

銀河と共に進化する超大質量ブラックホール



谷口 義明

愛媛大学宇宙進化研究センター
tani@cosmos.ehime-u.ac.jp

私たちは銀河系（天の川銀河）という銀河に住んでいる。銀河系には約2,000億個もの星があり、その大きさは10万光年にも及ぶ（1光年は光が1年間に進む距離で、約10兆km）。宇宙には銀河系のような銀河が1,000億個程度あると考えられている。銀河には渦巻構造を持つ円盤銀河と回転楕円体構造を持つ楕円銀河（天球面に投影して観測すると見かけ上が楕円に見えるため楕円銀河と呼ばれる）がある。円盤銀河の円盤はもちろん回転運動をしている。楕円銀河の構造は星々のランダム運動（速度分散）でサポートされている場合が多いが、少なからず回転運動もしている。角運動量を持たない銀河はないということである。回転している銀河には中心があり、その場所は銀河中心核と呼ばれる。確かに銀河の写真を見てみると、銀河の中心部は明るい。そこには星の集団があるのだろうと考えられていたが、どうもそうではないケースがあることがわかった。1960年代のことである。

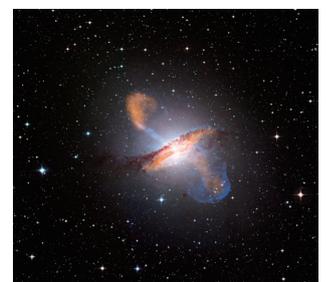
銀河の中には、中心部が異様に明るく輝いているものがあり、それらは活動銀河中心核と呼ばれる。これらの中心核から放射されるエネルギー量は星の集団では説明できない。そのため、超大質量ブラックホールによる重力発電が有力なエネルギー源であると考えられるようになった。つまり、銀河中心核にある超大質量ブラックホールに星やガスが降着し（質量降着と呼ばれる）、そのときに解放される重力エネルギーを電磁波に変換して明るく輝いているというアイデアである。では、活動銀河核を持つ銀河は特別で、普通の銀河の中心核に

は超大質量ブラックホールはないのだろうか？ 答えはノーである。最近の10数年の研究によって、ほとんどすべての銀河の中心には超大質量ブラックホールが存在することが明らかになってきたのである。その結果、驚くべきことがわかった。超大質量ブラックホールの質量は銀河の回転楕円体成分（スフェロイド：円盤銀河の場合はバルジと呼ばれる構造であり、楕円銀河の場合は銀河本体）の質量と非常に良い比例関係を示すことである。両者のサイズは約10桁も異なっているので、なぜこのような驚くべき関係があるのか大きな問題としてクローズアップされたのである。なぜなら、この事実は、ブラックホールが銀河と共に進化してきたことを意味するからだ。ブラックホールの重力圏は銀河のスケールに比べれば極端に小さいので、共進化はブラックホールと銀河とがお互いに何らかのフィードバックを与えつつ進化してきたことを意味する。さらに、最近では、宇宙の年齢がわずか8億歳の頃に、太陽質量の10億倍を超える超大質量ブラックホールが既に形成されていることが発見され、その起源も謎となっている。このような超大質量ブラックホールを短期間で作るには、種となるブラックホールの形成のみならず、どのような物理過程でブラックホールが大質量を獲得していくのかは不明のままである。銀河衝突などのトリガーの要素も取り入れた研究が行われている。本稿では、観測的な進展も合わせて、超大質量ブラックホールと銀河の共進化についての現状を解説し、今後の研究の展望について言及する。

—Keywords—

超大質量ブラックホール：
太陽質量の100万倍から数10億倍の質量を持つブラックホールのことで、銀河の中心核に存在している。ちなみに、太陽質量の1億倍の質量を持つブラックホールの半径は3億kmでしかない。典型的な銀河の大きさは数万光年（ $\sim 10^{18}$ km）なので、銀河は超大質量ブラックホールに比べて約10桁も大きい。

質量降着と活動銀河（中心）核：
銀河中心核のうち、電磁波やジェットとして莫大なエネルギーを放出しているものを活動銀河（中心）核と呼ぶ。最も明るいクラスの活動銀河核はクェーサーと呼ばれ、それらの光度は太陽光度の1兆倍を超える。この莫大なエネルギーの起源は超大質量ブラックホールにガスや星などが落ち込むこと（質量降着）によると考えられている。



電波ジェットを有する活動銀河核の代表例の一つ、ケンタウルスA。赤い色は電波（サブミリ波）、青い色はX線で得られたイメージ。（NASA, CXO）

1. はじめに

1963年、それまで知られていなかった奇妙な天体が見つかった。その天体の名前は3C 273。のちに、クェーサーと呼ばれることになる天体である。^{1,2)}

イギリスのケンブリッジで行われていた電波サーベイは多数の電波源が宇宙にあることを示した。しかし、大半は天の川銀河（銀河系）の中にある星だと思われていた。その常識を覆したのが3C 273であった。距離は16億光年。当時としては記録的に遠い天体の発見である。問題はその光度だった。計算すると、普通の銀河の100倍も明るい。しかも、銀河本体は見えない。いったい何が光っているのか？

いち早く指摘されたアイデアはブラックホールによる重力発電である。なんと、3C 273発見の翌年、1964年に複数の研究者らが言い出したことだ。ブラックホール周辺にあるガスや星がブラックホールに落ち込んでいくと、重力エネルギーが解放される。それを何らかのメカニズムで電磁波やジェットのエネルギーにすればよい。このブラックホール・エンジンは星の内部で起こっている熱核融合より、遥かに効率が良い。水素原子核からヘリウム原子核への熱核融合におけるエネルギー効率率は0.7%でしかない。ところが、ブラックホール・エンジンの効率は10%にもなるのだ。これなら銀河の100倍以上明るい光度を説明できる。³⁾

