『天文教育』誌

ブラックホールの重さ 2:超巨大ブラックホール

福江 純 (大阪教育大学)

宇宙のはるか彼方にある天体の重さはどうやって測るのだろうか? 究極の天体ブラックホ ールを取り上げて、天体の重さの測り方を紹介したい。

ブラックホールは遠くにあるので直接調べることができないし、かりにできたとしても、重 すぎて秤に乗せることができないだろう。逆に、ブラックホールが重いという性質を利用する ことによって、ブラックホールの重さを求めることができる。またブラックホール周辺から放 射される光の性質を分析するなど、いろいろな工夫によって、ブラックホールの質量を求めた り推測することが可能だ。

今回は銀河の中心に存在する超巨大ブラックホールについて、その重さの求め方を紹介する。 基本的には超巨大ブラックホール周辺の星やガスの動きを調べて、超巨大ブラックホールの重 さを推定するのだが、その他の方法についても紹介する。

1. 活動銀河と超巨大ブラックホール

通常の銀河に比べて、中心核が非常に明る かったり、強い電波やX線を出していたり、 数十日とか1年のタイムスケールで明るさが 変動したり、ジェットなどの特異な構造を示 していたり、その他、中心核などがきわめて 活発な活動をしている一群の銀河を「活動銀 河(active galaxy)」と呼んでいる(図1)。ま た活動銀河の活動はしばしば銀河の中心核で 生じているので、その場所までローカライズ するときには、「活動銀河(中心)核(active galactic nuclei)」あるいは略して AGN と呼ぶこ とも多い。



図 1 活動銀河中心領域の模式図。スケール は合っていない。

活動銀河には、その活動の観測的特徴から、 セイファート銀河、スターバースト銀河、低 光度活動銀河核 LLAGN、低電離中心核放射 領域 LINER、電波銀河、クェーサー、ブレー ザーなど、さまざまなタイプがある。I型・II 型や広輝線・狭輝線などのサブタイプもあ る。これらは、あくまでも観測のある側面を 表す分類であり、お互いに独立ではなく、し ばしば重なり合っている。

活動銀河の中心には、典型的には、太陽の1 億倍もの質量をもち胴回りが火星軌道くらい もある「超巨大ブラックホール・超大質量ブ ラックホール (supermassive black hole)」が鎮座 しており、そのまわりに、半径が数光年にも およぶ降着円盤が渦巻いていて、ブラックホ ールの重力場と、その中で光り輝く降着円盤 ガスが、活動性の源泉であると信じられてい る。またブラックホール近傍(降着円盤の最 内域)からは、しばしば亜光速のジェットが 噴出しており、一方、降着円盤の最外縁には 冷たいガストーラスがあって、これらが活動 銀河の見かけの多様性をもたらしていると思 われている(後の図24も参照)。

2. クェーサーの発見

第2次世界大戦後、電波天文学が発達する のと共に、天空を組織的に調べて、電波源の カタログを作成する作業が開始された。たと えばイギリスのケンブリッジ大学からは、 1959年に、3Cカタログすなわち『第3ケン ブリッジ電波源カタログ』が発表された。3C カタログでは、天球上で赤緯-25°から+70 。の範囲で、周波数159MHzで電波強度8Jy(ジ ャンスキー)以上の天体が、471個リストア ップされている。観測家はこれらのカタログ をもとにして、光で見える天体との同定作業 を行っていくのだ。

そして 1960 年、アメリカのマシューズ (T. A. Matthews) とサンデージ (A. R. Sandage) は、 パロマー山天文台の 5m 反射鏡を使って、3C カタログの第 48 番目の登録天体 3C48 の位置 を調べたとき、そこに 16 等級の"星"があ ることを突き止めた。この"星"は、普通の 星に比べて非常に青く、明るさが急激に変動 するし、尋常ではなかった。早速、グリーン スタイン(Greenstein)によって、3C48のスペク トルが取られたが、それは従来の星のスペク トルとはまったく異質なものだった。すなわ ちスペクトルにはいくつかの幅の広い輝線が 存在していたのだが、そのような輝線は、い ままで他の星ではまったく見られたことのな いものだったのだ。しかし、あくまで 3C48 が特別なタイプの星だと考えたグリーンスタ インは、それらの輝線が重元素によって形成 されたものだと結論づけてしまった。

やがて 1962 年、別の強い電波源 3C273 が、 ハザード (C. Hazard) らによって、やはり 13 等級の"星"に同定された(図 2)。そして 1962 年も押し詰まった 12 月、カリフォルニア工 科大学のシュミット (Maarten Schmidt) が、こ の"星"のスペクトルを撮影した。

3C273 のスペクトルにもやはり不可思議な 輝線が何本か見つかった。そして 1963 年の 2 月になってシュミットは、これらの輝線が、 水素の出すバルマー線と呼ばれる輝線である ことに気づいたのだ。ただし、3C273 のスペ クトル線は、普通の位置から 16 % も赤い方 にずれていたために簡単にわからなかったの である。このこと、すなわち 3C273 が 0.158 もの赤方偏移をもっていることを,そのまま 受け入れれば、3C273 は、光速の 16 % もの速 度で遠ざかっている、約 25 億光年も彼方の 天体だということになる。

時を置かず、最初に発見された 3C48 も、 同様な天体であることがわかった。3C48 に いたっては、0.367 もの赤方偏移をもってい たのだ。3C48 を銀河系内の星と同定したグ リーンスタインは、シュミットの発見を聞い て天を仰いだそうだ。

クェーサーの発見だった!



図 2 クェーサー3C273(AURA/NOAO/NSF)。 右下に向けて細いジェットも写っているが、 他の点では星と同じようにみえる。

3C273 や 3C48 のように、光で見ると星のよ うな点状の天体として見えるが、スペクトル には強い輝線が存在し、しかもそのスペクト ル線が非常に大きな赤方偏移を示す天体を, 今日では、「クェーサー (quasar)」と呼んで いる。発見当初は、星のような見かけから、 準恒星状天体 QSO (quasi-stellar object) と呼ば れたこともあるが、星とは似ても似つかぬ実 体から、1964 年に、中国系アメリカ人のチュ - (Hong-Yee Chiu) が、quasi-stellar objectを約めて quasar とした。

大問題は、クェーサーが明るすぎることだ った。たとえば 3C273 の場合、3C273 の見か けの明るさ (13 等級) と赤方偏移から見積 った 3C273 までの距離(約 25 億光年)から、 3C273 の放出しているエネルギーを計算する と、毎秒 10⁴⁰J ぐらいになる。一方、普通の 銀河から放出されているエネルギーは、毎秒 10³⁸J 程度にすぎない。すなわち 3C273 は普通 の銀河より 100 倍も明るいのだ。しかもクェ ーサーはこのような莫大なエネルギーを、ほ んの 1 光年程度のきわめて狭い領域から放射 している。

