



ブラックホールの質量【2】

超巨大ブラックホール（前半）

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（質量）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、仮にできたとしても、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したりすることが可能だ。

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、長くなるので、今回は星などの分布と運動による方法について紹介し、ガス円盤の運動による方法やその他の方法については次回にまわすことにする。

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。

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、クエーサー、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（次回の図24も参照）。

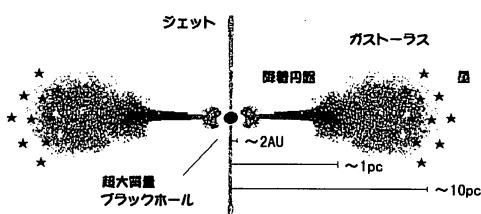


図1 活動銀河中心領域の模式図。正しいスケールで描かれているわけではない。

2. クエーサーの発見

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 $+70^{\circ}$ の範囲で、周波数159MHzで電波強度8Jy(ジャン斯基)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、グリーン斯坦(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、今まで他の星ではまったく見られる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斯坦は、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年も押し詰まつた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”的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、簡単には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斯坦は、シュミットの発見を聞いて天を仰いだそうだ。

クエーサーの発見だった！

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、「クエーサー(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)

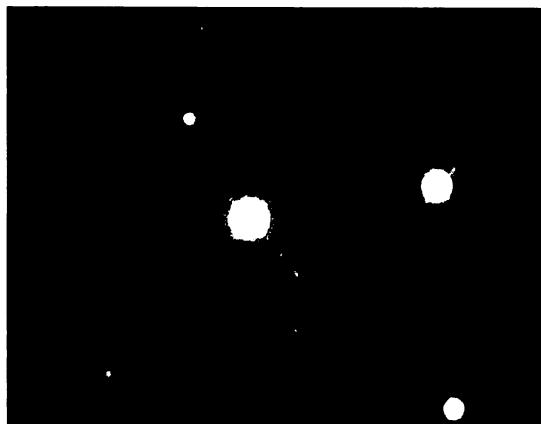


図2 クエーサー3C273(AURA/NOAO/NSF)。右下に向けて細いジェットも写っているが、他の点では星と同じように見える。

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ー (Hong-Yee Chiu) が、quasi-stellar object を約めて quasar とした。

大問題は、クエ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 10^{40}J 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 10^{38}J 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。しかもクエ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、クエ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。

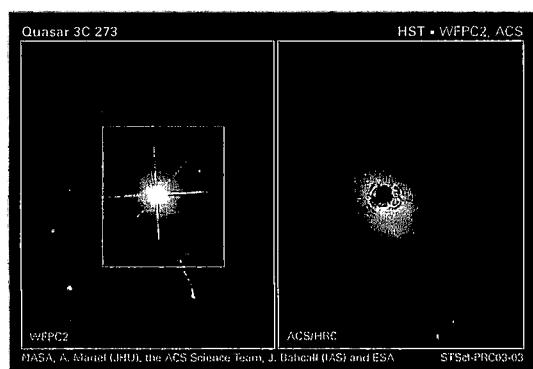


図 3 ハッブル宇宙望遠鏡が撮像したクエーサー 3C273 (NASA/STScI)。中心核があまりに明るすぎて普通の撮像 (左側) ではよくわからないが、中心部を隠してみると (右側)、3C273 の母銀河が写っているのがわかる。

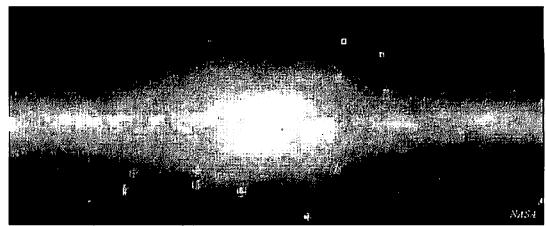


図 4 近赤外で見た銀河系中心 (NASA)

今日では、クエ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)。

クエ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、クエ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、現時点での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存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)。

われわれの銀河系の中心は、いて座の方向 (赤経 $17h\ 46m$, 赤緯 $-28^\circ\ 56'$) にある、「いて座 A* (Sagittarius 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あるかに近いが、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、Y 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、電波アーカやミニスパイア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つってきた。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つはじめた。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つってきたのである。

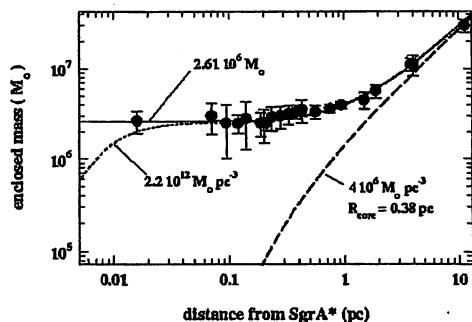


図5 銀河系中心領域に含まれる質量[1]。横軸はパーセク(3.26光年)単位で表した銀河系中心からの距離、縦軸はその距離内に含まれる質量の推定値(太陽質量単位)。黒丸が観測値で、いくつかの曲線はいろいろなモデルを表す。