しかし、問題はブラックホールの質量である。観測された光度を説明するには太陽質量（ 2×10^{30} kg、以下では M_{\odot} の記号で表す）の数億倍は必要になる。そんな大質量のブラックホールが宇宙にあるのだろうか？ しかし、天文学者らはすぐにこのアイデアを受け入れた。近傍の銀河の中心核にも質量の大きなブラックホールがあることがわかったためである。かくして、これらのブラックホールは超大質量ブラックホール（SuperMassive Black Hole, SMBH）と呼ばれるようになった。

その後の研究でわかったことは、銀河の中心には超大質量ブラックホールを擁しているものがあり、重力発電で強烈な電磁波やジェットを放出しているということだ。これらは総称して“活動銀河中心核（Active Galactic Nucleus, AGN; 以下では活動銀河核と略記）”と呼ばれる。3C 273などのクェーサーは最も明るいクラスに分類される活動銀河核であると理解されるようになった（太陽光度の1兆倍以上の光度を持つ活動銀河核）。

しかし、物語はここで終わらない。活動銀河核には超大質量ブラックホールがある。これはよしとしよう。では、活動性を示さない銀河の中心核には超大質量ブラックホールはあるのだろうか？ ないのではないか？ 活動銀河核の研究が始められた当時は、活動銀河核は特別で、その銀河の中心に超大質量ブラックホールがあると思われていた。なにしろ、超大質量ブラックホールがどのようにして生まれたのかもわからない。銀河の中心に遍く超大質量ブラックホールがあると考えた根拠もなかった。

ところが事態は大きく変化した。私たちの住む銀河も含

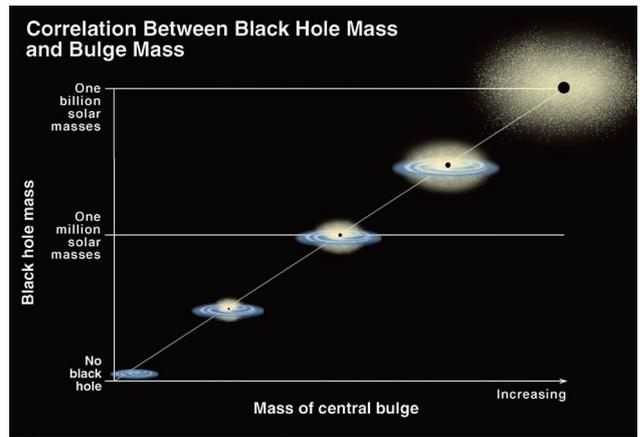


図1 超大質量ブラックホールと銀河バルジの間に見られる質量相関の概略図。銀河の回転楕円体成分（円盤銀河のバルジから楕円銀河）の質量が大きくなると、超大質量ブラックホールの質量も大きくなる。この関係は超大質量ブラックホールの質量に関してみると $10^6 M_{\odot}$ から $10^9 M_{\odot}$ までの3桁に及んで観測されている。（NASA/ESA/STScI）

め、ほとんどの銀河の中心には超大質量ブラックホールがあるということがわかってきたからだ。しかも、新たな謎が浮かび上がってきた。銀河の中心にある超大質量ブラックホールの質量と銀河のバルジ（円盤状ではなく回転楕円体構造をしている成分で、楕円銀河の場合は銀河全体に相当する）の質量が相関しているというのだ（図1）。^{4,5)} 太陽の1億倍の質量（ $10^8 M_{\odot}$ ）を持つブラックホールの半径は3億kmでしかない（光年の単位で表すと、0.00003光年：1光年は約10兆km）。一方、バルジや銀河の大きさは数万光年なので、サイズの比にすると10桁近い差があることに気がつく。こんなにスケールの異なる成分の質量がどうして相関するのか？ 残念ながら、その答えはまだ見つっていない。

2. ブラックホール

前節で本稿のストーリーの概要を説明させて頂いたが、このあと、もう少し詳しく全体を見ていくことにしよう。まずは、ブラックホールである。

ブラックホールは物理学や天文学の研究者のみならず、一般の方々も知っている数少ない物理用語かも知れない。なぜか、それは、ブラックホールという言葉に危険な香りがするからだろう。そもそも、直訳すれば“黒い穴”である。誰も、そんな穴に落ちたいとは思わない。私もそう思う。中国語では“黑洞”だが、これも怖そうだ。

地球の質量は 6×10^{24} kgである。この地球をピンポン球（直径4 cm）の半分ぐらいの領域に詰め込んだとしよう。すると、表面での重力はあまりにも強く、光（電磁波）すら出てこれなくなる。電磁波が出てこれないのなら、色は黒だ。まさにブラックホールである。表面は“事象の地平面”と呼ばれる。もちろん、地球が重力崩壊して、ブラックホールになることはない。あくまでも、たとえ話の世界のことである。

ブラックホールが存在するかもしれない。そう思われた

のは、18世紀に遡る。ニュートン力学の範疇で、フランスのピエール・シモン・ラプラスとイギリスのジョン・ミッチェルは質量の大きな密度の高い天体があれば、そこから光は脱出できないのではないかと考えていた。しかし、現代的な意味でのブラックホールはアインシュタインの一般相対性理論が必要になる。アインシュタイン方程式を使って、ブラックホールの存在を指摘したのは、ドイツのカール・シュバルツシルドだった。球対称、自転はしていない、そして真空。最も簡単な状況設定で、ブラックホールのシュバルツシルド解が導き出されたのである。1916年のことだ。

その後、いくつかのブラックホール解が見つかったものの、ブラックホールが本当に存在するかどうかは、また別の問題だった。天体起源のブラックホールが議論され始めたのは、1930年代が終わりを迎えようとしていた頃だ。大質量星（太陽の数十倍の質量を持つ星）が死を迎えると超新星爆発を起こす。そのとき、星の中心領域（コアと呼ばれる部分）は重力崩壊していくことが予想される。中性子の縮退圧で崩壊をまぬがれることができれば中性子星になる。しかし、まぬがれない場合、重力崩壊は進み、ブラックホールになる。アメリカのロバート・オープンハイマーらが考えたシナリオだ。