1963 年に発見されて以来、クェーサーのエ ネルギー源は大きな謎だった。それを解決し たのが、1969 年にイギリス、ケンブリッジ大 学のドナルド・リンデン=ベル (Donald Lynden-Bell) が提唱した、超大質量ブラック ホールと、そのまわりの降着円盤というモデ ルなのである。

今日では、クェーサーは活動銀河の一種で あり、非常に遠方の活動的な銀河の中心核が きわめて明るく輝いているものだと考えられ ている(図3)。



図 3 ハッブル宇宙望遠鏡が撮像したクェー サー3C273 (NASA/STScI)。中心核があまり に明るすぎて普通の撮像(左側)ではよくわ からないが、中心部を隠してみると(右側)、 3C273の母銀河が写っているのがわかる。

クェーサーの発見以前から、中心核が明る くガスが激しく運動しているセイファート銀 河や、強い電波を放射している電波銀河など は知られており、クェーサーの発見以降も、 さまざまなタイプの活動性が発見されて、活 動銀河という総称が生まれ、活動銀河中心の 超巨大ブラックホール+降着円盤という描像 が確立した。そして現在では、現時点で活動 性を示していないものも含め、**銀河の中心に はしばしば巨大なブラックホールが在在して いる**と推測されている。

3. 銀河系中心いて座A*

われわれにとって、もっとも身近な銀河の 中心と言えば、われわれ自身の天の川銀河の 中心-「銀河系中心(The Galactic Center)」で ある(図4)。



図4 近赤外で見た銀河系中心 (NASA)。

われわれの銀河系の中心は、いて座の方向 (赤経 17h46m,赤緯-28° 56′)にある、 「いて座 A*(Sagitarius A star)」と呼ばれる強 い電波源で、太陽系から銀河系中心までの距 離は約 2 万 8000 光年と見積もられている。

銀河系の中心は、系外の銀河に比べればは るかに近いが、銀河系内に存在して光を遮っ ている塵のベールのため、観測するのが非常 に難しい。星間塵をスリ抜ける、電波や赤外 線、X線、γ線などの観測によって、銀河系 中心部に探りが入れられ始めたのは比較的最 近のことである。

銀河系内の星や星団の分布や運動の解析な どから、銀河系中心の位置はおおよそ推定さ れていたが、第2次世界大戦後、電波天文学

が開幕してすぐに、いて座の方向から強い電 波がきていることがわかり銀河系中心が発見 された。そして、いて座 (Sgr) でもっとも強 い電波源という意味で、いて座A電波源(Sgr A) と名づけられた。その後、電波望遠鏡の 分解能の向上によって、10光年程度の広が りをもったいて座 Aは、数光年程度の大き さのいて座 A ウェスト(真の銀河系中心) とそのそばのいて座 A イースト (おそらく 銀河系中心近傍の超新星残骸)という、2つ の成分に分解された。さらに分解能が向上し た電波干渉計システムによって、1970年代中 頃に、銀河系中心は非常に小さな電波源と認 定され、星のように小さいという意味で、Sgr A* (スター) と名付けられた (Brown 1982 年)。 また銀河系中心のまわりには、電波アークや ミニスパイラルなどさまざまな電波構造が見 つかっており、非常に活発な活動が生じてい ることが推測されている。

すでに 1970年頃には銀河系の中心にも巨 大なブラックホールが存在するだろうという 指摘がされていたが (Lynden-Bell and Rees 1971 年)、観測的にも 1980年頃には、重い質量源 - 巨大なブラックホールがありそうなことが わかってきた。たとえば、はじめて赤外線で 銀河系中心近傍の星間ガス雲の観測がはじま ったときだ。電離ガス雲に含まれるネオンは 赤外線の領域で輝線を発しているが、この赤 外線輝線スペクトルのドップラー偏移を解析 することによって、電離ガス雲の運動状態が おぼろげにわかりはじめた。そして電離ガス 雲が銀河系中心のまわりを回転運動している らしいことがわかってきたのである。中心か らの距離と回転速度がわかれば、重力と遠心 力が釣り合うという条件から、中心に存在す る質量を見積もることができる。このように して、銀河系の中心には、太陽の 100 万倍か ら 1000 万倍という質量が存在しているらし いことが推測されるようになった。

その後、1980年代から 1990年代にかけて

観測が進展し、電離ガス雲のスペクトル観測、 赤色巨星や漸近巨星肢星(AGB星)のスペ クトル観測、高温ヘリウム巨星の観測、近赤 外スペックル像合成法による星の固有運動の 測定などなどによって、銀河系中心に必要な 質量の値が求められてきた。その例を図5と 図6に示す[1]。



図5 銀河系中心領域に含まれる質量[1]。 横軸はパーセク(3.26光年)単位で表した銀 河系中心からの距離、縦軸はその距離内に含 まれる質量の推定値(太陽質量単位)。黒丸 が観測値で、いくつかの曲線はいろいろなモ デルを表す。

図5は、銀河系中心からのある距離内に含 まれるべき質量を示したもので、横軸がパー セク(3.26光年)単位で表した銀河系中心か らの距離で、縦軸はその距離内に含まれるべ き質量の推定値(太陽質量が単位)である。 黒丸が観測値で、いくつかの曲線はいろいろ なモデルを表している。単純な星団モデル(破 線)や暗い星団モデル(点線)では観測値に フィットすることができず、星団と重い点質 量源のモデル(実線)なら観測値とよくフィ ットする。観測値とフィットさせるために必 要な点質量-すなわち巨大ブラックホールの 質量の値は、

約 260 万太陽質量 と推定された。



図6 銀河系中心近傍の星の分散速度[1]。 横軸はパーセク(3.26光年)単位で表した銀 河系中心からの距離、縦軸はkm/s単位で表し た星の分散速度。黒丸が観測値で、滑らかな 曲線はもっともフィットするケプラー曲線。

図6は銀河系中心近傍の星の分散速度を示 したもので、横軸はパーセク(3.26光年)単 位で表した銀河系中心からの距離、縦軸は km/s 単位で表した星の分散速度である。星の 分散速度は、いろいろな方向に運動している 星の速度を均した、ある種の平均量で、分散 速度が大きいことは、星を振り回すための質 量が大きいことを意味する。そして、質量が 中心に集中している場合、距離が小さくなる と(質量は一定でも)重力は強くなるので、 その重力と釣り合うために分散速度も大きく なる。図6は、銀河系中心に近づくほど星の 分散速度が大きくなっていることを表してお り、実際に、銀河系中心に点質量(260万太 陽質量) - 巨大ブラックホールが存在してい ると仮定して得られた曲線が実線である。

