

MOIRCS Deep Survey で探る高赤方偏移の大質量銀河と活動銀河核



山田 亨

〈東北大学大学院理学研究科 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉〉

e-mail: yamada@astr.tohoku.ac.jp

本稿では、MOIRCS Deep Survey (MODS) のデータを同じ天域での非常に深いチャンドラ X 線衛星のデータと比較して、赤方偏移 2-4 の銀河と活動銀河核との関係を調べた研究について紹介する。MODS データから約 2,600 個の銀河の星質量、星形成率などを評価し、これと X 線カタログを比較したところ、約 60 個の天体が X 線で明るい活動銀河核をもつことが判明した。たいへん興味深い点は、このほとんどが 500 億太陽質量以上の星質量をもつ大質量銀河に付随していることである。これは、近傍と同様の母銀河(バルジ)-ブラックホール質量比が高赤方偏移で成り立っていることと矛盾しない。一方、1,000 億太陽質量以上の星質量をもつ銀河では、その 35%以上という大きい割合で活動銀河核が観測された。これらの銀河の多くは活発な星形成銀河であることを考えると、広い意味での銀河形成とブラックホール形成の共時性が観測されたと言える。

1. はじめに

MOIRCS Deep Survey のデータは、宇宙史を通じての銀河の星質量形成過程の進化を解き明かし、また、ダスト吸収を受けた天体の性質を解明するうえでたいへん大きな資産であると言えるが、本稿では少し角度を変えて、このデータを用いて、銀河とブラックホールの共進化の問題に取り組んだ研究の結果を紹介したい¹⁾。MOIRCS Deep Survey のデータ²⁾と、X 線衛星 *Chandra* によるこれまでで最も深い X 線データ³⁾とを併せて解析し、赤方偏移 2-4 に達する約 100-120 億年前の宇宙において、銀河の星質量や星形成と、活動的な巨大ブラックホールの性質とを直接比較してその関係を調べることを試みる。

2. 銀河と巨大ブラックホール

「立派な(質量の大きな)バルジをもつ銀河の中心部には、必ずといってよいほど太陽の 100 万

倍~10 億倍の質量をもつ巨大ブラックホールが存在し、しかも、そのブラックホールの質量は銀河のバルジ(楕円銀河の場合はその全体)部分の星質量に比例している。」

現在ではすでに広く受け入れられている考え方^{4),5)}と言えるが、これがわれわれの近傍の宇宙の銀河について観測的にも確立したと言えるようになったのは比較的最近のことである。

なぜ、それほど簡単ではなかったのだろうか。まず、巨大ブラックホールが活動的でない場合、すなわち物質の降着がほとんどない場合には、直接その放射を観測することは難しく、周辺の星、またはガスの運動を測定するなど、その質量を評価するための力学的な手法が必要である。近傍の銀河の可視光観測の場合には、例えば、分光観測から銀河の中心部の星の速度分散と銀河中心に対する回転速度を求め、一方、撮像観測で得られる光度分布からは星の質量分布を推定して期待される速度構造モデルを求める。実際に観測される中

心部の速度の大きな変化と、星の分布から推定される速度構造との違いが巨大ブラックホールによる寄与の結果だと解釈し、その質量を求めることになる。また、電波での VLBI を用いたメーザ線の観測では、より中心部に近いガスの運動を測定し、さらに直接的に巨大ブラックホールと考えられる天体の力学質量を推定することができる。いずれの場合にも、銀河の中心部の十分近いところを分解して速度構造、そして、特に前者の場合には光度分布も求める必要があり、高解像度かつ高感度の観測が必須である。

一方、活動的な巨大ブラックホール、すなわち、クェーサーやセイファート銀河核などの活動銀河中心核 (active galactic nuclei; AGN) の場合には、幅の広い輝線領域 (Broad Line Region; BLR) のガスの運動がドリアル定理に従うとして、ブラックホール質量を求めることができる。この際、BLR のサイズは一次的には変光時差観測 (reverberation mapping)、二次的にはその結果を用いた AGN 光度と BLR サイズの相関を示す経験則を用いて求められる⁶⁾。その一方で、母銀河との関係を調べるためには、その光度や換算した星質量、あるいは銀河力学構造を反映する速度量を求める必要がある。AGN 成分は、一般に母銀河中心部の星の光を凌駕していることも多いので、母銀河成分を正しく観測するためには、注意深く AGN 成分の寄与を評価し、差し引いたうえで求める必要がある。すなわち、ブラックホールが活動的な場合にもそうでない場合にも、母銀河とブラックホール質量の関係を求めるためには、高解像度・高感度の観測が必須となり、可視光観測ではハッブル宇宙望遠鏡や地上大望遠鏡、補償光学などの登場により、近傍の銀河について、ようやくその関係が確立してきたのである。

