

VOで探る超巨大ブラックホールと周囲の銀河のクラスタリング

小宮 悠

〈東京大学大学院理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター
〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1〉
e-mail: komiya@resceu.s.u-tokyo.ac.jp



活動銀河核（AGN）の中心には超大質量ブラックホールがあり、その活動は銀河の進化と密接に関連していると考えられています。私たちは、Virtual Observatory（VO）を用いてAGNと周囲の銀河の観測データを収集することで、AGNと銀河分布の相互相関と、ブラックホール質量との関連を調べました。その結果、特に大質量の中心ブラックホールをもつAGNは、銀河のより密集した領域にあることを発見しました。

1. 巨大ブラックホールと銀河の成長

多くの銀河においては、その中心に超大質量ブラックホール（supermassive black hole; SMBH）が存在することが知られており、活動銀河核（active galactic nuclei; AGN）のエネルギー源はこのSMBHへの物質の落ち込みであると考えられます。観測的に、SMBHの性質とその母銀河の特徴には、密接な関連があることが示すデータが得られています。よく知られているのは、SMBHの質量と、銀河のバルジ成分の質量、または速度分散との間の強い正の相関です^{1), 2)}。銀河の進化を理解するうえでも、SMBHは重要な天体であるといえるでしょう。

現在の宇宙論からは、銀河は暗黒物質からなるハローの中にあり、小規模なものから合体を繰り返して大規模な銀河へと成長してきたと考えられています。こうした枠組みにおいては、銀河の進化は主に、銀河が属しているハローの質量と、銀河の合体史によって決まります。ハローの質量や合体史について知るには、周囲の銀河の分布を観測することが有用です。AGN分布の自己相関関

数や、AGNと銀河分布との相互相関関数から、ダークハローの質量を推定することができ、より強いクラスタリングを示す場合はより大質量のダークハローに属すると考えられます。

一方、SMBHの成長メカニズムはまだ詳しくはわかっていませんが、大量のガスを銀河中心に落下させる機構の一つとして、銀河の衝突が重要であろうと考えられます³⁾。また、AGNの活動は逆に、属する銀河や銀河団の進化にも影響している可能性が指摘されています⁴⁾。SMBHの成長を理解するうえでは、銀河周囲の環境との関連についても知ることが重要です（図1）。

AGN分布と銀河分布の相互相関については、これまで限られた領域の深い観測に基づいた解析が、いくつかの研究グループによって行われてきました。その結果として、AGNは明るい銀河と同程度のクラスタリング度の領域にあることや、電波で明るいAGNはそうでないAGNと比べて、より銀河が密集した領域にあることが指摘されています^{5), 6)}。こうした研究に加え近年では、Sloan Digital Sky Survey（SDSS）などの広域探査による大規模なサンプルを用いた解析も行われるよう

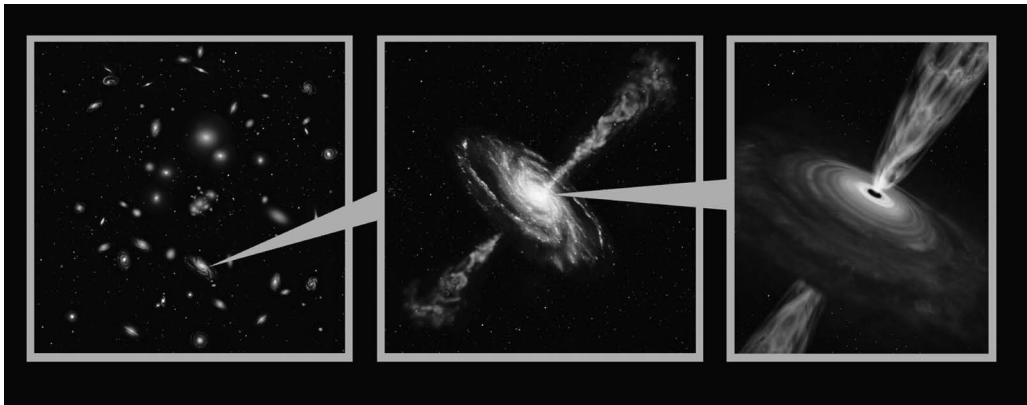


図1 銀河の存在している環境（左）が、銀河の進化（中）、さらには銀河中心にある巨大ブラックホールの活動（右）と互いに密接な関連をもっていると考えられる（画像提供：国立天文台）。