ここまでの方法は、主に、多くの星やガス の運動を解析して星の質量を推定するものだ が、銀河系中心を公転する個々の星の固有運 動(さらには軌道運動)が観測されれば、力 学的にはより明確に質量が推定できる。また、 より中心近傍の星やガスの運動が解析できれ ば、中心の質量の推定もさらに詳しくできる ようになる。



図7 銀河系中心Sgr A*のまわりを軌道運動 している星 (http://www.astro.ucla.edu/~ghez/ gc_nat.html)。

たとえば、1995年から、ハワイのマウナケ アのケック 10m 望遠鏡を用いて、銀河系中心 近傍の星の固有運動を測定し始めていたゲッ ツ(A. M. Ghez)たちは、100近くの星の固有 運動を発見して、さらにそのうちの3つの星 は軌道運動していることを突き止めた(図7 ;Ghezら2000年)[2]。すなわち、3つの星 は、一つの重力源-Sgr A*-のまわりを楕円 軌道で公転運動していたのである。中心から の距離は見かけのサイズで0.1秒角程度、実 距離で0.005パーセク(1000天文単位)程度 である。軌道までわかれば、中心の質量を推 定するのは容易である。その結果、ゲッツた ちが推定した銀河系中心の超巨大ブラックホ ールの質量は、

230万から330万太陽質量

となった。

一方で、1990年代前半から、チリにあるヨ ーロッパ南半球天文台 ESO の NTT 望遠鏡や VLT 望遠鏡を用いて、やはり銀河系中心近傍 の星の固有運動を測定していたゲンツェル (R. Genzel) とエカルト(A. Eckart) たちは、S2 と名付けられた星の長期間にわたる測定結果 を発表した(図8; Schodel ら 2002年)[3]。
彼らの得たデータは、11年にわたる軌道全 体の3分の2にもおよぶもので、精度は格段 に上がった。具体的には、S2星の軌道要素 は、表1のようになった。さらに S2星の運 動から推定された銀河系中心の超巨大ブラッ クホールの質量は、

370 万太陽質量(± 150 万太陽質量) となった。

長軸 0.119 秒角~ 1000 天文単位



図8銀河系中心Sgr A*のまわりを軌道運動し ている星S2 (http://burro.astr.cwru.edu/ Academics/ Astr222/ Galaxy/Center/ sagastar.html)。

■問1 図6のグラフの観測値(7カ所)か ら距離と速度のデータを読み取り、ケプラー の法則を当てはめて、質量を求めよ。7カ所 について求めて平均して、銀河系中心の巨大 ブラックホールの質量を推定せよ。なお、速 度分散に対しても、ケプラーの法則はだいた い成り立つ。 ■問2 いて座 A*のまわりを回る S2 星の軌 道要素から、銀河系中心の巨大ブラックホー ルの質量を推定せよ。

4. 星の分布と運動による方法

銀河系中心の巨大ブラックホールの重さに ついて、この四半世紀の進展を詳説したが、 ここで他のさまざまな銀河の中心に目を向け よう。多くの銀河の中心に存在するブラック ホールの重さは、どのようにして求められる のだろうか。より正確に言えば、いろいろな 手法によって、**銀河の中心には巨太な質量が 存在していることが観測的に立証されて、そ** れらが超巨太ブラックホールだと信じられる ようになったのだ。

4.1.恒星分布の異常

話はふたたび四半世紀前に遡る。そもそも 銀河の中心に存在する超巨大・超大質量ブラ ックホールに関して、最初の観測的証拠(兆 候)が発見されたのは、1970年代末期のこと である。巨大楕円銀河 M87(図9)の中心で、 恒星分布の異常が発見されたのだ。



図 9 巨大楕円銀河M87/NGC4486/電波銀河 おとめ座A(大阪教育大学)。

巨大楕円銀河 M87 (NGC4486) は、銀河系の 10 倍程度、約1 兆個の星がボール状に集まった銀河で、強い電波も放射しているため

に、電波銀河おとめ座 A という別名ももっ ている。大阪教育大学の 51cm という中口径 望遠鏡でも、光の矢-ジェットが見て取れる (図 9 の右上方向;後のハッブル宇宙望遠鏡 の画像も参照)。1970 年代末、CCD がようや く使われ始めたころ、カリフォルニア工科大 学のヤングたちが、パロマ天文台の望遠鏡を 用いて、この M87 銀河中心近傍の明るさの 分布が詳しく調べた (図 1 0 ; Young 他 1978 年、Sargent 他 1978 年) [4][5]。



図 1 0 Vバンドの光度プロファイル[4]。 上はM87のもので、下は典型的な楕円銀河NGC 4636のもの。右列は点源のプロファイル。

図10は「光度プロファイル」と呼ばれる 銀河の明るさ分布図で、図の横軸は、銀河の 中心を通る直線に沿って測った距離で、縦軸 は、銀河の表面の明るさを表している。上の 図は巨大楕円銀河 M87 のもので、下の図は 典型的な楕円銀河 NGC4636 のものである。

上の M87 と下の NGC4636 の光度プロファ イルを比べると明らかなように、M87 の明る さ分布には中心に異常に尖ったスパイクが存 在している。銀河の光はほとんど星から来て いるから、光度プロファイルで見ているのは、 大部分は星の光だと考えてよい。したがって、 M87 の光度プロファイルのスパイクは、M87 の中心に星が異常に集中していることを示し ていることになる。

ヤングたちは、この異常な光度プロファイ ルをモデルでフィットしてみた(図11)。 図11の横軸は、M87銀河中心からの距離を 角度の秒単位でかつ対数スケールで測ったも ので、縦軸は、M87の表面輝度を平方秒角あ たりの等級を単位として測ったものである。 モデルの曲線と重なってわかりづらいが、図 11のポツポツした点が、観測から得られた 明るさ分布だ。



図11 M87の光度プロファイルを巨大ブラ ックホールモデルでフィットしたもの[4]。

ヤングたちはまず、標準的なキングモデル と呼ばれる球状の恒星集団モデルと、中心の 明るい点源を仮定して、観測データをフィッ トしてみたが、どうしてもうまく合わせられ ない。そこで、中心に非常に重いブラックホ ールを置いて、そのブラックホールの重力に よって変形を受けた恒星の分布に変えると、 図11のように、非常にうまくフィットでき ることがわかったのだ。図110下側の曲線 が変形を受けたキングモデルで、中心部の盛 り上がりの部分は、点源の部分である。