しかし、所詮、星の世界の中での出来事である。ブラックホールの質量は太陽の数倍から10倍程度でしかない。銀河中心核にある超大質量ブラックホールとは、まったくスケールが違う。宇宙にブラックホールはあるかもしれない。確かに、そう思われた時代であった。しかし、超大質量ブラックホールの存在まで予想されることはなかった。やはり、クェーサーの発見を待たなければならなかったのである。

ところで、ブラックホールという言葉はいつから使われたのだろうか？ 歴史を紐解くと、意外に新しいことがわかる。シュバルツシルドやオープンハイマーが活躍した時代のことではない。時は流れ、1967年、アメリカのジョン・ホイーラーが名付け親だとされている。なんと、クェーサー発見（1963年）の後だったのである。^{*1}

3. 活動銀河核と超大質量ブラックホール

クェーサーは遠方の宇宙で、より多く観測されるが（最も遠いクェーサーまでの距離は129億光年）、近傍の宇宙にも活動銀河核はある。最初に系統的な研究を行ったカール・セイファートに因み、セイファート銀河と呼ばれている。セイファートが論文を公表したのはクェーサー発見の20年前、1943年に遡る。⁶⁾ 当時はあまり注目を集めなかったが、クェーサーが発見されると、セイファート銀河の重要性が見直された。光度はクェーサーに比べて一桁から二

桁暗いものの、可視光のスペクトルの性質がほとんど同じである。つまり、セイファート銀河はクェーサーをスケールダウンしたものであるとしてよい。要求されるブラックホールの質量は $10^{6-7} M_{\odot}$ 。立派な超大質量ブラックホールである。近傍宇宙の銀河を調べてみると、約5%がセイファート銀河として観測される。つまり、近傍銀河の約5%は太陽の数百万倍もの質量を持つ超大質量ブラックホールを銀河の中心に備えているということだ。

ところで、活動銀河核のエネルギー源は本当に超大質量ブラックホールに由来するのだろうか？ ガスが球対称的にブラックホールに降着していき、そのエネルギーに見合う放射がブラックホール周辺から放射されているとしよう。そのとき期待される放射光度はガスの降着率に比例するが、降着率が高くなりすぎると、放射圧によって降着が止まることになる。このときの放射光度はエディントン光度 (L_{Edd}) と呼ばれ、

$$L_{\text{Edd}} = 1.3 \times 10^{38} (M_{\text{BH}}/M_{\odot}) \text{ erg s}^{-1}$$

と与えられる。ここで、 M_{BH} はブラックホールの質量である。ブラックホールの質量が $10^8 M_{\odot}$ の場合、エディントン光度は $10^{46} \text{ erg s}^{-1}$ になり、観測されるクェーサーの光度を説明できる。仮に、エディントン光度の10%の効率で電磁波のエネルギーに変換すると、要求されるブラックホールの質量は $10^9 M_{\odot}$ になる。星内部の熱核融合でクェーサーの光度を説明するのは困難なので、ブラックホール・エンジンが都合よい。

じつは、星の集団では説明がつかないことがある。それは、すべての活動銀河核は光度の時間変動を示し、そのタイムスケールが数日から数ヶ月と短い。つまり、放射領域のサイズは数日から数ヶ月の時間で変動できる程度であることを意味する。仮に変動のタイムスケールが10日だとすると、光が10日の間に進む距離（1光日）は 10^{16} cm のオーダーである。したがって、エンジンのサイズはこれ以下であることが要請される。 $10^9 M_{\odot}$ の質量を持つブラックホールのサイズは 10^{14} cm のオーダーなので、まったく問題ない。ところが、太陽光度の1兆倍の明るさを星で説明する場合、困ったことが起こる。そんな狭い領域に1兆個もの太陽を詰め込むことはできないからだ。やはり、ブラックホール・エンジンを採用するのが、最も自然な道になる。³⁾

4. 普通の銀河核と超大質量ブラックホール

では、なぜ活動銀河核を有する銀河の中心には超大質量ブラックホールがあるのか？ 活動性を示さない銀河の中心には、超大質量ブラックホールはないのだろうか？ もし、すべての銀河の中心核に超大質量ブラックホールがあるなら、なぜわずかに数%の銀河だけ活動性を示すのか？ 次々と疑問が湧いてくるだろう。このような状況の時、最もよい研究方法は虚心坦懐に多数の銀河の中心領域の性質を調べることだ。活動銀河核の有無にとらわれず、多数の

^{*1} それ以前は、星が重力崩壊してできるという意味で *collapser* という用語や、ブラックホールに落ちていく人を外から見ると、事象の地平面で時間が止まるように見えるという意味で *frozen star* という用語が使われていた。また、*dark star* という用語も使われたが、現在では *dark star* がダークマターでできた星のことを意味する（脚注4を参照）。

銀河を調べると全体像が見えてくる可能性がある。

80年代になるとこのような研究が行われるようになり、意外なことがわかってきた。セイファート銀河ほどではないが、弱い活動性を示す銀河核がたくさんあることがわかったのである。それらはライナー（低電離銀河中心核輝線領域の略称）と呼ばれるようになったが、なんと銀河の50%以上がライナーと分類される事態になった。もしライナーの起源が超大質量ブラックホールによる重力発電なら、ほとんどすべての銀河の中心核には超大質量ブラックホールがあることになる。^{7,8)}

もう一つの研究手法は、活動性を示さない銀河の中心核を詳しく調べてみることだ。その研究に最適な銀河はアンドロメダ銀河である。銀河系から250万光年離れているが、まさに隣人のような銀河なので、中心領域の詳細研究が可能になる。アンドロメダ銀河は活動性を示さないが、銀河中心領域の星の運動から、超大質量ブラックホールがある可能性が高いことがわかった。推定された質量は $1.4 \times 10^8 M_{\odot}$ である。なんと、セイファート銀河の中心核にある超大質量ブラックホールより一桁も重い。^{5,9)}つまり、中心核の活動性の有無は超大質量ブラックホールの質量に依存しているわけではないということだ。