これまでの多数の観測的研究の結果、「バルジをもつ円盤銀河や楕円銀河には、そのバルジまたは楕円銀河の星質量に比例する質量をもつ巨大ブラックホールが存在し、その質量比は約 1,000 : 2

である」ことが明らかになっている。

3. 銀河の形成と共進化

仮に円盤銀河のバルジ成分に限ったとしても、その質量は 10^9 - 10^{10} 太陽質量、その大きさは数 kpc に及ぶ。これに対して、ブラックホールに降着した物質の質量はそのわずか 2% 程度、BLR のサイズは 1 パーセク程度以下である。この両者の間に密な相関関係が存在するというはたいへん不思議であり、何か明確な物理的なつながりが存在すると考えられる。すなわち、銀河形成の過程と、その中心部におけるブラックホールの形成、あるいは物質の降着には因果関係さらには「共時性」があることが推測される。これは、巨大ブラックホールの起源のみならず、銀河の形成過程を解明するうえでもたいへん重要な要素であると考えられる。

現在のところ、ブラックホール質量と母銀河バルジとの密な相関の起源については次のような考え方があ

[1] バルジ形成期 (楕円銀河形成期) の星形成がブラックホールへのガスの降着の直接の原因である場合そのプロセスには、超新星爆発による乱流的粘性、コンプトンドラグによる角運動量の散逸などの過程が考えられる^{7), 8)}。ただし、どの場合にも降着に直接関与する星形成とバルジ全体の星形成が比例している必要がある。

[2] バルジ形成期にはガス質量など銀河の大きさに比例して星形成もブラックホール形成も進むが、ブラックホールの活動が負のフィードバックとして働き、以降の星形成を止めるため、結果的に密な相関が生まれる⁹⁾。

いずれの場合にも、現在の宇宙、近傍銀河で観測される銀河とブラックホールの関係は、銀河形成の結果としてすでに終息したあとの「結果」を見ているわけであり、その相関の起源についてより直接的で明確な描像を得るためには、銀河およびブラックホールの形成期である高赤方偏移の天

体を観測し、この両者の関係を調べることが必須だろう。形成期に近づくにつれ、銀河と巨大ブラックホールの形成には「時間差 (タイムラグ)」が生じるのだろうか？ それとも、両者は常に同時に形成され、発展してきたのだろうか？ 例えば、銀河の中心部においては、その構造形成、あるいは星形成の時間スケールは、銀河全体に比べれば短いだろう。バルジ (楕円銀河) 全体が形成されるよりも、ブラックホールの形成により密接にかかわる中心部が先に形成される場合、ブラックホール質量とすでに形成されている母銀河星質量の関係は、現在の相関関係とは大きく異なっている可能性がある。

実際、宇宙年齢にまたがる時間スケールでの階層的な構造形成、銀河形成の過程で、巨大ブラックホールと母銀河の質量相関はどのように変遷してきたのだろうか？ 銀河がマーキングを繰り返す中で、質量相関は常に保たれているのか？ それともマーキングの結果変化するのだろうか？ 宇宙全体の進化の中で、例えば明るいクェーサーの数密度進化は赤方偏移 2-4 で「ひとやま」のピークをもつ。これは、銀河中心のわずか数 pc 以内のローカルな現象が、宇宙の構造形成と密接に関連して進化してきたことを端的に示している。

これらについて、理論的な予測や N 体シミュレーションあるいは準解析的なモデルによる予測は多数行われてきた^{9), 10)}が、一方観測的にはブラックホール-バルジ質量相関関係が赤方偏移とともにどのように進化をしてきたのかについてはほとんど解明されていなかった。これは、遠方天体について、活動的でないブラックホールの場合には、中心核近傍での速度構造、光度分布を十分に分解して求めることができないためブラックホール質量を求めることが非常に困難で、逆に活動的な明るいブラックホールの場合には、母銀河の星成分を観測することがたいへん難しいためである。点源で明るい中心核の影響を取り除いて淡い母銀河の比較的中心部の光度分布、速度分散を

