

## 2 点相関関数を用いた活動銀河核の住環境への示唆

水野 翔太 (京都大学大学院 理学研究科宇宙物理学教室)

### Abstract

活動銀河核 (AGN) とは、銀河核中心にある巨大ブラックホールに大量のガスが降着し、明るく輝く現象である。AGN の空間クラスタリングの性質は、AGN の存在するダークマターハローの性質を反映するため、AGN の住環境を理解する上で貴重な情報をもたらす。本発表はまず、X 線で選択された AGN の 2 点相関関数の現状についてレビューする。X 線での観測は、AGN の種族のうち多数を占める「隠された AGN」(2 型 AGN) に対しても、完全性が高く効率的な探査を実現する。cosmic variance の影響を避けるためには、広い面積を十分な深さで多波長探査する必要がある。そのような探査領域として、COSMOS と Subaru/XMM-Newton Deep Survey(SXDS) が知られている。相関関数の大きさが 1 となる距離を「相関長」とよび、クラスタリングの強さを表す指針となる。Gilli et al.(2009) は、COSMOS 領域の X 線 AGN を用いて赤方偏移パラメータ  $z \sim 1$  における相関関数を計算し、その相関長を  $r_0 = 8.6h^{-1}\text{Mpc}$  と求めた。これは、同じ赤方偏移における大質量銀河 ( $\geq 3 \times 10^{10} M_{\odot}$ ) の相関長とほぼ同じであった。また、サンプルを 1 型 AGN と 2 型 AGN にわけて調べたところ、それぞれの相関長は誤差の範囲で一致し、両者を同じ種族とする「AGN 統一モデル」と矛盾しない結果となった。さらに  $\Lambda\text{CDM}$  モデルから得られるダークマター相関関数と AGN 相関関数とを比較することにより、AGN の住むダークマターハローの質量の下限値を  $2.5 \times 10^{12} h^{-1} M_{\odot}$  と求めた。SXDS 領域には  $z \sim 1.5$  に大規模構造が存在し、COSMOS より高赤方偏移側での空間相関の調査が可能である。また分光同定率が高く (Akiyama et al. 2013, in prep.)、より大きなサンプルを用いた精度よい議論が可能である。本発表では、我々の進めている、SXDS 領域における AGN 相関関数の研究結果についても報告する。

## 1 Introduction

宇宙には数多くの銀河が存在しているが、どのような場所で銀河が進化してきたのかということは解明されていない。銀河は中心のバルジと円盤、それらをもつダークマターハロー (Dark Matter Halo; DMH) からできている。さらにバルジ中心には超巨大ブラックホール (Super Massive Black Hole; SMBH) があり、SMBH 質量とバルジ質量には強い相関があることが知られている。この事実は、SMBH と銀河が共進化してきたことを示唆している。つまり、銀河進化における謎を解明するためには SMBH の理解が不可欠である。SMBH はガスが降着することによって進化しているが、その際、重力エネルギーを解放して放射エネルギーに転化することにより明るく輝いており、この非常に明るい領域を活動銀河核 (Active Galactic Nucleus; AGN) という。

しかしながら、AGN については分かっていないこ

とが多い。中でも AGN がどのような環境の中で起きているのかということは、積極的に調べられている課題の一つである。そして、AGN クラスタリングや DMH 質量などの AGN の住環境を調べるのに使われている方法が 2 点相関関数である。

AGN 2 点相関関数を求めるためには、AGN の位置情報 (RA-Dec と赤方偏移) を正確に把握していなければならない。初めに行われた AGN クラスタリングの研究は、可視での探査を用いて行われた。このときの AGN 検出には紫外線超過を使っていたが、これではダストに覆われていない 1 型 AGN しか検出されないため、AGN のコンプリートなクラスタリングを議論することはできない。ダストは紫外線を吸収するが、赤外線波長域に再放射している。よって次は中間赤外線での探査が行われ、ダストに覆われている 2 型 AGN も検出できるようになった。しかし、赤外線波長域に放射する天体は AGN に限らずたく

さんあるため、AGN だけを正確に検出するのは困難である。

そして、近年では X 線による大規模探査が行われている。X 線は吸収に強く、他の天体は X 線ほどの高エネルギー放射をすることが少ないため、AGN の検出率が高いのが特徴である。X 線探査に加えて、可視光でのフォローアップにより赤方偏移の同定も進んできており、X 線で選択された AGN を用いた AGN クラスターリングが可能になった。