活動性を示さない銀河といえば、もう一つ、最適な銀河がある。私たちの住んでいる銀河系だ。銀河中心までの距離は2万8,000光年。アンドロメダ銀河に比べれば格段に近い。ただ、一つ問題がある。それは銀河系の円盤部にあるガスや塵が中心領域を見えにくくしていることだ。そのため、吸収の効果が弱い赤外線で観測する必要がある。ヨーロッパ南天天文台では地球大気の揺らぎの影響を軽減する装置（補償光学と呼ばれる）を搭載した赤外線カメラを用いて、16年もの歳月をかけて銀河中心領域にある星々の軌道運動を調べた（図2）。星々の運動は銀河中心核（電波源Sgr A* [いて座エースターと読む]）のある場所の周りを見事にケプラー回転運動していることがわかった。そして、中心核の質量は $4.3 \times 10^6 M_{\odot}$ である。銀河系の中心核は活動銀河核ではない。しかし、やはり超大質量ブラックホールはあったのだ。⁹⁾

ここまでのまとめとして、図3にキューサー、セイファート銀河、ライナー、そして普通の銀河の例を示しておく。わずかな数例だが、銀河の姿を楽しんで欲しい。

結局、この説の冒頭に述べた疑問の一つ、“もし、すべての銀河の中心核に超大質量ブラックホールがあるなら、なぜわずかに数%の銀河だけ活動性を示すのか？”に直面することになる。ブラックホールが在れば、必ず活動銀河核として観測されるわけではない。ブラックホール・エンジンが働くには、ガスなどの質量降着が必要になるからだ。したがって、降着現象の有無で活動銀河核か普通の銀河核かに分かれていると考えることができる。

この考え方は降着現象をランダムな事象として捉えている。しかし、時系列として理解することもできる。

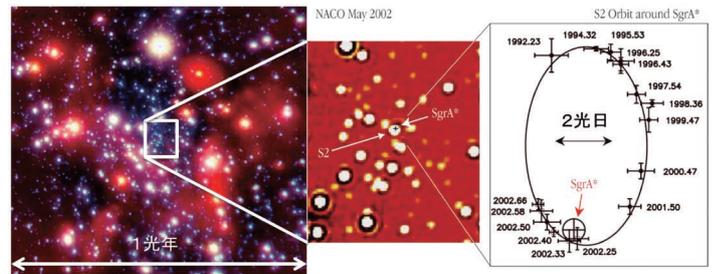


図2 銀河系の中心核 (Sgr A*) の周りの星々の公転運動を16年間かけてモニター観測した結果。一番右のパネルはS2という名前の星の公転軌道。(S. Gillessen, et al.: *Astrophys. J.* **692** (2009) 1075) (図はESO提供のものを組み合わせて作成)

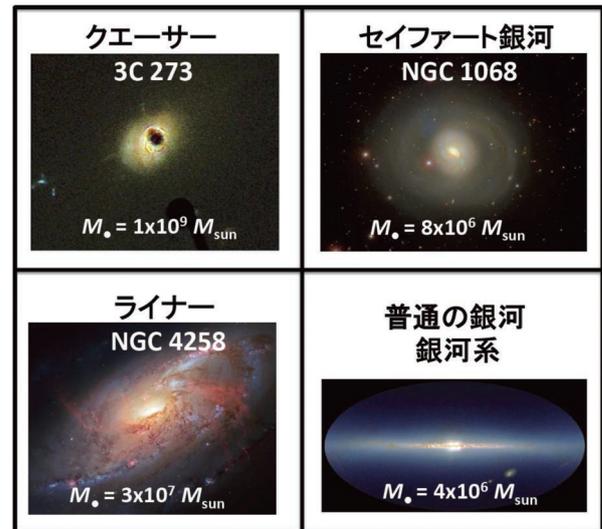


図3 活動銀河核である、キューサー (3C 273)、セイファート銀河 (NGC 1068)、ライナー (NGC 4258)、および普通の銀河の代表格として銀河系の写真を示した。各パネルの下にはブラックホールの質量を合わせて示した。写真の出典 3C 273, NGC 4258: NASA/ESA/STScI (ハッブル宇宙望遠鏡)、NGC 1068: Sloan Digital Sky Survey, 銀河系: 2 Micron All Sky Survey.

- ・降着現象が起きて活動銀河核として観測される
- ・その後、降着現象が納まり、普通の銀河核として観測される
- ・また、降着現象が起きるとこのループが実現される

ある銀河核でスイッチのオン・オフが繰り返される考え方で、デューティー・サイクル仮説と呼ばれる考え方である。銀河の自転周期は2億年程度である。銀河は数回転すると、円盤部で発生した擾乱は落ち着いていく。つまり、銀河にとっては10億年が一区切りになる。セイファート銀河が観測される頻度は5%なので、このライフタイムの内、5%の時間を使っていると考えることができる。この場合、セイファート銀河の寿命は約5,000万年になる。残り、9億5,000万年は普通の銀河核として過ごすことになる。ただ、活動性の弱いライナーが50%を超えるので、5億年程度は弱いながら活動性が続いているのかもしれない。

このデューティー・サイクル仮説は「銀河は進化するものである」という立場に基づいているので、一考の価値がある。なぜなら銀河は片時もその進化を止めていないからだ。

ると考えて良いだろう。

では、超大質量ブラックホールはいつどのようにしてできたのだろうか？ じつはこちらの方が難しい問題であり、現在でも決着を見ていない。³⁾ まず、超大質量ブラックホール形成への制約条件が厳しい。現在知られている最も遠方のクェーサーの距離は129億光年であり、推定される超大質量ブラックホールの質量は $10^9 M_{\odot}$ である。宇宙年齢は138億年なので、宇宙誕生後9億年の間に $10^9 M_{\odot}$ の質量を持つ超大質量ブラックホールを作らなければならない。その方法がわからないのだ。