求めることは、解像度と感度の点でたいへん厳しい条件の観測である。

4. MOIRCS DEEP SURVEY と活動銀河

そのようなわけで、ようやく本稿の主題である MOIRCS Deep Survey (MODS) の登場である。MODS の視野は約 100 平方分角で、(深さに対しては相当な広視野と言えるが) AGN といっても、例えば明るいクェーサーなどは、数密度から考えても視野内で観測される期待値は小さい。一方、セイファート銀河程度の比較的光度の小さい天体であれば、それなりの数の検出が期待できる。実際、明るいクェーサーの数密度のピークといえる赤方偏移 2-4 をもつ銀河の数は、2,600 個あまりに及び、母銀河のサンプルとして、統計的には十分なサンプルであると言える。これを用いて、高赤方偏移におけるブラックホール質量と母銀河の質量との関係を調べ、その相関関係を明らかにすることができないだろうか。

中程度の光度の AGN であれば、可視光波長域でも、その存在に邪魔されずに星質量など母銀河の性質を求めることができると考えられる。同じ質量の母銀河であれば、高赤方偏移ほど明るいことも予想されるので、AGN が視線上から隠されている (2 型) かないか (1 型) にかかわらず、母銀河の放射が支配的となる場合が多いことが予想できる。MODS で検出された銀河については、可視光から中間赤外線までの多波長での測光データに基づくスペクトル・フィッティングの解析でその星質量が求められているが、この段階で 4,000 Å break, Balmer 吸収端や 1.6 μm bump など、恒星の放射起源の特徴を見ることで、実際にその光では星成分が支配的か、高温ダスト放射を含めた AGN 成分が支配的かを区別することができる。

では、ブラックホールの存在はどのようにして求めるのか？ さすがに、赤方偏移 2-4 などの高

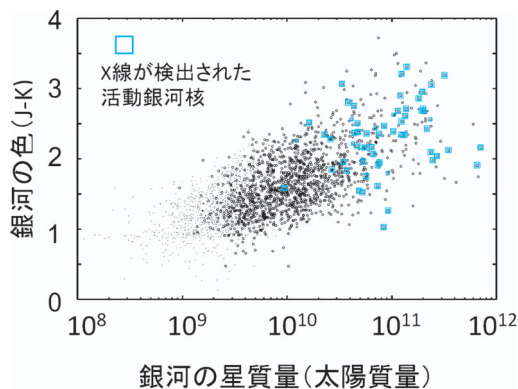


図1 赤方偏移2-4のMODS銀河とX線で検出されたAGN。銀河は点($K > 23$ 等のもは小さい点)で示されており、Chandraで検出された天体を□印で示した。AGNが大質量銀河にのみ存在し、また、 10^{11} 太陽質量を超える質量の大きな銀河では、大きな割合(約35%)がAGN活動性を示すことがわかる。

赤方偏移になると、活動的でないブラックホールの質量を観測的に求めることは現時点の可視光観測ではほとんど不可能といってよいほどに難しい。しかし活動的な場合には、MODSの視野であるGOODS-Northでは、すでにChandra衛星によるこれまでで最も深い200万秒の積分に基づくX線での深探査が行われてその結果が公表されており、これらを用いることで、赤方偏移4という遠方(初期)の宇宙までAGNを検出することができる。そこで、この結果をMODSのデータと合わせれば、高赤方偏移宇宙において銀河とブラックホールの関係について、これまでになくより直接的な検証ができると考えた。

われわれの作戦は次のとおりである。まず、MODSのデータを用いて特に赤方偏移2-4の天体を選び出す。多色測光によるphotometric redshift測定、あるいは分光観測に基づいて得られた赤方偏移のデータから、MODS視野で約2,600個の天体を選び出すことができた。このうち、 $K=23$ 等よりも明るい銀河が約1,300個で、さらにそのうち分光観測により赤方偏移がわかっている天体が220個以上含まれる。これを

Chandra衛星によって検出されたX線源のカタログと比較することにより、AGNが存在するとすればどのような銀河に特徴的に存在するかを調べ、また、母銀河の質量とX線光度とを比較して、適当な仮定のもとにその母銀河/ブラックホール質量比を論ずることができるだろう。母銀河の星質量については、バルジと円盤を分離して求めることは難しいが、少なくともバルジ(楕円銀河)成分の星質量の「上限値」については、精度良く押さえることができる。また特に質量の大きい銀河については、バルジ成分・楕円銀河成分がその星質量の半分以上を占めると考えられることから、不定性は大きいものの、妥当なアプローチであると考えられる。このようにして、赤方偏移2-4の高赤方偏移の銀河とブラックホールとの関係に意味のある制限をつけることを目指す解析を行った。

