/66

Supermassive black holes at the center of galaxies: three-dimensional structure at a few hundred light-year scale

Makoto KISHIMOTO

Abstract

Almost every galaxy is believed to have a supermassive black hole at its central region. When the black hole accretes surrounding gas, the system also ejects some mass, which subsequently affects the evolution of the host galaxy. The resulting three-dimensional structure around such a black hole can actually be reconstructed directly from high-spatial-resolution integral-field spectroscopic data, which have been becoming available over recent years in Astrophysics, at a few hundred light-year scale. We describe the physical picture emerging from such three-dimensional analyses.

keywords : supermassive black hole, active galactic nuclei, integral field spectroscopy, 3D structure, infrared interferometry