宇宙に最初にできる天体は先ほど紹介した初代星である。仮に、宇宙誕生後2億年経過した時に初代星ができたとする。超大質量ブラックホール形成に許される時間はわずか7億年でしかない。とりあえず可能性を吟味してみよう。いきなり、 $10^9 M_{\odot}$ の質量を持つ超大質量ブラックホールができることはないだろう。まずは、種となるブラックホールを作り、それが何らかの方法で質量を獲得し、超大質量ブラックホールへと成長していくと考える方が合理的だ。太る方法は2種類しかない。ガスや星を飲み込む質量降着と、ブラックホール同士の合体である。

どちらが良いかは後で考えることにして、種ブラックホールについて考えてみよう。最も自然な方法は初代星に頼ることである。初代星の質量についてはまだ議論のあるところだが太陽の数十倍から1,000倍程度の質量を持つ星が生まれる可能性が高い。¹⁵⁾ それらの大質量星は数百万年経過すると超新星爆発を起こして死ぬが、その際、星の中心領域は重力崩壊してブラックホールになることが予想されている(中性子星の場合もある)。^{*2} 質量が太陽の数10倍の星であれば、爆発後に残されるブラックホールの質量は太陽の数倍程度でしかないが、約1,000倍の星であれば、上手くいけば $100 M_{\odot}$ 程度のブラックホールが残される可能性がある。このような質量のブラックホールは中質量ブラックホールと呼ばれている($10^4 M_{\odot}$ まで、この名称で呼ばれる)。^{*3}

では、宇宙年齢2億年の時に $100 M_{\odot}$ の質量を持つ種ブラックホールができたとしてしよう。問題はその後である。降着か合体で太るしかないが、いずれも難点がある。太陽の百万倍の質量を持つDMハローで $1,000 M_{\odot}$ の質量の星ができて超新星爆発を起こすと、ハロー内のバリオンを吹き飛ばしてしまい、ハローにはガスが残らない可能性が高い。そうすると、ガス降着は起こりえない。一方、合体説の場合も、合体のパートナーが近傍にたくさんないといけないが、 $10^9 M_{\odot}$ の超大質量ブラックホールを種ブラックホールの合体で作る場合、1,000万個の種ブラックホールが必要であり、現実的ではないだろう。また、ブラックホール

多体系の合体にもいろいろ問題は残されている。

さて、ここでの議論は、一つのDMハローで、一個の大質量星しかできないと仮定していた。もし、星団として多数の星が生まれると、種ブラックホールと星々との合体が種ブラックホールを太らせることができる。種ブラックホールが星団の中で最も重い場合、いわゆる暴走合体^{*4}が起こり、上手くいくのかもしれない。初代星が生まれるDMハローにあるバリオンの総量はDMの1/10程度なので、 $\sim 10^5 M_{\odot}$ である。星生成の効率は10%程度なので、暴走合体でできるブラックホールの質量は $10^4 M_{\odot}$ 程度にしかないだろう。

一つの解決策としては、降着と合体を組み合わせたハイブリッド・モデルがあり得るだろう。降着しか起こらない、合体しか起こらない。このような極端なケースはあり得ないからだ。また、最近ではガス雲の重力崩壊で一気に $10^{4.5} M_{\odot}$ のブラックホールを作るモデルも提案されてきている。¹⁸⁾ しかし、それでもクェーサーに要求される超大質量ブラックホール形成への道は険しい。^{*5} こうしてみると、ブラックホール・バルジ関係を議論する前に、銀河形成期のブラックホール形成をまず真剣に検討しなければならない状況にあることが理解されよう。

ところで、初代星が生まれるDMハローにあるバリオンの総量はDMの1/10程度なので、 $\sim 10^5 M_{\odot}$ であると述べた。この状況で $\sim 100 M_{\odot}$ のブラックホールができると、ブラックホールとバリオンの質量比は0.001になる。偶然かもしれないがブラックホール・バルジ関係の値と同じであることは興味深い。ひょっとすると、初代星の形成がブラックホール・バルジ関係の始まりであるかもしれないからだ。

7. 超大質量ブラックホールと銀河の共進化

さて、いよいよ本題である共進化について見ていくことにしよう。図4に示したブラックホール・バルジ関係は銀河系から数億光年以内にある銀河に対して得られた関係である。つまり、宇宙の歴史の中で見れば、ごく最近(数億年以内)の宇宙で観測された関係である。共進化というからは、この関係がいつ始まり、どのように維持されてきたかを理解する必要がある。

この研究には比較的広い天域に対して深宇宙探査を行う必要がある。幸い私たちのグループはハッブル宇宙望遠鏡の基幹プログラムである『宇宙進化サーベイ』を2003年から行ってきており(通称COSMOSプロジェクト)、既に

^{*2} 質量が100-200 M_{\odot} の星は対消滅型超新星爆発が起こり、星全体が吹き飛ばのでブラックホールは残らない。

^{*3} 中質量ブラックホールは英語では intermediate mass black hole であり、IMBHと略される。この名称は筆者らが付けたものである。¹⁶⁾

^{*4} 星団の中に卓越した質量の星があると、その星の衝突断面積が大きいため、周辺の星々とどんどん衝突して、質量を獲得していく現象。¹⁷⁾

^{*5} ダークマターをエネルギー源とする星(ダークスター)も種ブラックホールを作るメカニズムとして考えられている。ダークマターの正体が素粒子の超対称性理論の予測するニュートラリーノであれば、ニュートラリーノはマヨラナ粒子なので自己対消滅できる。このエネルギーを利用してダークマターでできた星を作るアイデアである。このダークスターが重力崩壊すると $\sim 10^4 M_{\odot}$ の質量を持つ中質量ブラックホールが初期宇宙で形成される。¹⁹⁾