結果については、図1を見ていただきたい。この図は一見、何の変哲もない色-星質量図に見えるのだが、銀河とAGNの関係について、実はたいへん興味深い情報を含んでいる。MODSで検出された銀河が点で示されている。この赤方偏移でも、一般に、星質量が大きな銀河がより赤い色を示す傾向を見ることができる。ここに、X線で検出された天体を□印で示した。さて、この図1からは

- X線源が検出された銀河は、約 5×10^{10} 太陽質量よりも質量が大きい巨大銀河に限られる
- 星質量の大きな銀河ではAGNの存在する割合が高く、特に 10^{11} 太陽質量を超える銀河ではAGNの存在率が30-40%にも及ぶ

ことが見て取れるだろう。

Chandra衛星のGOODS-N、すなわちCDFN領域の観測の検出限界は約 1.5×10^{-16} erg/s/cm²であり、これは赤方偏移2では約 3×10^{42} erg/sの光度に相当する。次章にももう少し詳しく述べるが、エディントン光度を仮定すると、これは太陽質量の200万倍の質量をもつブラックホールに相

当し、観測はかなり小さい質量のブラックホールまで検出可能な深さであることがわかる。

さて、銀河の形成とブラックホールの共進化について特に仮説をおかない場合、高赤方偏移において、ブラックホールをもつ母銀河の質量はさまざまでありうる。例えば、形成時間の短い銀河中心部と共時的にできる場合には、質量の大きなブラックホールあるいは明るい AGN が、質量の小さな、例えば 10^{8-9} 太陽質量の母銀河に出現しても不思議ではない。しかし、図 1 の結果はそうではなく、X 線検出限界より明るいほとんどの AGN は約 5×10^{10} 太陽質量よりも質量が大きい巨大銀河に観測されるのである。

一方、大質量銀河の 35-40% に AGN 活動性が示されている点も重要である。MODS データからは、これらの天体の星形成率も推定することができる。星形成率の評価にあたっては、AGN 成分の混入にも注意する必要があるが、われわれは、この点にも十分注意を払った解析を行った。得られた結果を見てみると、これらの銀河は 10-1,000 太陽質量/年の星形成率をもち、半数以上が 100 太陽質量/年を超える大きな星形成率を示している。このような活発な星形成現象を起こしている銀河の少なくとも 3-4 割以上で「活動的な」ブラックホールの存在が観測されたことは、銀河の形成とブラックホールの形成（ガスの降着 = AGN 活動）が広い意味で「共時的」であることを観測的に示した結果であると言える。

5. 高赤方偏移での質量相関

それでは、高赤方偏移におけるブラックホール質量と母銀河星質量の相関については、どのようなことが言えるのか？ そのためには、X 線で検出された MODS 領域の赤方偏移 2-4 の AGN についての図 2 を見ていただくことにする。

