

$z \sim 4$ 星形成銀河の銀河サイズとダークハロー質量

岡村 拓 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

遠方の星形成銀河のサイズ-光度関係には比較的大きな分散があることが知られている(ここでサイズとは、静止系紫外で測った半光度半径を指す)。この分散、すなわち、ある光度でのサイズのばらつきは、ダークマターハローのスピンパラメータのばらつきと同程度 (Shibuya et al. 2015) かそれ以上に大きい (Huang et al. 2013) 可能性がある。この大きな分散の原因を明らかにすることは、銀河円盤の形成過程を理解するために重要である。そこで我々は、 $z \sim 4$ の星形成銀河について、サイズとダークマターハロー質量 (M_{DH}) との関係をクラスタリング解析によって調べた。用いたデータは、3D-HST カタログのうちの、GOODS South 領域の約 100 平方分である。サイズによってサンプルを分けた解析の結果、同じ紫外光度を持つ銀河でも、サイズに応じて M_{DH} は 1 桁程度異なり、大きいサイズの銀河は重い M_{DH} を持つことが分かった。Halo Occupation Distribution などのモデリングでは、 M_{DH} と光度の関係は調べられているが、サイズとの関係は考慮されていない。今回の結果はこうしたモデルの改良に寄与するかもしれない。また、銀河円盤の形成メカニズム、とりわけ、ハローから銀河円盤への角運動量の移動を理解する上で重要な量である、銀河サイズ-ダークマターハロー半径比 ($r_{\text{disk}}/r_{\text{vir}}$) も調べた。Kawamata et al.(2015) では、 $\sim L^*$ という特定の光度の銀河について、赤方偏移によらずこの比が高い値で一定であるという結果を得ているが、今回の研究では、 M_{DH} に応じてこの比がどう変わるかを調べた。

1 Introduction

銀河のサイズは銀河の形成を理解する上で重要な物理量の一つである。銀河のサイズを調べることでその銀河についての形態的な情報だけでなく、角運動量といった力学的な情報も得ることができる。この研究では、銀河サイズは静止系 UV で測った half light radius、等級は静止系 UV での等級を用いる。

遠方の星形成銀河におけるサイズ-光度関係には大きな分散が存在しており、log-normal の形の分布で近似できることが知られている (Bullock et al. 2001)。銀河のディスクのサイズは Mo et al. (1998) によってダークハローのスピンパラメータを用いて表現できることが知られているが ($r_d \propto \lambda r_{\text{vir}}$)、遠方銀河のサイズの分散はスピンパラメータの分散と同等またはそれ以上であるということが分かっている (Shibuya et al. 2015, Huang et al. 2013)。したがってこの分散を説明するためにはスピンパラメータ以外の原因を考える必要がある。

従来のクラスタリング解析や Halo Occupation Distribution (HOD) に関する論文では、銀河の光度と

ダークハローの関係に焦点が当てられ研究されてきた。これは光度の明るい銀河ほど重いダークハローに属するという考えに基づいているが、銀河サイズの影響は考えられていなかった。

そこでこの研究では $z \sim 4$ の星形成銀河 1412 個についてサイズごとのクラスタリング解析を行い、ダークハロー質量が銀河サイズに与える影響を調べた。 $z \sim 4$ という赤方偏移を採用したのは、クラスタリング解析ができるほどサンプルが十分に存在しており、かつ、銀河の形態が近傍ほど複雑でないという理由である。用いたデータは 3D-HST というカタログの内、多バンドの photometric データが存在している the Great Observatories Origins Deep Survey Southern fields (GOODS South) の領域約 100 平方分である。

光度を等しくして、サイズごとにビン分けしてクラスタリング解析を行った結果、ダークハロー質量と銀河サイズには正の相関が見られ、サイズの大きい銀河ほど重いダークハロー質量に属するという傾向が見られた。ダークハロー質量 1 桁程度の変化に