になってきました^{7), 8)}。

私たちは、SMBHの質量に着目して、質量とクラスタリング度との相関を探りました。そのために、Japanese Virtual Observatory (JVO)*¹を用いてアーカイブデータにアクセスすることで、さまざまな領域で観測された多数のAGNについて、その周囲の銀河サンプルを取得し、クラスタリング解析を行いました。クラスタリング度のSMBH質量への依存性については、ShenらがAGNの自己相関関数による研究を行っていますが、明確な傾向は発見できていませんでした⁹⁾。私たちは銀河との相互相関を用いて、クラスタリング度とSMBH質量に正の相関があることを発見しました。

2. データと解析方法

Virtual Observatory (VO) は、世界各国のさまざまな天文データベースにシームレスにアクセスし、大規模データの解析を促進するためのシステムであり、日本では国立天文台がJVOの開発・運用を行っています。VOを用いて白崎らは2011年に、SDSS, UKIDSS*²のカタログに加え、すばる望遠鏡Suprime-Camの画像データの蓄積

を利用して、AGNと銀河の相互相関を求めました¹⁰⁾。白崎らの研究では、それ以前の研究よりはるかに大きなAGNサンプルを用いることで、赤方偏移 $z=3$ までのAGNに対してAGNと銀河の相互相関を求めています。

今回は、さらに多数のAGNサンプルを用いるとともに、SMBH質量との関連に着目して研究を行いました。AGNのサンプルとしては、ShenらがSDSSのデータからブラックホール質量を求めたAGNカタログ¹¹⁾に加え、AGN成分の弱い銀河に対してもブラックホール質量を求めたGreeneらのサンプル¹²⁾を用いました。これらのカタログでは、スペクトルに現れる $H\beta$ あるいは $Mg II$ の輝線の半値幅と光度から、SMBH質量(M_{BH})を推定しています。銀河サンプルはUKIDSSのKバンドのデータ¹³⁾を用いました。銀河データの取得に際しては、VOを用いて銀河カタログからAGN周辺のデータだけを取得することで、効率化を図りました。JVOでは、コマンドラインからVO検索を行うコマンドラインツールを開発しており、これを用いることで今回のようなデータ取得が容易に行えるようになっています。

*¹ JVOについて詳しくは、2015年8月（第108巻第8号）の、大石雅寿氏485頁、白崎裕治氏498頁の記事をご覧ください。

*² UKIRT Infrared Deep Sky Survey

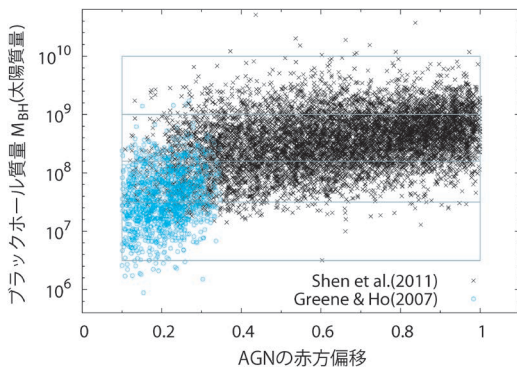


図2 解析に用いたAGNの、赤方偏移とSMBH質量 (M_{BH})。青がGreene & Ho (2007) のサンプルで、黒がShen et al. (2011) のサンプル。水平線で示した四つの質量範囲ごとにデータを集計して、クラスタリング度の質量依存性を見た。