彼らが得た、M87 光度プロファイルの観測 値にもっともフィットするブラックホールの 質量は、

26 億 ± 5 億 太 陽 質 量

となったのだ。

これが超巨大ブラックホールの最初の推定 値である。ただし、後の研究では、恒星集団 が球状でなければ、超巨大ブラックホールを 仮定しなくても光度プロファイルを説明でき ることがわかったために、この最初の推定は 確実な決め手とはならなかった。

4.2.恒星運動の異常

超巨大ブラックホールの存在は、銀河中心 部の恒星分布を歪めるだけではない。恒星運 動に対しても多大な影響を与える。



図 1 2 アンドロメダ銀河M31/NGC221と伴 銀河M32 (大阪教育大学)。

もし銀河の中心に巨大なブラックホールが なければ、星の運動は中心部でとくに激しく なったりすることはない。しかし、中心に巨 大なブラックホールが存在すると、ブラック ホールの強い重力によって、星の運動は中心 付近ほど激しくかき乱されることになる(銀 河系中心でもそうだったように)。1980年代 に入って、このような恒星運動の異常が見つ かり始めた。最初は距離が近いために観測し やすい銀河、アンドロメダ銀河とその伴銀河 で発見された(図12)。

まずカリフォルニア工科大学・パロマ天文 台のトンリーが、5 mヘール望遠鏡を用いて、 アンドロメダ銀河 M31 の伴銀河 M32 につい て、中心部の恒星運動を詳しく観測した(図 13; Tonry 1984年)[6]。説明は次の図14 でするが、彼が M32 の中心に存在すると推 定した巨大ブラックホールの重さは、

500 万太陽質量

であった(後の観測で 200 万太陽質量ぐらい に修正される)。



図13 伴銀河M32中心部の恒星運動[6]。上 は赤方偏移で測った星の回転運動を表す曲線 で、下は星の分散運動を表す曲線。

つづいて、ドミニオン天文台のコルメンディが、カナダ・フランス・ハワイ望遠鏡を用いて、アンドロメダ銀河 M31 中心部の恒星
運動を詳しく観測した(図14; Kormendy 1988年)[7]。

図14の横軸は、M31銀河の長軸に沿って 中心からの距離を角度の秒で測ったもので、 一目盛りが5秒角、実距離にして52光年ほ どになる。縦軸は、上が「速度分散(velocity dispersion)」と呼ばれる量で、星の分散運動 の激しさを表すもので、下が「回転曲線 (rotation curve)」と呼ばれる量で、星の回転 運動の速度を表し、共に km/s を単位として いる。

上の速度分散のデータを見ると、M31 銀河 の中心部で、急激に速度分散が増加している ことがわかる。これは、いろいろな方向の星 の運動が異常に激しくなっていることを意味 している。すなわち、M31 銀河の中心部には、 星の運動を激しくかき乱す重力源が存在して いるのだ。



図14 アンドロメダ銀河M31中心部の恒星 運動[7]。上は星の分散運動を表す曲線、下 は星の回転運動を表す曲線。

下の回転曲線のデータはもっと劇的であ る。回転曲線の図で、回転速度が中心の左側 で負、右側で正になっているのは、銀河が反 時計回りに回転していて、左側では近づく向 きに、右側では遠ざかる向きに回っているこ とを表している。M31銀河では、その回転曲 線が、中心部で急激に大きくなっている。こ れは、M31 銀河の中心には巨大なブラックホ ールが存在していて、中心に近づくとブラッ クホールの重力が支配的になり、中心に近づ けば近づくほど重力が強くなるので、その重 力と釣り合うために回転速度も大きくなった 結果なのだ(銀河系中心でも同じであったよ うに)。

これらの恒星運動のようすから、M31の中 心に存在すると推定した巨大ブラックホール の重さは、

1000万太陽質量

であった(後の観測で 3000 万太陽質量ぐらいに修正される)。

以上のような恒星運動の解析によって、現 在では、数十個もの超巨大ブラックホールの 質量が推定されている[11][12]。

■問3 図14の下の回転曲線のグラフから、回転速度が急激に増加している中心近傍での距離と速度の関係を読み取り、ケプラーの法則を当てはめて、M31銀河の中心の超巨大ブラックホールの質量を推定せよ。

5. 回転ガス円盤の運動による方法

1990 年代に入ると、銀河系中心でもそうだ ったが、観測技術の進展によって、活動銀河 中心の超巨大ブラックホールについても確実 な証拠がつぎつぎと得られるようになった。 そしてまた、**超巨大ブラックホールのまわり** を回転するガスの回転運動も観測され始めた のだ。

5.1. 巨大楕円銀河M87の回転ガス円盤

すでに述べたように、巨大楕円銀河 M87 (NGC4486)の中心に、太陽の 30 億倍程度の 超巨大ブラックホールが存在しているらしい ことは、恒星分布の異常集中からすでに推測 されていた。1990 年代前半、ハッブル宇宙望 遠鏡の観測チームは、この M87 銀河の中心 部を詳細に観測し、プラズマガスの円盤と、 その円盤の回転運動を検出したのである(図 15,図16;Ford他1994年、Harms他1994 年)[8][9]。

まず、ジョン・ホプキンス大学&宇宙望遠 鏡研究所のフォードたちは、サービスミッシ ョンによって新しく取り替えられた広視野惑 星カメラ2 WFPC2 (Wide Field Planetary Camera 2) で狭帯域の画像を得た(図15; Ford他 1994 年) [8]。図15は、水素のHα輝線近傍だ けの光で撮像した M87 銀河中心近傍の画像 で、中心に集中する無数の星の光は大部分が カットされ、主に電離した水素ガスが写って いると考えていい。図の右上には中心から吹 き出すジェットがくっきりと写っており、左 上の拡大画像にはガス円盤が浮き彫りになっ た。ジェットの存在は知られていたが、活動 銀河中心核におけるガス円盤の検出は、M87 銀河だけでなく他の場合も含めて、この観測 が初めてである。



図15 ハッブル宇宙望遠鏡で撮像した巨大 楕円銀河M87/NGC4486中心部の回転ガス円盤 (NASA/STScI) [8]。電離水素ガスの放射す る光で観測すると、ジェットとガス円盤が浮 き彫りになった。