対して銀河サイズも約 1 桁程度異なっていた。今回の結果は銀河形成のモデルに対し改良を加えられる可能性を示唆している。

また銀河サイズ-ダークマターハロービリアル半径比 (r_{disk}/r_{vir}) という物理量のダークハロー質量への依存性調べた。Mo et al. (1998) によるとこの量は銀河とダークハローの比角運動量と関わっており ($r_d/r_{vir} \propto j_d/m_d\lambda$)、ダークハローから銀河円盤への角運動量輸送を調べる上で重要である。Kawamata et al. (2015) では典型的な UV 光度 $\sim L^*$ を持つ銀河について広い赤方偏移で $\sim 3.3\%$ という値で一定であったが、今回の結果ではダークハロー質量約 2 桁の範囲に渡って 1σ の範囲内で一定であることが分かった。これはダークハローから銀河への角運動量輸送がダークハロー質量に大きく依存しない可能性を示唆している。

2 Sample

我々が今回用いたサンプルは 3D-HST カタログの GOODS South 領域の $z \sim 4$ の星形成銀河 1412 個である。3D-HST カタログは HST/WFC3 の $J_{125}, H_{140}, H_{160}$ バンドでのスタッキング画像を元に銀河を検出し、紫外から赤外までのバンドのデータと合わせて構成されている。豊富なバンドのデータから SED fitting による photo- z も求められており、今回の銀河の赤方偏移はこの photo- z を使用した。クラスタリング解析では銀河の検出限界が場所に寄らず一様であることが要求されるため、今回の解析では GOODS South の領域の内、deep、ERS の領域約 100 平方分を解析に利用した。また completeness の問題から $M_{UV} < -18$ の銀河のみを解析に使用している。

3 Method

3.1 Analytic modeling of galaxy sizes

Mo et al. (1998) によると銀河のディスクのサイズ r_d は以下のように表される。今回の研究では銀河

は円盤銀河とし、ディスクのサイズが銀河のサイズを表すと考えている。

$$r_d = \frac{1.678}{\sqrt{2}} \frac{j_d}{m_d} \lambda r_{vir} \quad (1)$$

ここで j_d, m_d はそれぞれ銀河とダークハローの角運動量比、質量比を表しており、 λ はダークハローのスピパラメータで $\lambda = J|E|^{1/2}G^{-1}M^{-5/2}$ である。ここで J はダークハローの角運動量、 E はダークハローの全エネルギーである。また r_{vir} はダークハローのビリアル半径を表す。

3.2 Observed size distribution

実際に観測された銀河サイズの分散とスピパラメータ λ の分布を図に表すと図 1 のようになった。すべて log-normal で fit して表してある。青線は N 体シミュレーションによるスピパラメータの分布を表し $\sigma \sim 0.5$ 。赤線が今回の銀河サイズのデータであり $\sigma \sim 0.69$ 。緑線は Huang et al. (2013) の銀河サイズのデータであり $\sigma \sim 0.8$ である。Shibuya et al. (2015) のデータはここには示していないが $\sigma \sim 0.6$ である。この図からスピパラメータの分散よりも実際の銀河サイズの分散は大きく、式 1 の λ 以外の分散を考慮する必要があると考えられる。

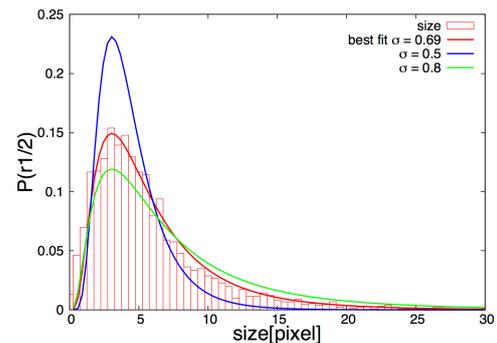


図 1: スピパラメータと銀河サイズの分散

3.3 Angular correlation function

3.3-3.5 章では観測した 2 体角度相関関数からダークハロー質量を求める手順を示す。

銀河の空間的な不均一の程度を調べる方法として 2 体角度相関関数を用いる。2 体角度相関関数 $\omega(\theta)$ は Landy & Szalay(1993) により、以下の表式により求める。

$$\omega_{obs} = [DD(\theta) - 2DR(\theta) + RR(\theta)]/RR(\theta) \quad (2)$$

$DD(\theta)$, $DR(\theta)$, $RR(\theta)$ はそれぞれ、銀河-銀河、銀河-ランダム、ランダム-ランダム天体での角度 θ 離れた場所のペアの数である。ここで真の 2 体相関関数 $\omega(\theta)$ は冪の形で表されると仮定する。

$$\omega(\theta) = A_\omega \theta^{-\beta} \quad (3)$$

今回の研究では $\beta = 0.8$ とする。

観測量 $\omega_{obs}(\theta)$ は観測領域を全天だと思って計算した量なので、真の $\omega(\theta)$ とはずれが生じる。これを補正するのが integral constraint, C (Groth & Peebles 1977) である。以下の式で与えられる。

$$\omega(\theta) = \omega_{obs}(\theta) + C \quad (4)$$

$$C = \frac{\sum RR(\theta) A_\omega \theta^{-\beta}}{\sum RR(\theta)} \quad (5)$$