今までの X 線で選択された AGN クラスターリングの研究により、AGN の住環境に対するいくつかの理解が得られている。Gilli et al.(2005) では、Chandra Deep Field South/North(CDFS/CDFN) 領域の X 線で選択された天体を用いてクラスターリングの議論をし、AGN の相関長を求めている。その値は同じ赤方偏移を持つ早期型銀河の値と同じ程度であった。このことは、AGN が早期型銀河で起きやすいということを示唆する。Croom et al.(2005) では、対象天体がクェーサー (AGN の一種) に限られているが、クェーサーを包む DMH の質量が  $3.0 \times 10^{12} h^{-1} M_{\odot}$  であることを求めている。

本発表では、X 線探査の中でも深い、COSMOS 領域での AGN 相関関数についてレビューする。また、我々が進めている、SXDS 領域での AGN 相関関数についての展望も述べる。以下、ハッブル定数については、 $H_0 = 100h$  [km/s/Mpc] により定義される  $h$  を使うことにする。

## 2 The Sample

COSMOS 領域とは、中心が (RA, Dec)<sub>J2000</sub> = (150.1083, 2.210) の  $1.4 \times 1.4 \text{ deg}^2$  領域を指す。X 線で選択された AGN は 538 天体あり、それらの赤方偏移分布は図 1 のようになっている。平均赤方偏移は  $\bar{z} = 0.98$  であった。これらのサンプルを、可視スペクトルに広輝線があるかどうかによって 1 型・2 型のサブグループに分けると、1 型 AGN が 305 個 (平均赤方偏移  $\bar{z} = 1.45$ )、2 型 AGN が 229 個 ( $\bar{z} = 0.7$ ) であった。

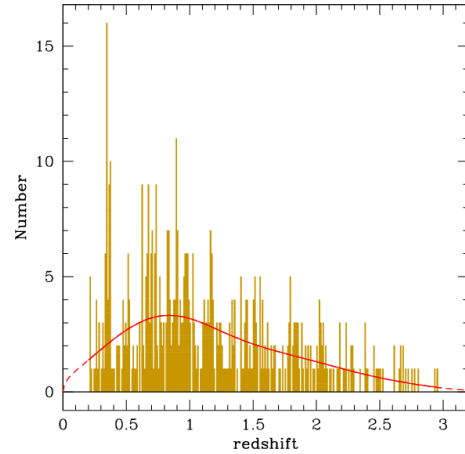


図 1: COSMOS 領域の AGN の赤方偏移分布. 赤線は多項式近似により得られた曲線.Gilli et al.(2009)

## 3 Methods

クラスターリングの性質を求めるのに利用されている手法が、2 点相関関数  $\xi(r)$  である。相関関数は、微小領域  $dV_1$ 、 $dV_2$  に物体が見つかる確率を (1) 式のように表した時に定義される。つまり、平均 (ランダム分布) からの超過を表している。

$$dP = n^2[1 + \xi(r)]dV_1dV_2 \quad (1)$$

ここで  $n$  は平均密度、 $r$  は  $dV_1$ 、 $dV_2$  間の距離を表す。しかし、 $r$  は銀河固有の運動によって正しい値が得られないため、視線方向に積分をした projected 相関関数  $w(r_p)$  を (2) 式で定義する。

$$w(r_p) = \int_{-\pi_{\max}}^{\pi_{\max}} \xi(r_p, \pi) d\pi \quad (2)$$

ここで  $\xi(r_p, \pi)$  は  $r_p$  と  $\pi$  を使って表した 2 点相関関数であり、 $r_p$  と  $\pi$  はそれぞれの天体までの距離を  $d_1$ 、 $d_2$ 、なす角を  $\theta$  として

$$r_p = (d_1 + d_2) \tan \frac{\theta}{2}, \pi = |d_1 - d_2| \quad (3)$$

で定義されている。ここで、2 点相関関数を  $\xi(r) = (r/r_0)^{-\gamma}$  というべき関数 ( $r_0$ : 相関長) で仮定し、 $\pi_{\max} = \infty$  とすると、

$$w_p(r_p) = A(\gamma)r_0^\gamma r_p^{1-\gamma} \quad (4)$$

という形で表すことができる。ここで、 $A(\gamma) = \Gamma(1/2)\Gamma((\gamma-1)/2)/\Gamma(\gamma/2)$  である。 $\pi_{\max}$  の値は、小

さすぎると銀河固有の運動の影響が出てしまい、大きすぎるとノイズが入ってしまう。Gilli et al.(2009) では  $\pi_{\max} = 40h^{-1}\text{Mpc}$  としている。