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枝星(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、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 は銀河系中心近傍の星の速度分散を示したもので、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 単位で表した星の速度分散である。星の速度分散は、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、速度分散が大きいことは、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速度分散も大きくなる。図 6 は、銀河系中心に近づくほど星の速度分散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

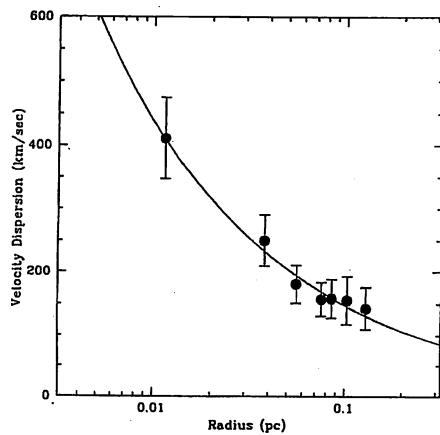


図 6 銀河系中心近傍の星の速度分散[1]。横軸はパーセク（3.26 光年）単位で表した銀河系中心からの距離、縦軸は km/s 単位で表した星の速度分散。黒丸が観測値で、滑らかな曲線はもっともフィットするケプラー曲線。

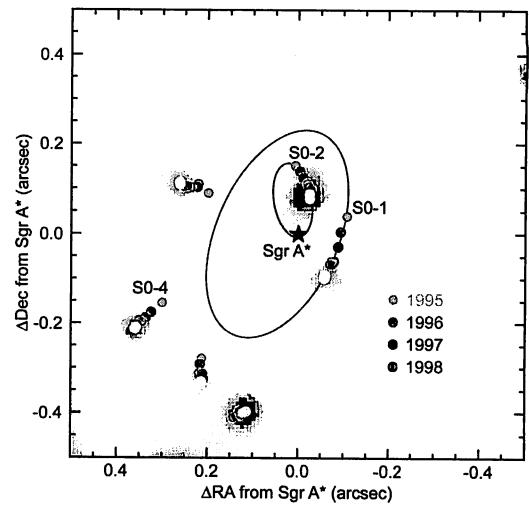


図 7 銀河系中心 Sgr A* のまわりを軌道運動している星 (http://www.astro.ucla.edu/~ghez/gc_nat.html)。

ると仮定して得られた曲線が実線である。

ここまで的方法は、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。

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*—のまわりを橿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、ゲツ

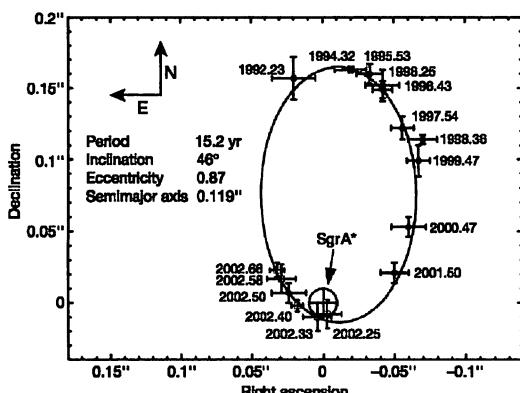


図 8 銀河系中心 Sgr A* のまわりを軌道運動している星 S2 (<http://burro.astr.cwru.edu/Academics/Astr222/Galaxy/Center/sagastar.html>)。

表 1 いて座 A*をまわる S2 星の軌道要素

公転周期	15.2 年
軌道傾斜角	46°
軌道離心率	0.87
長軸	0.119 秒角～1000 天文単位

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。

■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質量について、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質量は、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、銀河の中心には巨大な質量が存在していることが観測的に立証されて、それらが超巨大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。

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

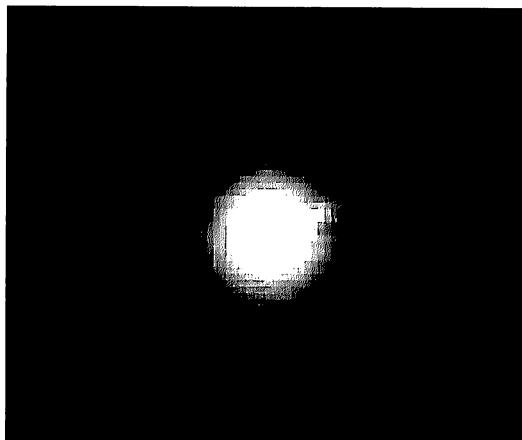


図 9 巨大楕円銀河 M87／NGC4486／電波銀河おとめ座 A（大阪教育大学）。

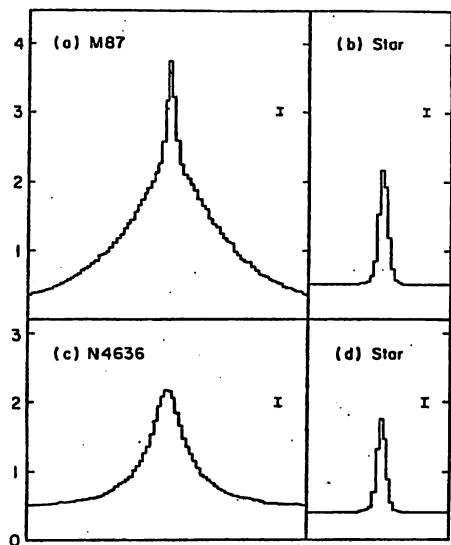


図 10 V バンドの光度プロファイル [4]。上は M87 のもので、下は典型的な楕円銀河 NGC4636 のもの。右列は点源のプロファイル。

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を詳しく調べた（図 10；Young 他 1978 年、Sargent 他 1978 年）[4][5]。