用いたAGNサンプルの赤方偏移とSMBH質量を示したものが、図2になります。今回は赤方偏移 $z=0.1$ から $z=1$ のAGNを対象とし、用いた領域にある計11,335個のAGNのうち、観測データの質の悪いサンプルなどを除外した結果、9,394個のAGNを解析に用いています。

銀河分布の相互相関関数 $\xi(r)$ は、密度 ρ の平均銀河密度 ρ_0 からの超過として定義されます*3。

$$\xi(r) \equiv \frac{\rho(r)}{\rho_0} - 1 \quad (1)$$

これまでの観測から、相関関数はべき乗で近似できることが知られています。

$$\xi(r) = \left(\frac{r}{r_0}\right)^\gamma \quad (2)$$

相関距離 r_0 が、銀河のクラスタリングの程度を表す指標として用いられ、 r_0 が大きいほど、銀河が密集した領域であることを意味します。べき指数 γ は今回は1.8に固定しました。

解析方法については、白崎らの論文で用いられた以下のような手法をとることにより、測光観測

しかない銀河のデータも活用し、さまざまな領域、さまざまな赤方偏移にあるAGNに対して、より暗い銀河を含む銀河とAGNの相互相関を出しました。

まず平均銀河密度 ρ_0 を与える必要がありますが、本研究では、先行研究で得られている銀河の光度関数 $\phi(M; z)$ ^{14), 15)} と検出効率 $DE(m)$ から、

$$\rho_0 = \int_{m_{\text{low}}-DM}^{\infty} \phi(M; z) DE(M+DM) dM \quad (3)$$

として推定しました。検出効率 $DE(m)$ については、関数形は

$$DE(m) = \begin{cases} 1 & (m < m_{\text{th}}) \\ \exp(-(m - m_{\text{th}})^2 / \sigma_m^2) & (m \geq m_{\text{th}}) \end{cases} \quad (4)$$

の式を仮定し、各観測領域について観測で得られた等級分布をもとに、パラメーター m_{th} , σ_m を決めます。

実際に観測から得られるのは、銀河の面密度 $n(r_p)$ であり、ここから射影相互相関関数

$$\omega(r_p) \equiv 2 \int_0^{\infty} \xi(r_p, \pi) d\pi = \frac{n(r_p) - n_{\text{bg}}}{\rho_0} \quad (5)$$

を導出して、相関距離を推定するのですが、元の相互相関関数がべき乗で表される場合、面密度分布も

$$n(r_p) = C(\gamma) \times \rho_0 \times r_p \left(\frac{r_0}{r_p}\right)^\gamma + n_{\text{bg}} \quad (6)$$

と、べき乗+定数の形で書くことができます。今回の解析では、各AGN周囲の領域に対して $n(r_p)$, ρ_0 を出し、 $n(r_p)$ をAGNサンプルで集計した $\langle n(r_p) \rangle$ を次の式

$$\langle n(r_p) \rangle = C(\gamma) \times \langle \rho_0 \rangle \times r_p \left(\frac{r_0}{r_p}\right)^\gamma + \langle n_{\text{bg}} \rangle \quad (7)$$

でフィットすることで、 r_0 (と $\langle n_{\text{bg}} \rangle$) を出しました。この方法だと、観測の深さが異なるさまざま

*3 式中の記号は以下のとおり。式(1) $\xi(r)$: 相互相関関数, r : AGNからの距離, ρ : 銀河個数密度, ρ_0 : 平均銀河密度。式(3) M : 絶対等級, z : 赤方偏移, m : 視等級, m_{low} : 観測等級の下限, DM : 距離係数。式(5) $\omega(r_p)$: 射影相互相関関数, r_p : 射影距離, π : 視線方向の距離, n_{bg} : 背景銀河密度。式(6) $C(\gamma) = \{\Gamma(1/2)\Gamma((\gamma-1)/2)\} / \{\Gamma(\gamma/2)\}$, ここで Γ はガンマ関数。式(7) $\langle \rangle$ はAGNサンプルでの平均。