ガス円盤は渦状構造をしており、円盤ガス が中心に向けて吸い込まれているように見え る。また円盤は少し潰れて見えていて、もし 本来の円盤が真円に近い形をしているなら、 円盤の真上から 42°の方向から円盤を見て いることになる。さらにジェットは、円盤の 見かけの短軸方向から約 20°の方向に位置 しているが、傾きによる射影効果を考慮する と、ジェットは円盤面から垂直に吹き出して いると考えて差し支えない。たった一枚の画 像からさまざまなことがわかってきた。









図16 巨大楕円銀河M87/NGC4486中心部の 回転ガス円盤 (NASA/STScI) [9]。円盤上の 2カ所からやってくる光が、回転運動に伴う ドップラー効果によって、波長が偏移してい る。

さらに同じ観測ミッションで、応用研究所 のハームズたちは、ハッブル宇宙望遠鏡搭載 の微光天体分光器 FOS (Faint Ojbect Spectrograph) を用い、ガス円盤上の2カ所の光を分光観測 した(図16; Harms他 1994年)[9]。すな わち、円盤の中心を通って、ジェットの方向 に垂直な方向の線上で、中心からの角距離(角 度で表した見かけの距離)が、それぞれ、

0.25 秒角

の2カ所から来る光を分光観測すると、片側 のガスは見かけの視線速度が、

500 ± 50 km/s

で近づいてきており、もう片側は同じ速度で 遠ざかっていることがわかったのだ。ガスの 落下運動や噴出運動という可能性も皆無では ないが、ジェットとの位置関係などから、こ の速度は円盤ガスの回転運動に伴うものだと 解釈するのがもっとも自然である。

以上が基本的な観測事実で、後は、その単純な解析である。まず、M87銀河までの距離は、約5000万光年(15Mpc)なので、角度で0.25秒角ということは、中心からの実距離は、

60 光 年

に相当する。さらに円盤を真上から 42° 傾いた方向から観測していることを考慮すると、視線速度が 500km/s ということは、円盤ガスの実際の回転速度が、

750km/s

であることを意味する。これら二つの量から 中心の質量を見積もることは簡単で、

24 億 ± 7 億 太 陽 質 量

という値が得られた。

この値は、20年も前の恒星分布異常から 見積もられた値と同じぐらいなので、一見、 新味がなさそうだが、むしろ逆で、この場合 は、同じ値が出たことが非常に重要なのだ。 すなわち、恒星分布異常と回転ガス円盤とい うまったく独立な観測によって、ほぼ同じ値 が出てきたことは、中心の"光で見えない" 天体の質量、すなわち超巨大ブラックホール の存在がますます確実になったことを意味し ているのである。また恒星分布による推定は モデルへの依存性もあって信頼性が十分でな かっただけに、回転ガス円盤の観測は、超巨 大ブラックホールの存在に対して、非常に強 力な証拠になったのである。

ガス運動の解析によって、十いくつもの銀 河の中心で超巨大ブラックホールの質量が推 定されている[11][12]。

■問4 M87 銀河の観測量の解析をトレース し、ケプラーの法則を当てはめて、超巨大ブ ラックホールの質量を求めよ。

5. 2. メガメーザーM106の回転ガス円盤

また 1990 年代中頃に注目を浴びたのが、 M106 と呼ばれる銀河中心における回転ガス 円盤の発見と、それから推定された M106 中 心の超巨大ブラックホールの存在である(三 好他 1995 年)[10]。

件の銀河 M106 (NGC4258) は、Sbc 型の渦 状銀河で、若干の活動性は示すものの、たい して激しく活動していない目立たないタイプ の活動銀河で、「低光度活動銀河核 LLAGN (low-luminosity active galactic nuclei)」の一種だ (図17)。ところが、水分子のメーザー放 射(電波領域で起こるレーザー放射の一種) ー水メーザーが非常に強いことがわかり、現 在では、「メガメーザー (megamaser)」など と呼ばれることもある。



図 1 7 メガメーザーM106/NGC4258(大阪 教育大学)。

この M106 銀河は、可視光の写真(図17) ではただの渦状銀河に見えるが、水素の H α輝線やシンクロトロン放射や X線などで 見ると、通常の渦状腕以外に、もう一対の腕 が存在するのだ(図18)。この異常な腕は、 M106銀河の中心から銀河円盤内に放出され たジェットが銀河面内のガスと相互作用して できたものではないかと想像されている。



図18 水素のHα輝線で撮像したメガメー ザーM106/NGC4258 (http:// www.nrao.edu/ imagegallery/ php; NRAO/AUI and Gerald Cecil and Holland Ford)。

国立天文台の三好らは、アメリカ国立電波 天文台の超長基線電波望遠鏡 VLBA(Very Long Baseline Array)を用いて、M106銀河中心 部から放射される水分子のメーザー放射を観 測した。そして、中心を挟む左右方向で、銀 河中心からの 0.005 秒角から 0.008 秒角という 非常に中心近傍からやってくるメーザー放射 の観測に成功し、さらにそれらの放射が系統 的にドップラー偏移していることを検出した のである(図19)。すなわち、M106銀河の 中心に近いほど、水メーザー輝線の偏移は大 きく、したがって対応する回転速度も大きい ことがわかったのだ。

具体的な回転速度の曲線は、実測される見 かけの角距離を単位にすると、

 $V(r) = 2180 (r / 0".001)^{-1/2} \text{ km/s}$

のようになり、M106銀河までの距離(約2500 万光年)を用いて、実距離に変換すると、

 $V(r) = (832 \pm 2) [r/(0.25 \text{ pc})]^{-1/2} \text{ km/s}$ のようになる。この関係から、M106 銀河中心の超巨大ブラックホールの質量を求めることは簡単で、

3600万太陽質量

という値になった。なお、その後の追観測な どで、より精度が上がったものとして、

3900 万± 100 万太陽質量

という値が得られている。



図19 水メーザー輝線のドップラー偏移か ら得られたメガメーザーM106の回転ガス円盤 の回転曲線[10]。

巨大楕円銀河 M87 の場合は、ガス円盤上 の2カ所だけの観測であり、回転運動は仮定 するしかなかったのだが、メガメーザー M106 では、何カ所もの観測点が得られて、それら がきれいなケプラー回転曲線に乗ったことか ら、質量源が点状であること、すなわちブラ ックホールである信憑性がますます高まった のである。

以上まで述べてきた例について、表2にま とめておく[11][12]。

■問5 M106 について、得られた関係式に ケプラーの法則を適用して、中心の超巨大ブ ラックホールの質量を求めよ。

6. 降着円盤の光度とスペクトルによる方法

ここまで述べてきたような、星の運動やガ スの運動を検出してケプラーの法則を適用す る方法、いわゆる力学的な方法は、連星系の 場合でも使われていたが、信頼性も正確度も 高い。しかし、中心からの距離と速度の情報 が必要なので、中心からの距離が測定できる 比較的近くの銀河しか使えない。中心部分の 分解できない遠方の銀河でも使える方法とし ては、より間接的な方法だが、超巨大ブラッ クホール周辺の光輝くプラズマガスー通常は 降着円盤を念頭に置く一の放射光度とスペク トルが利用されてきた[13]。