3.4 Correlation length

上のようにして A_ω を求めたら次にそれを相関長 r_0 に直す。3 次元相関関数 $\xi(r)$ と相関長 r_0 は冪の形でよく表される。

$$\xi = (r/r_0)^{-\gamma} \quad (6)$$

相関長 r_0 と A_ω は Limber equation (Peebles 1980) で関係づけられている。

$$A_\omega = \frac{kr_0^\gamma \int_0^\infty F(z) D_\theta^{1-\gamma}(z) N(z)^2 g(z) dz}{[\int_0^\infty N(z) dz]^2} \quad (7)$$

$F(z)$ は $\xi(r)$ の z 依存性を表しており、 $D(z)$ は angular diameter distance、 $N(z)$ は銀河の赤方偏移分布、 $g(z) = \frac{H_0}{c} \{(1+z)^2(1+\Omega_0 z + \Omega_\Lambda [(1+z)^{-2} - 1]^{1/2})\}$ 、 k は定数で $k = \sqrt{\pi} \Gamma[(\gamma-1)/2] / \Gamma(\gamma/2)$ である。冪の指数 β, γ は次のように関係づけられる。

$$\gamma = \beta + 1 \quad (8)$$

今回は銀河の赤方偏移の分布 $N(z)$ として 3D-HST の photo-z を用いた。

3.5 Bias and Dark halo

$\xi(r)$ とダークマター相関関数 $\xi_{dm}(r)$ の比を銀河-ダークマターバイアス b_g として表す。

$$b_g^2 \equiv \xi(r)/\xi_{dm}(r) \quad (9)$$

またダークマターハローとダークマターとの相関の比をダークハローバイアス b_{DM} として表す。 b_{DM} は Mo & White (2002) によると次のように表される。

$$b_{DM} = 1 + \frac{1}{\delta_c} \left[\nu'^2 + b\nu'^{2(1-c)} - \frac{\nu'^{2c}/\sqrt{a}}{\nu'^{2c} + b(1-c)(1-c/2)} \right] \quad (10)$$

ここで ν' がダークハロー質量の関数、 a, b, c は定数でそれぞれ $a = 0.707, b = 0.5, c = 0.6$ 、 $\delta_c \approx 1.69$ は質量ゆらぎが崩壊する臨界値である。上の式によって求めた r_0, γ から b_g が求まり、一方 Λ CDM より b_{DM} がダークハロー質量の関数として予想できる。ここで $b_g = b_{DM}$ を仮定することでダークハロー質量を求めることができる。

4 Results

4.1 Size - Halo mass relation

銀河のサイズについて、各ビンの光度が等しくなるよう図 2 のように 4 つのビンに分けてクラスタリング解析を行い、上記の式を用いてダークマターハロー質量を求めた。図 3 のように銀河のサイズとダークハロー質量には正の相関が見られ、サイズの大きい銀河ほど重いダークハローに属することが分かった。また、銀河サイズが 1 桁程度しか変化していないにも関わらずダークハロー質量も約 1 桁程度変化している。

4.2 Size - Virial radius

求めたダークハロー質量を元にして銀河サイズ、ビリアル半径比のグラフを描いてみると図 4 のようになった。光度が等しい、約 2 桁程度のダークハロー質量の範囲の銀河に対して、エラーが大きいが大いので強い制限ではないが、 $r_d/r_{vir} = const.$ と矛盾しないという結果が得られた。