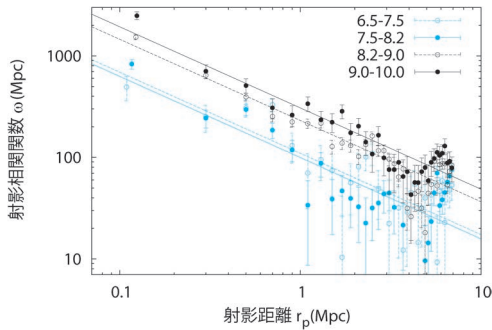


図3 AGNと銀河の射影相互相関関数 $\omega(r_p)$. AGNサンプルをSMBHの質量により、 $10^{6.5-7.5} M_\odot$ (○), $10^{7.5-8.2} M_\odot$ (●), $10^{8.2-9.0} M_\odot$ (○), $10^{9.0-10.0} M_\odot$ (●)の四つのグループに分け、各質量範囲ごとに集計した結果をプロットした。エラーバーは統計誤差。直線はべき関数でフィットした結果。

なデータを使って、測光のみの暗いサンプルまで活用して相関を出せるので、多様なデータを含んでいるVOを用いた解析に適した手法と言えるでしょう。

3. 結果

ブラックホール質量への依存性を明らかにするため、AGNのサンプルをSMBH質量により、 $10^{6.5-10^{7.5}} M_\odot$, $10^{7.5-10^{8.2}} M_\odot$, $10^{8.2-10^{9.0}} M_\odot$, $10^{9.0-10^{10.0}} M_\odot$ の四つのグループに分けて、解析を行いました。各質量範囲にあるAGNについて、周囲の銀河分布を集計し、その結果得られた射影相互相関関数 $\omega(r_p)$ を表したのが、図3になります。各AGNサンプルについて周囲の銀河分布は、べき乗で近似できています。そして、SMBH質量の大きなAGNサンプルにおいては、軽いSMBHより射影相互相関が大きな値を示していることがわかります。

全サンプルに対する相関距離は、 $r_0 = 5.8^{+0.8}_{-0.6} h^{-1}$ Mpcとなり、先行研究で得られた値とほぼ一致する結果となりました。各質量範囲での相関距離 r_0 を求めてみると、質量依存性が見えてきました。図4に示したように、より大質量のブラック

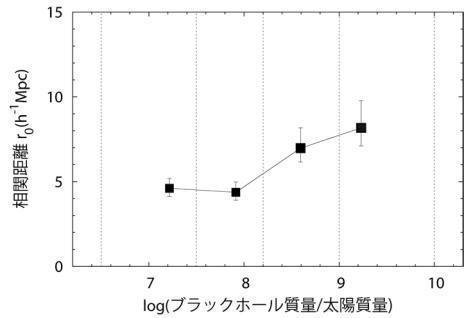


図4 AGN中心ブラックホールの質量 (M_{BH}) と、AGN-銀河相互相関距離 (r_0) の関係。より大質量のブラックホールでは、相関距離が大きく、より銀河の密集した領域にあることがわかる。

ホールをもつAGNでは、相関距離が大きい傾向が確認できます。図4の誤差棒は、光度関数を用いたの ρ_0 の推定の不定性に起因する系統誤差と、 1σ の統計誤差の合計を表しています。

図4の結果は、より大質量のSMBHがより銀河の密集した領域にあることを示しており、すなわちより大質量のハローに属していると考えられます。一方で、 $10^{6.5-10^{7.5}} M_\odot$ のサンプルと $10^{7.5-10^{8.2}} M_\odot$ のサンプルの間には、有意な差は認められませんでした。

SMBH質量には、AGNの赤方偏移や光度によるバイアスがあることも考えられるので、赤方偏移・光度への依存性も確認しました。その結果、今回調べた赤方偏移1以下の範囲では、有意な赤方偏移依存性は見られませんでした。また、相関距離は光度にはほとんど依存せず、光度によらず質量依存性が見られることがわかりました。AGN光度は現在だけのガス降着率で済む一方、SMBH質量は過去の降着量の累積であり、SMBH質量のほうが大域的な環境をより反映している結果と考えられます。また、解析方法の影響を見るため、明るい銀河のみのluminosity limited sampleを用いた解析も行いましたが、その場合も同様の傾向が認められました。