6. 1. エディントン光度

まず、超巨大ブラックホールの重さの下限 しか得られないが、天体の上限光度であるエ ディントン光度を用いる方法がある。

ブラックホール周辺のガス(降着円盤)が 光り輝くのは、ブラックホールの重力勾配の 中をガスが渦巻きながら落下するときに、ガ スがもっていた位置エネルギーがガス同士の 摩擦を通して放射エネルギーに変換されるた めだ。このとき放射されるガス円盤の全光度 は、一般的には、重力の落差を作るブラック ホールの質量と降ってくるガスの割合(質量 降着率)の積に比例する。

ところで、仮にブラックホールの質量を固 定したまま、降ってくるガスの割合を増やし ていくと、最初のうちはガスの割合に比例し て光度が大きくなっていくが、ガスの割合が 臨界値を超えると光度は頭打ちになることが わかっている(図20)。

光度が頭打ちになる理由は、ある質量に対 して、降ってくるガスの量があまりに多くな りすぎると、光度が大きくなりすぎて放射圧 によってガスが吹き飛んだり、あるいは逆に、 落下してくる多量のガスに放射が閉じ込めら れ、そのままブラックホールに吸い込まれて、 外部へは出てこれなくなるからだ。



図20 降着円盤の光度と質量降着率の関 係。横軸が臨界質量降着率を単位として測っ た質量降着率で、縦軸はエディントン光度を 単位として測った円盤の光度。臨界質量降着 率以下では円盤光度は質量降着率に比例する が、臨界質量降着率を超えると頭打ちになる。

この頭打ちになる光度が、その質量のブラ ックホール周辺のガスが放射できる上限光度 で、「エディントン光度(Eddington luminosity)」 と呼ばれている[13]。ブラックホールの質量 が変わればエディントン光度も変わるが、そ もそもブラックホールの位置エネルギーはブ ラックホールの質量に比例するので、エディ ントン光度もブラックホールの質量に比例す る。具体的には、1億太陽質量を単位として 測った超巨大ブラックホールの質量を *M*^s と 置けば、エディントン光度*L*^sは、

$L_{\rm E} = 1.25 \times 10^{39} M_8 {\rm W}$

= 3.25 兆 M₈ 太陽光度

となる。

そこで、活動銀河中心が十分に明るいケー スで、ブラックホール周辺の光度がすでにエ ディントン光度に達していると仮定できる場 合には、上の関係を逆に利用して、超巨大ブ ラックホールの質量を推定できるわけであ る。そして実際、多くの明るい活動銀河中心 核に対して、この方法でブラックホールの質 量を推測している。ただし、実際にはエディ ントン光度に達していないかも知れないの で、この方法で得られる推定値は、ブラック ホールの重さの下限である。

たとえば、スローンデジタルスカイサーベ イによって、 超遠方のとてつもなく明るい クェーサー SDSS 1044-0125 が発見された[14]。 このクェーサーの赤方偏移は 5.8 もあり、宇 宙が誕生してからほんの 10 億年程度しか経 過していない時代の天体だ。にもかかわらず、 非常に明るく輝いていて、光度は 4.8 × 10⁴⁰ W もあり、何と太陽の 100 兆倍、ふつうの銀河 の 1000 倍も明るい。もしエディントン光度 で輝いたとしたら、太陽の 34 億倍の質量を もった超巨大ブラックホールが必要になる。



図 2 1 スターバースト銀河 M82 / NGC3034 (大阪教育大学)。

この方法で得られた有名な例としては、活 動銀河の中心核ではないが、「超光度 X 線源 ULX (ultra luminous X-ray source)」として発見 されて、「中間質量ブラックホール (intermediate mass black hole)」として知られる ようになった、M82 X-1 がある。2000年、マ サチューセッツ工科大学(当時)の松本浩典 らを中心とした日本人グループが、チャンド ラ X 線衛星を使った X 線観測によって、ス ターバースト銀河 M82 の中心付近に、恒星 ブラックホールと超大質量ブラックホールの 中間的な質量のブラックホールを発見した (松本他 2001年)[15]。

中間質量ブラックホールが発見された銀河 M82 (NGC3034) は、おおぐま座の方向で距 離約 1200 万光年にある不規則銀河で、爆発 的に星形成が起こっている「スターバースト 銀河 (starburst galaxy)」として知られている (図 2 1)。

この M82 銀河の中心領域をチャンドラ X 線衛星で撮像したところ、いくつかの X 線 源が発見された(図22)。小さ目の X 線源 はおそらくは星の死によって生じたタイプの ブラックホールだが、注目すべきは画像右方 の明るい X 線源である。この明るい X 線源 が、こんにち M82 X-1と呼ばれる天体だ。M82 銀河の力学的中心からは、角度で 9 秒角、実 距離にして 170pc (550 光年)離れている。



図22 スターバースト銀河M82の中心領域 のX線画像(http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/ research/xray/press200010/)[15]。小さいX線源 は普通のブラックホール、大きなX線源は新 しく見つかった中間質量のブラックホール。 M87銀河の中心(+印)と中間質量ブラック ホールの距離は約500光年。

この X 線源の明るさの時間変動などから 考えると、この明るい X 線源もまず間違い なくブラックホールである。しかし、X 線の 明るさが他の X 線源に比べて異常に明るい ことが画像からも見て取れるだろう。実際、 観測される X 線強度と M82 銀河までの距離 から、X 線が球対称に放射されていると仮定 して X 線の光度を計算すると、

10^{34} W

にもなる。そして、もし M82 X-1 がエディン トン光度で輝いているとしたら、ブラックホ ールの質量は、

800太陽質量

程度になるのである。この値は、普通のブラ ックホールの質量よりはかなり大きいが、 M87 銀河の中心などに存在する超巨大ブラッ クホールほどの質量はない。そこで、従来知 られていた恒星ブラックホールと超巨大ブラ ックホールの中間程度の質量をもつという意 味で、「中間質量ブラックホール」と呼ばれ るようになったのだ。この中間質量ブラック ホールの質量は、太陽の 1000 倍から 1 万倍 と見積もられている。