100万個の銀河に対してX線, 紫外線, 可視光, 赤外線, 電波の多波長データベースを構築した. これを用いて, 遠方の銀河におけるブラックホール・バルジ関係を調べてみた(図5).²⁰⁾ 調べた赤方偏移のレンジは $z=1$ (距離80億光年)から $z=2.2$ (距離108億光年)である. 図5を見ると, 近傍宇宙で得られているブラックホール・バルジ関係より, ややブラックホールの質量が大きくなっている. ブラックホール・バルジ関係は進化しているのだろうか? その後の他のグループの観測結果を見ると, 赤方偏移 $z=6$ (距離129億光年)までその傾向が見られる(図6). しかし, 本

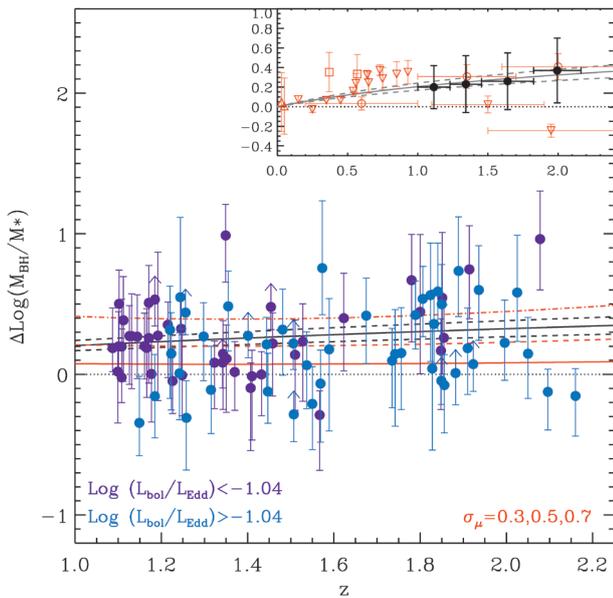


図5 COSMOS天域の赤方偏移 $z=1-2.2$ の範囲にあるAGNの観測から得られたブラックホール・バルジ関係. 近傍銀河のブラックホール・バルジ関係(図中のoffset=0の点線)からのずれ(オフセット)を赤方偏移(z)の関数で表したもの. オフセットがプラス側に出ていることが見てとれる.(A. Merloni, et al.: *Astrophys. J.* **708** (2010) 137) (図はarXiv: 0910.4970v1から取得)

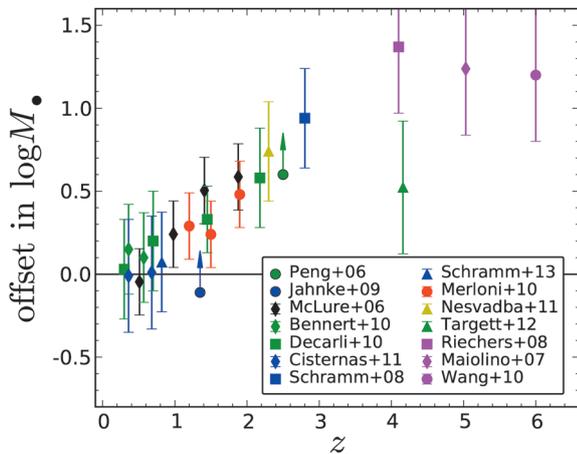


図6 近傍銀河のブラックホール・バルジ関係(図中のoffset=0の直線)からのずれ(オフセット)を赤方偏移(z)の関数で表したもの. 赤方偏移が大きくなるにつれて(銀河の年齢が若いほど)系統的にブラックホールの質量が大きくなる. しかし, この傾向は観測のバイアスで説明されるため, ブラックホール・バルジ関係には進化が見られないと結論される.(A. Schulze and L. Wisotzki: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **438** (2014) 3422) (図はarXiv: 1312.5610v2から取得)

当にそうなっているのだろうか? 遠方の活動銀河核を見ると, 必ず明るいものを選択的に観測していることになる. いわゆる, 観測上のバイアスである. じつは, このバイアスを補正すると, 現在から距離129億光年まで遡っても, ブラックホール・バルジ関係は変化していないことが示されている.

8. 共進化を操るもの

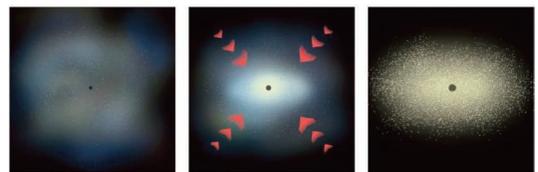
ブラックホール・バルジ関係は, どうも銀河進化の初期段階からスタートしているらしいことがわかってきた. では, この関係はどのような物理過程で生じているのだろうか? 可能性のあるアイデアを見ていくことにしよう(図7).

- I. バルジ形成期に種ブラックホールとバルジが同時に成長する
- II. 超大質量ブラックホールを持つ二つの円盤銀河が合体し, ブラックホール同士が合体して成長すると同時に, 銀河は楕円銀河的な構造を持つように進化する
- III. 種ブラックホールしかない円盤銀河の場合, 円盤部から中心領域にガスが流入してブラックホールとバルジを同時に成長させる

Iは, 銀河形成期, すなわちバルジ形成期にブラックホール・バルジ関係ができるというアイデアである. 種ブラックホールの起源を除けば, 合理的なものである.