図 2 には、横軸には銀河の星質量、縦軸には X 線光度を横軸と同じ星質量で割った量が示されている。単位星質量あたりの AGN 活動性を示すも

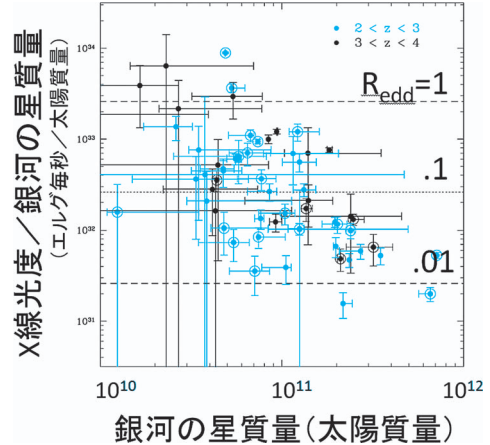


図2 銀河の星質量と X 線光度。二重丸がついている天体は、*Spitzer* 衛星で $24 \mu\text{m}$ の放射が検出されている。

ので、われわれは「スペシフィックな AGN 活動性」とも呼んでいる。縦軸の分母と横軸が同じ点は注意する必要があるが、例えば近傍で観測される質量相関（質量比）が高赤方偏移でも変わらないとし、AGN 活動性（エディントン光度比）を仮定すると、この図では横軸の星質量によらず、縦軸の値が一定になる。図 2 には、近傍の質量比 (2:1,000) に対してエディントン比が、1 の場合 (AGN がエディントン光度で光る場合)、0.1, および 0.01 の場合の線を示している。ここからわかることは、エディントン比 0.01-1.0 という近傍と同程度の値を仮定した場合、観測されるブラックホール/母銀河質量比は近傍での関係と矛盾せず、大きな逸脱は見られない、ということである。

ブラックホール質量の直接的な評価がない場合、このような図の解釈においては、母銀河・ブラックホール質量比とエディントン比は縮退してしまい、議論を進めるには、いずれかの仮定を置かざるをえない。

逆に、高赤方偏移でブラックホール/母銀河質量比が常に近傍と同じ値だと仮定した場合、AGN のエディントン比の質量依存性を論ずることができる。図 2 でデータ点の分布が右下がりになっているのは、観測される X 線光度の範囲に

対して星質量の範囲が広いためであり、見かけの効果とも言えるが、注目すべきは、検出されている範囲で星質量が小さいものではエディントン比 ~ 1 に達するものが観測されていることである。一方、大質量の母銀河でエディントン比が大きい AGN が観測されないのは選択効果ではないだろう。前章の図 1 において、低質量母銀河で AGN が観測されない理由としては、(1) 低質量母銀河では大質量ブラックホールが存在しない、あるいは、(2) 低質量銀河にも大質量ブラックホールは存在するが、活動性が低い、のいずれかが考えられるが、図 2 に示されている傾向が低質量天体にあてはまるならば、(2) の理由は考えにくく、この点からも高赤方偏移でも大質量ブラックホールは大質量母銀河に存在する、という関係を示唆していると考えられる。

一方、図 2 のスペシフィックな AGN 活動性を MODS スペクトル解析で得られた星成分の年齢と比較してみると、10 億年を超える年齢を示す銀河では系統的に AGN 活動性が低い、という傾向も見いだすことができた。星形成年齢を経た銀河は、一般に現在の星質量に対する星形成率（スペシフィックな星形成率）も小さく、おそらくその星形成の最盛期を過ぎている。ブラックホールの活動性も星形成年齢とともにピークを過ぎているという可能性が高い。

以上、今回の解析からわかったことは

- [1] 高赤方偏移でも、大質量ブラックホールは大質量銀河に付随しており、その質量比の関係は近傍銀河に見られる相関と矛盾しない。
- [2] 10^{11} 太陽質量を超える高赤方偏移の星形成銀河における AGN 活動性の発現の割合は高く、これは、ブラックホール形成と銀河形成

の共時性が数億年–10 億年の時間スケールで成り立っている可能性を示唆している。ということになる。次のステップとしては、分光観測によりブラックホール質量を求め、より直接的に質量比を求めることである。ただし、今のところ、それが可能なのは BLR のピリアル法が使える 1 型 AGN に限られるところが難点である。

本稿は、MOIRCS Deep Survey 研究の一部として行われた。

MODS チームおよびすばる望遠鏡関係者に謝意を表したい。

参考文献

- 1) Yamada T., et al., 2009, ApJ 699, 1354
- 2) Alexander, et al., 2003, AJ 126, 539
- 3) Kajisawa, et al., 2011, PASJ, in press
- 4) Kormendy, Richstone, 1995, ARA&A 33, 581
- 5) Maggorian, et al., 1998, AJ 115, 2285
- 6) Kaspi, et al., 2000, ApJ 533, 631
- 7) Wada, Norman, 2002, ApJ 566, L21
- 8) Kawakatu, Umemura, 2002, MNRAS 329, 572
- 9) Hopkins, et al., 2006, ApJ 652, 107
- 10) Haehnelt, Rees, 1993, MNRAS 263, 168

MOIRCS Deep Survey and AGN at High Redshift

Toru YAMADA

Astronomical Institute, Tohoku University, Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8578, Japan

Abstract: We studied the AGN activities among the high-redshift galaxies in MOIRCS Deep Survey using the *Chandra* deepest X-ray data. We found that the AGN appears only in massive galaxies and the fraction of the AGN among the most massive galaxies is notably high.