■問6■ エディントン光度の方法を用いて、M82 X-1のブラックホールの質量を求めてみよ。

6.2.連続スペクトルの盛り上がり形状

降着円盤から放射されるスペクトルの性質 は、比較的よくわかっている[13]。すなわち、 降着円盤から放射される電磁波のスペクトル は、活動銀河中心核の場合、非常に大ざっぱ に言えば、約 10 万度の温度のガスから放射 される黒体輻射のスペクトルに近いものであ る。ただし、温度などは中心のブラックホー ルの質量と関連しているので、それを利用し てブラックホールの質量を推測することもさ れた。

クェーサーなど活動銀河のスペクトルは、

全体としてはべき乗型スペクトルと呼ばれる ものでよく表されるが、局所的には、しばし ば紫外線の領域で膨らみがあることが知られ ており、「紫外超過」とか「3000 A のバンプ (こぶ)」と呼ばれていた。この部分が降着 円盤の連続放射スペクトルでよく説明できる ことを、1980 年代に、カリフォルニア工科大 学のマルカンが指摘した (Malkan 1983 年) [16]。そしてマルカンは、いろいろなクェー サーに対して、1 億から数十億太陽質量の値 を推測している。

6.3.輝線スペクトルの二重ピーク形状

降着円盤から放射されるのは、連続的な電磁波成分だけではない。水素の輝線や鉄の輝線など、いわゆる線スペクトルも放射される場合がある。そしてそれらの線スペクトルは、降着円盤の回転運動と相対論的な効果のために、しばしば非対称な二重のピークプロファイルをもつことが想像されている[13]。



図23 MCG-6-30-15銀河で観測された鉄輝 線の例 (lheawww.gsfc.nasa.gov/ ~nandra/ htts/ htts_pres.html)。横軸はキロ電子ボルトを単位 とするエネルギーで、縦軸はX線の強さ。時 期によってプロファイルは変化する。

実際、いくつかの活動銀河のスペクトルで は、水素の H α 輝線や鉄輝線なので、非対 称な二重ピークスペクトルが発見された。

たとえば、水素 H α 輝線の二重ピークプ ロファイルとしては、楕円銀河 Arp 102B があ り[17]、鉄輝線の二重ピークプロファイルと しては、MCG-6-30-15 などがある[18](図 2 3)。

輝線の放射率などモデル依存性も大きい が、これらの輝線スペクトルの形状からも、 ブラックホールの質量を推測することが可能 である。

7. 反響図法

やはり超巨大ブラックホール周辺のガスや 降着円盤を利用するものだが、光のエコー効 果にもとづく「反響図法(reverberation mapping)」 と名付けられた方法もある(Blandford and McKee 1982年)[19]。この手法は、マッピン グとついていることからも想像できるよう に、本来は、中心核から発した光が周辺の雲 に反射される様子を調べて、周辺の雲の模様 を再現しようとするものだ。



図24 活動銀河の中心領域(図1も参照)。 超巨大ブラックホールと降着円盤の周辺に は、無数のガス雲が飛び回っている。

活動銀河の中心核には、超巨大ブラックホ ールと光り輝く降着円盤があるだけではな い。その周辺には無数のガス雲が飛び回って いると想像されている(図24)。それらの ガス雲は、中心核(降着円盤)からの高エネ ルギー放射を受けて電離し、その結果、輝線 を放出している。ガス雲から放出される輝線 は、ガス雲の高速運動に伴うドップラー効果 によって、さまざまに波長がずれ、最終的に は、クェーサーやセイファート銀河などで観 測される、幅が広くて強い輝線を形作ってい るのだと考えられている。幅が広い輝線を作 るので、このガス雲の領域は、「広輝線領域 BLR (broad line region)」と呼ばれている。

さて、降着円盤の明るさは常に一定という わけではなく、しばしば変化している。そし て降着円盤の明るさが変化すれば、それに伴 って、ガス雲の電離や輝線放出も影響を受け ることになる。しかも、ガス雲の領域 BLR は、ブラックホールと降着円盤からは少し距 離があるので、降着円盤からガス雲まで光が 届くのに要する時間の分だけ、ガス雲の変化 には若干の遅れが生じることになる。降着円 盤からは連続光が、ガス雲からは輝線が出て くるので、観測によって、どちらから出てき た光かはきちんと区別ができる。実際、観測 的にも、連続光(降着円盤)が明るくなって、 典型的には、数日から数百日後に、輝線(ガ ス雲)に変動が見られる。

これがまさに、降着円盤の光をガス雲がエ コー(こだま)したものだ。そして、その反 響パターンを上手に解析することで、周辺を 飛び回る雲の模様を再現できるのである。そ の手法が「反響図法」と呼ばれている。

たとえば、図25はシミュレーションだが、 無数のガス雲が図25上のような渦状パター ンで分布しているときに、輝線の幅から得ら れるガス雲の速度分布と反応時間の遅れが図 25下のようになることを表している。すな わち、観測から下の図のようなデータ(ある いは違う反応)が得られたなら、それを逆に 解いて、雲の模様は上の図のような(あるい は違う模様)ものであることがわかるのだ。



反響図法の手法では、超巨大ブラックホー ルの質量 *M*は、

 $M = f c \tau \Delta V^2 / G$

で見積もられる。ただしここで、fは1程度 の因子、cは光速、 τ は輝線の応答時間の遅 れ (c τ でガス雲の領域のサイズになる)、 ΔV は輝線の幅(ガス雲の運動速度を表す)、 そしてGは万有引力定数である。

現在はまだ反響図法で求めた超巨大ブラッ クホールの質量推定値には、数十%程度の曖 味さが残るが、精密化が進められている。と くに、銀河中心部が分解できない遠方の銀河 では力学的な手法が使えないので、超巨大ブ ラックホールの質量を求めるためには、反響 図法の有用性がますます高くなるだろう。

8. マゴリアン関係

さまざまな銀河の中心で超巨大ブラックホ ールの質量が見積もられるようになると、統 計的な議論が可能になってきた。この 10 年 ぐらいで集中的に議論されたのが、ブラック ホールの質量と銀河のバルジ(核恒星系)の 物理量との間の相関である。バルジが明るか ったり速度分散が大きかったりするなど、バ ルジの規模が大きいほど、中心の超巨大ブラ ックホールの質量が大きいという関係がある のだ。一言で言えば、銀河のバルジの質量が たきいほど、中心の双貫人



図 2 6 パルジの絶対等級(横軸) v s ブラ ックホール質量(縦軸) [11]。1995年当時の 少ないデータでさえ、バルジが明るいほどブ ラックホールの質量が大きいという相関が見 て取れる。