相関関数はランダム分布からの超過を表すので、相関関数を求めるためにはサンプルのバイアスを考慮したランダム分布を準備しなければならない。Gilli et al.(2009) では、RA-Dec 分布に関してはサンプルの分布をそのまま使い、赤方偏移方向に関しては図 1 の分布を多項式近似したもの (図 1 の赤線) を使ってランダム分布を作っている。相関関数  $\xi(r_p, \pi)$  は Landy&Szalay(1993) に従い、以下の表式により求める。

$$w_p(r_p) = \frac{[\text{DD}] - 2[\text{DR}] + [\text{RR}]}{[\text{RR}]} \quad (5)$$

ここで [DD]、[DR]、[RR] はそれぞれ規格化された Data-Data、Data-Random、Random-Random ペアを表し、以下で定義されている。

$$[\text{DD}] = \text{DD}(r_p, \pi) \frac{n_r(n_r - 1)}{n_d(n_d - 1)} \quad (6)$$

$$[\text{DR}] = \text{DR}(r_p, \pi) \frac{(n_r - 1)}{2n_d} \quad (7)$$

$$[\text{RR}] = \text{RR}(r_p, \pi) \quad (8)$$

DD、DR、RR は、 $(r_p \pm \Delta r_p, \pi \pm \Delta \pi)$  だけ離れた Data-Data、Data-Random、Random-Random ペアの個数を表し、 $n_d$ 、 $n_r$  は Data と Random の総個数である。

AGN 相関関数  $\xi_A$  とダークマター相関関数  $\xi_m$  のずれをバイアス  $b(z)$  で定義する。

$$b(z)^2 = \xi_A(8, z) / \xi_m(8, z) \quad (9)$$

ここで、 $\xi_A(8, z)$  と  $\xi_m(8, z)$  は  $8h^{-1}\text{Mpc}$  での相関関数の値である。 $\xi_m(8, z) = \sigma_8(z)^2 / J_2$  という関係式で表すことができる。 $J_2$  は  $\gamma$  の関数であり、 $\sigma_8(z)$  は現在のダークマターゆらぎの自乗平均  $\sigma_8(0)$  とゆらぎの線形成長率  $D(z)$  を使って、 $\sigma_8(z) = D(z)\sigma_8(0)$  と書ける。バイアスの進化はモデルを決めれば、自動的に決定されるものであり、Gilli et al.(2009) では conserving model を使っている。このモデルによってバイアスは、

$$b(z) = 1 + [b(0) - 1] / D(z) \quad (10)$$

という形で書ける。これより、任意の赤方偏移におけるバイアスが分かるため、式 (9) により  $\xi_A(8, z)$  と相関長が求められることになる。バイアスと相関長の赤方偏移依存性を示したものが、図 2 である。

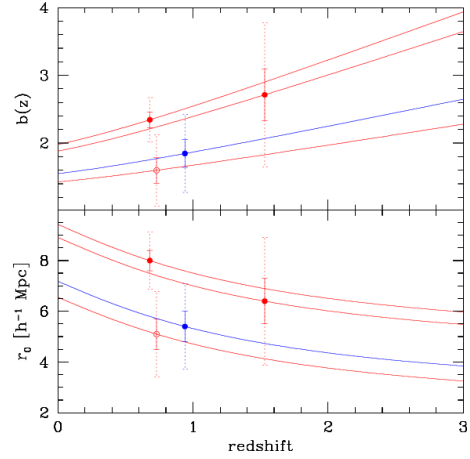


図 2: バイアス  $b(z)$ (上) と相関長  $r_0$ (下) の赤方偏移依存性.Gilli et al.(2009)

## 4 Results

Gilli et al.(2009) の XMM-COSMOS 領域での AGN サンプルの解析結果を以下に示す。538 個の AGN サンプルについて  $w(r_p)$  を計算し、ベキ関数でフィッティングすると、相関長は  $r_0 = 8.65 \pm 0.45h^{-1}\text{Mpc}$  であった。(図 3)

AGN サンプルを 1 型・2 型 AGN に分類して同様の解析を行うと、1 型は  $r_0(1) \sim 7.7 \pm 0.9h^{-1}\text{Mpc}$ 、2 型は  $r_0(2) \sim 7.0 \pm 1.0h^{-1}\text{Mpc}$  であった。