一方, IIの円盤銀河の合体による共進化説も頻りに議論されるアイデアである. このような合体で大規模な星生成が誘起され, 大質量星が超新星爆発を起こして作られるブラックホールを集めれば, 合体銀河の中心には $\sim 10^{8-9} M_{\odot}$

I. 種ブラックホールを持つバルジの重力収縮による共進化



II. 2個の円盤銀河の合体による共進化



III. バルジ形成時, ガス流入による共進化

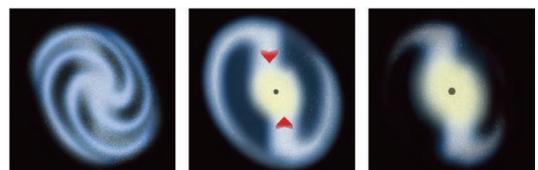


図7 ブラックホール・バルジ関係を説明する3種類のモデル.(図はNASA/ESA/STScIから提供されたものを改変)

の超大質量ブラックホールに成長し、クェーサーに進化するという説が支持を得ているからである。^{22,23)} 但し、この説では、普通の円盤銀河には既に $\sim 10^6 M_{\odot}$ 程度の質量を持つ超大質量ブラックホールが存在していることを仮定している。したがって、銀河形成期ではなく、ある程度進化した銀河が合体で共進化のパスを通るというアイデアになる。

IIIのアイデアは、銀河中心核(すなわち超大質量ブラックホール)とバルジを持たない銀河に対して適用される。本稿の冒頭で、ほとんどすべての銀河の中心核には超大質量ブラックホールが存在していると述べたが、超大質量ブラックホールを持たない銀河もある。それは、円盤やバルジなどの規則的な構造を持たない不規則な形状を示す銀河(不規則銀河と呼ばれる)である。たとえば、銀河系の伴銀河である大マゼラン雲や小マゼラン雲にはバルジも中心核もない。つまり、そのような不規則銀河もいずれは円盤構造やバルジを作りつつ、中心に超大質量ブラックホールを形成するのではないかと考えられている。実際、バルジがほとんどないような円盤銀河に $\sim 10^{4.5} M_{\odot}$ の質量を持つブラックホールが存在する銀河が見つかり始めている。²⁴⁾ IIIはIIと同様に、ある程度進化した銀河に適用できるアイデアである。IIと異なるのは、銀河の合体とは無関係に、銀河の永年進化の中で発生する現象である点だ。

三つのアイデアを紹介したが、いずれのアイデアも、ある程度理にかなったものである。しかし、共進化にどのメカニズムがどの程度寄与しているかは不明である。また、一つ心配なこともある。もし複数のメカニズムが共進化をドライブしているならば、どうしてユニバーサルなブラックホール・バルジ関係が生じているのかという問題だ。メカニズムが異なれば、異なるブラックホール・バルジ関係が存在してもよいからだ。まだ私たちが見逃している本質的なメカニズムがあるような気がしてならない。その理由は、既に述べてきたように超大質量ブラックホールとバルジ(銀河)のスケールが10桁近くも異なることにある。それだけスケールが異なれば、星の系を作ることと、超大質量ブラックホールの成長に物理的なリンクがなくても不思議ではない。もしあるとすれば、両者が何らかの連絡を取り合っていないといけない。そのメカニズムの候補として考えられているのが、超大質量ブラックホールからのフィードバックである。^{*6} つまり、バルジで予想以上に星を作りそうな気配があると、中心にある超大質量ブラックホールが星を作りすぎないように操作するということだ。具体的には超大質量ブラックホール周辺から放射される電磁波やジェットで、星を作る冷たい分子ガス雲を加熱したり破壊したりして、星生成が起こらないようにするのである。²⁵⁾ しかし、エンジンが働いていない銀河ではフィードバックは起こらない。そこにブラックホール・バルジ関係

の奥深さがある所以である。

こうして見てくると、共進化の問題はとても解決されたとは言える状況にはない。やはり、肝となるのは超大質量ブラックホールの起源をまずは解明する必要があるだろう。現在のところ探査がまだ進んでいないのは宇宙最初の10億年である。理論武装をしつつ、つぶさに調べ上げないことには答えは見つからないようだ。

9. 共進化の行く末

さて、現在の宇宙年齢は138億歳である。このあと、ブラックホール・バルジ関係はどう進化していくのだろうか? 残念ながら答えは既に決まっている。その答えはこうだ。「ブラックホール・バルジ関係は破綻する」

破綻するとはいえ、それは遠い未来のことである。たとえば、1,000億年後の宇宙を考えてみよう。宇宙膨張に抗するだけの質量を持った系である銀河団は、銀河団内にあるすべての銀河が合体し、超大質量な楕円銀河になるだろう。その中心には、やはり超大質量なブラックホールが育っているに違いない。その頃、ブラックホール・バルジ関係を調べることに意義を見いだす人はいないだろう。なぜなら、宇宙で観測できる銀河は、自分たちの住んでいる銀河だけだからである。他の銀河は宇宙膨張が進行して、後退速度が光速を超えているので、自分たちの住む銀河しか認識できないのである。この現象はレッド・アウトと呼ばれる。²⁶⁾ 仮にブラックホールとバルジの質量比が0.001だったとしても、それに関心を持つ人はいない。

100兆年後にはもっと事態は深刻になる。すべての星が燃え尽きてしまうからだ。星の燃えかす(白色矮星、中性子星、ブラックホール)はあるが、星が見えないのだからバルジだとか楕円銀河だとか言っている場合ではない。ブラックホール・バリオン関係を調べることはできるが、調べる能力のある知的生命体が星のない世界で生きているとは思えない。

10^{34} 年後以降にはブラックホール・バリオン関係すら調べられなくなる。素粒子の大統一理論が正しければ核子の崩壊が起き始める頃である。仮にバリオンが消えても、超大質量ブラックホールは蒸発せずに生きながらえている。ブラックホールたちはまさに全盛期を迎える。「俺たちを作ってくれたバリオンよ、さらばだ」と祝杯をあげていることだろう。じつは、このあたりで祝杯をあげておいた方がよい。なぜなら、 10^{100} 年後には、さすがの超大質量ブラックホールですら蒸発してしまうからだ。^{*7}

こうなると、ブラックホール・バルジ関係を調べる意義があるのかと思われる方もいるかもしれない。しかし、それについても答えは一つである。宇宙に関するあらゆる問題の解明は、138億歳の宇宙に住む、私たち人類の責務で