4. 巨大ブラックホール進化の理解に向けて

今回、VOを利用して効率的に多数のAGNと周囲の銀河の観測データを集めることで、大質量のSMBHが銀河の密集度の高い領域にあることが確認できました。このSMBH質量とクラスタリング度との相関は、SMBHの成長が銀河の存在する環境と密接に関連していることを示しています。環境に依存するSMBHの成長プロセスとしては、例えば銀河の合体の影響が考えられます。また、大質量ハローにおいては銀河団ガスの静的な降着が効くとする説もあります^{16), 17)}。

SMBHの具体的な成長機構について明らかにするには、多波長のデータを利用して、周囲のクラスタリングに寄与している銀河の特性などを探ることが有効と考えられます。VOは多様な観測装置によるデータへのアクセスに適しており、これを活用することでSMBHと銀河進化のより詳細な理解が可能になるでしょう。

一方で今回、より低質量のSMBHにおいては、周囲の銀河分布との相関がないことを示唆する結果が得られました。今回の結果だけでは不定性も大きく、大質量側と低質量側で本当に傾向が異なるのかどうか、結論を出すには早計ですが、もしこの傾向が正しいとすれば興味深い特徴といえます。比較的軽いSMBHは、単独の銀河の中だけで進化してきたということかもしれません。あるいは、SMBHは1回の銀河衝突で $10^8 M_{\odot}$ 程度の質量まで成長するのかもしれません。軽い側のサンプルには、銀河団の周辺にある銀河のAGNも含まれていると考えられるので、その影響もあるでしょう。いずれにしても、比較的低質量のSMBHについては、今後のさらなる観測が期待されます。

謝辞

本稿の内容は、筆者らが発表した投稿論文¹⁸⁾に基づいています。この研究は国立天文台の白崎裕治氏、大石雅寿氏、水本好彦氏との共同研究の成果であり、この場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Magorrian J., et al., 1998, AJ 115, 2285
- 2) Ferrarese L., Merritt D., 2000, ApJ 539, L9
- 3) Hopkins P. F., et al., 2006, ApJS 163, 1
- 4) Sijacki D., et al., 2007, MNRAS 380, 877
- 5) Hickox R. C., et al., 2009, ApJ 696, 891
- 6) Coil A. L., et al., 2009, ApJ 701, 1484
- 7) Donoso E., Li C., et al., 2010, MNRAS 407, 1078
- 8) Krumpel M., Miyaji T., Coil A. L., Aceves H., 2012, ApJ 746, 1
- 9) Shen Y., et al., 2009, ApJ 697, 1656
- 10) Shirasaki Y., et al., 2011, PASJ 63, 469
- 11) Shen Y., et al., 2011, ApJS 194, 45
- 12) Greene J. E., Ho L. C., 2007, ApJ 670, 92
- 13) Lawrence, et al., 2012, yCat 2314
- 14) Cirasuolo M. et al., 2007, MNRAS 380, 585
- 15) Kochanek C. S., et al., 2001, ApJ 560, 566
- 16) Keres D., et al., 2009, MNRAS 395, 160
- 17) Fanidakis N., et al., 2013, MNRAS 435, 679
- 18) Komiya Y., et al., 2013, ApJ 775, 43

An AGN-Galaxy Cross-Correlation Analysis Using Virtual Observatory

Yutaka KOMIYA

Research Center for the Early Universe, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

Abstract: It is believed that there are supermassive black holes (SMBHs) at center of every massive galaxies. SMBHs power active galactic nuclei (AGNs). Evolution of SMBH is tightly coupled with the evolution of their host galaxies. We performed a cross-correlation analysis between AGN and galaxies using virtual observatory. We found a positive correlation between clustering amplitude and mass of SMBHs.