この相関関係はかなり前から予想されてい て、1995 年の総合報告でも整理されているが (Kormendy and Richstone 1995 年)[11]、その後、 より精密化して再評価した論文(Magorrian 他 1998 年)[20]にちなんで、現在では、"マゴ リアン関係"と呼ばれることも多い。

たとえば、図26は、バルジの絶対等級と 超巨大ブラックホールの質量の相関を表した ものだ。図の横軸が B バンドでのバルジの 絶対等級で、縦軸が太陽質量を単位としたブ ラックホール質量の対数値である [11]。1995 年当時の少ないデータでさえ、バルジの絶対 等級が小さい(明るい)ほど中心の超巨大ブ ラックホールの質量が大きいという、正の相 関が見て取れるだろう。横軸を、バルジの星 の速度分散にしても、同じような相関図が得 られる。

マゴリアン関係による相関関係式は、超巨 大ブラックホールの質量を *M*、バルジの星の 速度分散をσとすると、だいたい、

M = 1億太陽質量 (σ / 200km/s)⁴ ぐらいになる。ただし、係数(1億から1億 5千万ぐらい)や指数(3.5から4.5ぐらい) はデータの種類や解析によってバラツキがあ る。しかし、このような関係が成り立つのな ら、銀河のバルジの明るさや速度分散を観測 するだけで、中心に存在する超巨大ブラック ホールの質量をだいたい見積もることが可能 になるのだ。

また、これも人によってバラツキがあるが、 超巨大ブラックホールとバルジの質量比は、

ブラックホール質量/バルジ質量~ 0.001 程度になりそうだ。

9. ブラックホールシャドウ

最後に最近の面白い研究として、「ブラッ クホールシャドウ (black hole shadow)」につ いて触れておきたい。

ぼく自身、かつて、ブラックホールのまわ りの相対論的な降着円盤がどのように見える か、いわば降着円盤という光る衣を纏ったブ ラックホールのシルエットについて計算した ことがある[21]。そして、そのネタは、もう ホント、あちこちで使ってきた。

しかしドイツのマックスプランク研究所の

ファルケたちによる最近の研究で、降着円盤 でなくても、ブラックホールが光るプラズマ ガスに覆われていれば、そしてそのプラズマ ガスが半透明であれば、明るいプラズマガス を通して、"ブラックホールの影"が見える 可能性があることがわかった(Falcke 他 2000 年)[22]。彼らは、いわば、光る薄絹を纏っ たブラックホールのシルエットを調べたので ある(図27)。



図 2 7 ブラックホールシャドウ(http:// www.mpifr-bonn.mpg.de/ staff/hfalcke/ paper/ bhimage.abs.html)。このシミュレーション例 では、ブラックホールが自転していて、影が 歪んでいる。

しかも、ブラックホールの大きさ(質量) が大きければ大きいほど、影のサイズも大き い。したがって、ブラックホールシャドウが 観測できて、そのサイズが測れれば、ブラッ クホールの重さが直接に求められることにな る。

さらに、ブラックホールが自転していなけ れば影は円形だが、ブラックホールが自転し ていると影の形状も歪む(図27)。したが って、ブラックホールシャドウの形状まで測 定できれば、ブラックホールの自転の程度ま でわかるのである。 ブラックホールシャドウの研究は、ファル ケたちや日本の若手の高橋労太らの研究によ って、詳しい理論的計算が進展している。一 方で、観測的にも、銀河系中心いて座 A*や 巨大楕円銀河 M87 など、いくつかの超巨大 ブラックホールでは、ブラックホールシャド ウの観測が視程に入り始めた。10 年ぐらい のうちには、ブラックホールシャドウの観測 によって、超巨大ブラックホールの重さが求 められるようになるかも知れない。いまから 楽しみである。

福江 純 fukue@cc.osaka-kyoiku.ac.jp

参考文献

- [1] Meria and Falcke 2001, Ann Rev A&Ap 39, 309
- [2] Ghez, A.M. et al. 2000, Nature 407, 349
- [3] Schodel, R. et al. 2002, Nature 419, 694
- [4] Young, P.J. et al. 1978, ApJ 221, 721
- [5] Sargent, W.L.W. et al. 1978, ApJ 221, 731
- [6] Tonry, J.L. 1984, ApJL 283, L27
- [7] Kormendy, J. 1988, ApJ 325, 128
- [8] Ford, H.C. et al. 1994, ApJL 435, L27
- [9] Harms, R.J. et al. 1994, ApJL 435, L35
- [10] Miyoshi M. et al. 1995, Nature 373, 127
- [11] Kormendy, J. and Richstone, D. 1995, Ann Rev A&Ap 27, 581

[12] Kormendy, D. and Gebhardt, K. 2001, Relativistic Astrophysics: 20th Texas Symposium, p363

- [13] Kato, S., Fukue, J., Mineshige, S. 1998, Black-Hole Accretion Disks, Kyoto University Press, Kyoto
- [14] Haiman and Loeb, 2001, ApJ, 552, 459
- [15] Matsumoto H. et al. 2001, ApJL 547, L25
- [16] Malkan, M.A. 1983, ApJ 268, 582
- [17] Chen, K. and Halpern, J.P. 1989, ApJ 344, 115
- [18] Tanaka, Y. et al. 1995, Nature 375, 659
- [19] Blandford, R.D. and McKee, C.F. 1982, ApJ 255,
- 419
- [20] Magorrian, J. et al. 1998, AJ 115, 2285
- [21] Fukue, J. and Yokoyama, T. 1988, PASJ 40, 15
- [22] Falcke, H., Melia, F., Agol, E. 2000, ApJ 528, L13

表 2 超巨大ブラックホールの一覧表

| = = = = = = = = = = = = = = = = = = = | ●■■■■■ | = = = = = = = = = = = = = = = = = = = | "========== 質量 [太陽質量] |
|---------------------------------------|--------|---------------------------------------|--------------------------|
| 銀河系中心いて座 A* | Sbc | 0.0085 = 2 万 3 | 8000 光年 370 万 |
| アンドロメダ銀河 M31 | Sb | 0.7 | 3000 万 |
| アンドロメダ伴銀河 M32 | E | 0.7 | 200 万 |
| レンズ状銀河 NGC3115 | S0 | 8.4 | 10 億 |
| ソンブレロ銀河 NGC4594 | Sa | 9.2 | 5 億 |
| 楕円銀河 NGC3377 | Е | 9.9 | 8000 万 |
| 巨大楕円銀河 M87 | cD | 15.3 | |
| M106/NGC4258 | Sbc | 7.5 | 3900 万 |
| | | | |

文献[11]、[12]にもとづいて作成。ブラックホールの質量は、誤差もあるので、だいたいの目 安である。