*6 フィードバックには正のフィードバックと負のフィードバックがある。共進化で議論されているのは負のフィードバックであるが、慣例で単にフィードバックと呼ばれる。

*7 太陽質量のブラックホールが蒸発する時間は 10^{66} 年である。蒸発時間はブラックホール質量の3乗に比例するので、 $10^{11} M_{\odot}$ の質量を持つ超大質量ブラックホールは 10^{100} 年以内に蒸発する。

ある。

それにしても、私たちの住んでいる宇宙は不可思議な宇宙である。宇宙の質量密度の大半を占めるのはダークマター (27%) とダークエネルギー (68%) であり、バリオンはわずか5%を占めるにしか過ぎない。私たちの住んでいる銀河の実体はバリオンだが、その来し方行く末は、ダークマターの重力に支配されている。一方、バリオンとしての銀河を見てみると、中心には必ず超大質量ブラックホールがある。ブラックホール・バルジ関係を斜に構えてみると、超大質量ブラックホールは小さいながらも銀河進化を支配しているようにさえ見える。つまり、外を見ればダークマターとダークエネルギー、内を見ればブラックホール。あたかも三つの暗黒の掌(たなごころ)でもてあそばれているようにも思う。宇宙はあまりにも手強い。

本稿の寄稿を勧めて下さった森川雅博氏(お茶の水女子大学)に深く感謝致します。超大質量ブラックホールと銀河の共進化についてはここ数年来、多くの関連研究者の方々と議論を重ねてきました。特に、梅村雅之氏(筑波大学)、嶺重慎氏(京都大学)、吉田直紀氏(東京大学)、および長尾透氏(愛媛大学)に感謝致します。また愛媛大学宇宙進化研究センターの同僚には有益なコメントを頂いた。特に、小林正和氏と塩谷泰広氏に感謝致します。

参考文献

- 1) M. Schmidt: *Nature* **197** (1963) 1040.
- 2) クェーサー全般については拙著で恐縮だが『クェーサーの謎』(谷口義明著, 講談社, ブルーバック)と『巨大ブラックホールと宇宙』(谷口義明, 和田桂一著, 丸善)を参照されたい。本格的な教科書としては『ビーターソン 活動銀河核』(B. M. Peterson著, 和田桂一訳, 丸善)が参考になる。
- 3) M. J. Rees: *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **22** (1984) 471.
- 4) J. Kormendy and D. Richstone: *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **33** (1995) 581.
- 5) J. Kormendy and L. C. Ho: *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **51** (2013) 511.
- 6) C. K. Seyfert: *Astrophys. J.* **97** (1943) 28.
- 7) T. M. Heckman: *Astron. Astrophys.* **87** (1980) 152.
- 8) L. C. Ho, A. Filippenko and Sargent, W. L. W. *Astrophys. J.* **487** (1997) 568.
- 9) J. Kormendy: *Astrophys. J.* **325** (1988) 128.
- 10) S. Gillessen, *et al.*: *Astrophys. J.* **692** (2009) 1075.
- 11) J. Magorrian, *et al.*: *Astron. J.* **115** (1998) 2285.

- 12) K. Gültekin, *et al.*: *Astrophys. J.* **698** (2009) 198.
- 13) J. A. Peacock: *Cosmological Physics* (Cambridge Univ. Press, 1999).
- 14) 以下のサイトを参照. <http://sci.esa.int/planck/51560-the-history-of-structure-formation-in-the-universe/>
- 15) T. Hosokawa, *et al.*: *Astrophys. J.* **778** (2013) 178; 日本語の解説書としては『宇宙で最初の星はどうやって生まれたのか』(吉田直紀著, 宝島社新書), 『宇宙の一番星を探して』(谷口義明著, 丸善)などがある。
- 16) Y. Taniguchi, *et al.*: *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **52** (2000) 533.
- 17) H. Mouri and Y. Taniguchi: *Astrophys. J.* **566** (2002) L17.
- 18) L. Mayer, *et al.*: *Nature* **466** (2010) 1082.
- 19) D. Spolyar, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **100** (2008) 1101.
- 20) A. Merloni, *et al.*: *Astrophys. J.* **708** (2010) 137.
- 21) A. Schulze and L. Wisotzki: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **438** (2014) 3422.
- 22) D. B. Sanders, *et al.*: *Astrophys. J.* **325** (1988) 74.
- 23) Y. Taniguchi, *et al.*: *Astrophys. J.* **514** (1999) L9.
- 24) N. J. Secrest, *et al.*: *Astrophys. J.* **777** (2013) 139.
- 25) J. Silk and M. J. Rees: *Astron. Astrophys.* **331** (1998) L1; この論文はブラックホール・バルジ関係が観測的に示唆される以前に書かれた論文であるが、理論的にその関係を予測していた。
- 26) M. S. Turner: 『宇宙の起源』(別冊日経サイエンス1962013); 佐藤勝彦編: 『宇宙の誕生と終焉』(2013) p. 24.

著者紹介

谷口義明氏: 1954年, 北海道生まれ。東北大学大学院理学研究科天文学専攻修了。理学博士。東京大学助手, 東北大学助教授を経て, 現在は愛媛大学宇宙進化研究センター長。専門は宇宙物理学で, 銀河, 活動銀河核, 宇宙の大規模構造, ダークマターなどを研究している。趣味は読書, 園芸, ドライブなど。

(2014年3月2日原稿受付)

Co-Evolution between Supermassive Black Holes and Their Hosting Galaxies

Yoshiaki Taniguchi

abstract: We present a brief review on the co-evolution between supermassive black holes (SMBHs) and their hosting galaxies. SMBHs have been thought to be the central engine of active galactic nuclei (AGNs) that emit tremendous energy from a very compact region in their nuclei. Although AGNs are observed in only several percent of galaxies, recent observations have shown that almost all of galaxies have a SMBH in their nuclei. It is also found that there is a tight correlation between the SMBH and the bulge masses, suggesting the co-evolution between them. Based on recent observations and theoretical considerations, we discuss what happens in galaxies during the cosmic time.