## 5 Discussion

AGN クラスタリングの性質と銀河クラスタリングの性質を比較することで AGN がどのような銀河の中で起きているのか分かる。XMM-COSMOS AGN の平均赤方偏移は 0.98 なので、 $z \sim 1$  の銀河と比べることに意味がある。既知のサンプルの相関長と比較すると、XMM-COSMOS AGN の相関長は  $z \sim 1$  の大質量銀河 ( $\geq 3.0 \times 10^{10} M_\odot$ ) の値と同じであった。

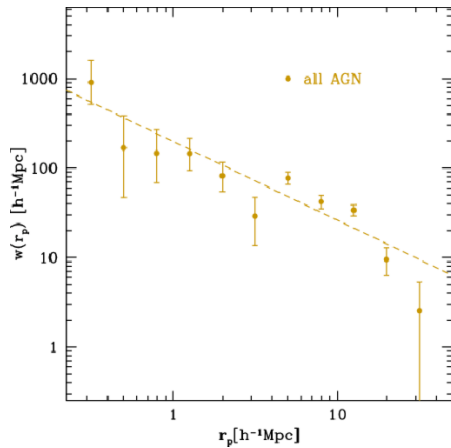


図 3: XMM-COSMOS AGN の projected 相関関数.Gilli et al.(2009)

これは  $z \sim 1$  の AGN が大質量銀河の中で成長していることを意味している。

得られた 1 型・2 型 AGN の相関長をそのまま比較しても赤方偏移が違うため意味がない。しかし、図 2 から同じ赤方偏移における相関長を比べることができ、 $z \sim 0.7$  での 1 型 AGN での相関長は  $r_0 \sim 7.5 h^{-1} \text{Mpc}$  である。これは  $z \sim 0.7$  での 2 型 AGN の相関長と誤差の範囲で一致している。このことは 1 型と 2 型が同じ環境で起きていることを意味しており、AGN の統一モデルに矛盾しない。

大きいスケール ( $\geq 1 h^{-1} \text{Mpc}$ ) では銀河や AGN の相互作用が無視できるので、AGN 相関関数は DMH 相関関数に従うとし、AGN と DMH の相関長は同じであると考えて良い。Gilli et al.(2009) の相関長は  $1 h^{-1} \text{Mpc}$  よりも大きいので、単純に AGN 相関長と  $\Lambda \text{CDM}$  モデルから得られる DMH の相関長を比較することで DMH の最小質量を与えることができる。図 4 には、XMM-COSMOS AGN の個数密度と相関長 (青点)、 $\Lambda \text{CDM}$  モデルから得られた DMH の個数密度と相関長 (赤線) が示してある。この図を使って DMH の最小質量を求めることができ、XMM-COSMOS AGN をもつ DMH の最小質量は  $2.5 \times 10^{12} h^{-1} M_{\odot}$  であった。

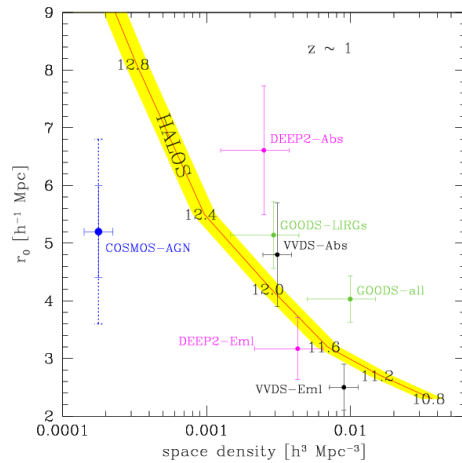


図 4: AGN と DMH の密度-相関長の関係.Gilli et al.(2009)

## 6 Future Work

我々の研究では、深くて、分光同定率が高い SXDS 領域の AGN サンプルを用いて研究を進める。Gilli et al.(2009) との違いは、ランダムサンプルの赤方偏移分布の作り方であり、我々は sensitivity map と光度関数から観測の感度むらを補正することで、よりサンプルのバイアスを考えたランダムサンプルを作る。これを用いて 2 点相関関数の解析をすることで、AGN の住環境に関する精度よい研究を行うことが可能である。

## 7 Reference

- Gilli, R., et al. 2005, A&A, 430, 811
- Gilli, R., et al. 2009, A&A, 494, 33
- Croom, S. M., et al. 2005, MNRAS, 356, 415
- Landy, S. D., & Szalay, A. S. 1993, ApJ, 412, 64
- Peebles, P. J. E. 1980, The Large Scale Structure of the Universe (Princeton: Princeton Univ. Press)