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、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ので、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。

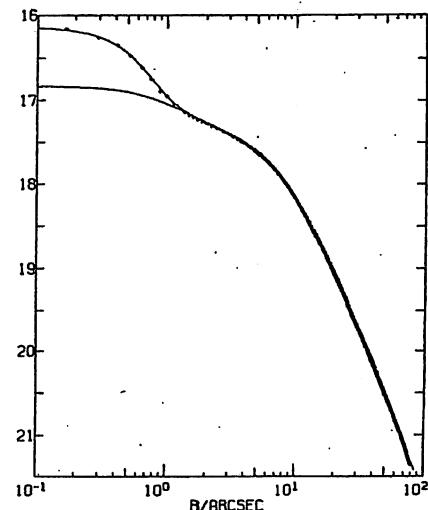


図 11 M87 の光度プロファイルを巨大ブラックホールモデルでフィットしたもの [4]

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 11 の上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 \pm 5 億太陽質量

となつたのだ。

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と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つた。

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。

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）。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

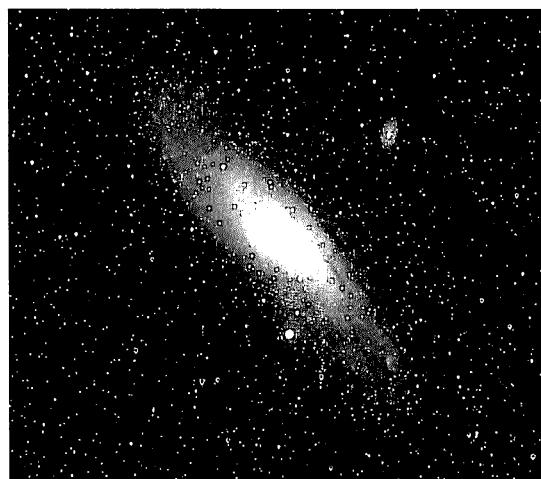


図 12 アンドロメダ銀河 M31 (NGC221) と伴銀河 M32 (大阪教育大学)

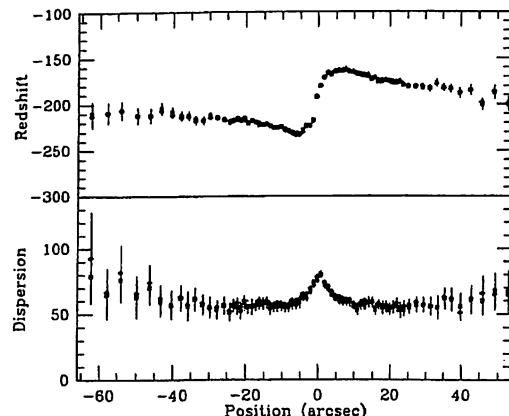


図 13 伴銀河 M32 中心部の恒星運動[6]。上は赤方偏移で測った星の回転運動を表す曲線で、下は星の分散運動を表す曲線。

台のトンリーが、5m 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質量は、

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）。

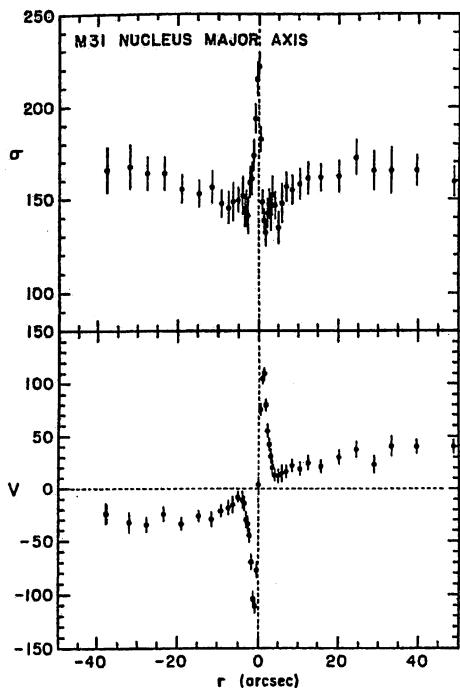


図 14 アンドロメダ銀河 M31 中心部の恒星運動 [7]。上は星の分散運動を表す曲線、下は星の回転運動を表す曲線。

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、前にも出てきたが、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。

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つた結果なのだ（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[8][9]。

■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。

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] Kormendy, J. and Richstone, D. 1995,
Ann Rev A&Ap 27, 235
- [9] Kormendy, D. and Gebhardt, K. 2001,
Relativistic Astrophysics: 20th Texas
Symposium, p363