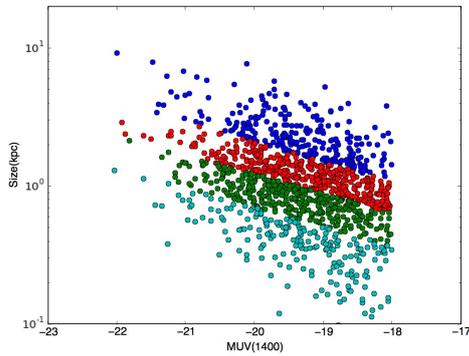


図 2: 銀河サイズによるビン分け

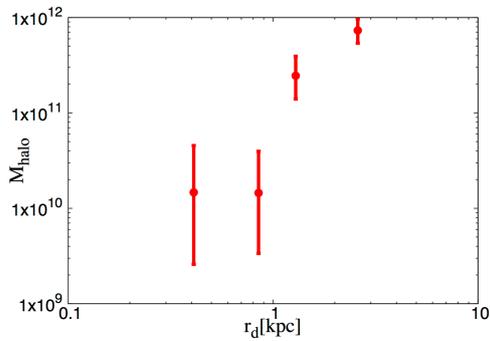


図 3: 銀河サイズとダークハロー質量

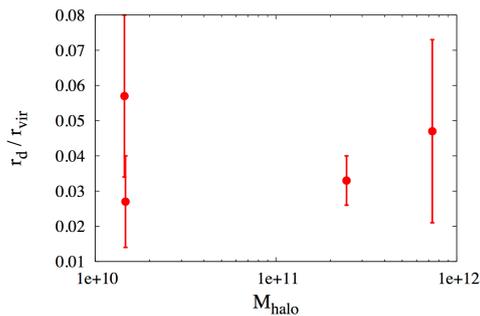


図 4: 銀河サイズ-ビリアル半径比

5 Discussion

今回の結果から銀河サイズが 1 桁程度変化すればダークハロー質量も 1 桁程度変化する可能性がある

ということが示された。式 1 から分かる通り銀河サイズはビリアル半径に比例しているため、銀河サイズはダークハロー質量の $1/3$ 乗に比例する。したがって銀河サイズの変化だけでダークハロー質量が 1 桁程度変化するのであれば、サイズ-光度関係におけるサイズの分散は十分説明可能であり、銀河サイズの違いによるダークハロー質量の分散が銀河サイズの分散に寄与している可能性は大きいと考えられる。しかしこの分散を定量的に説明するためにはダークハローの質量分布や j_d/m_d の分布の情報などが必要であり、現時点では定量的な説明は難しい。また従来のクラスタリング解析や Halo Occupation Distribution (HOD) に関する論文では、銀河の光度とダークハローの関係に焦点が当てられ研究されてきたが、銀河サイズの影響は考えられていなかった。しかし今回の結果を見るとサイズの変化により、ダークハロー質量大きく変化しており、銀河サイズの影響をモデル入れることでモデルの改良ができると考えられる。

Kawamata et al (2015) では典型的な UV 光度を持つ銀河について $z = 2.5 \sim 9.5$ という広い赤方偏移の範囲で $r_d/r_{vir} = 3.3 \pm 0.1\%$ という一定の値を持つことが示されているが、今回の結果では、観測エラーは大きいですが、 r_d/r_{vir} は広いダークハロー質量の範囲でほぼ一定であった。ダークハローから銀河への角運動量輸送はダークハロー質量に大きく依存しないのかもしれない。

Reference

- Bullock.J.S, Dekel.A, & Kokatt.T.S 2001, Apj, 555, 240
- Groth.E.J, & Peebles.P.J.E 1977, Apj, 237, 76
- Huang.K.H, Henry.C.F, & Swara.R 2013, Apjs, 765, 68
- Kawamata.R, Ishigaki.M, & Shimasaku.K 2015, Apj, 804, 103
- Landy.S.D. & Szalay 1993, Apj, 412, 64
- Lee.K.S, Giavalisco.M, & Gnedin.O.Y 2006, Apj, 624, 63
- Mo.H.J, & White.S.D.M 1998, MNRAS, 336, 112
- Mo.H.J, & White.S.D.M 2002, MNRAS, 295, 319
- Shibuya.T, Ouchi.M, & Harikane.Y 2015, submitted to ApJS
- Skelton.R.E, Whitaker.K.E, & Momcheva.I.G 2014, Apj, 214, 24
- Yoshida.M, Shimasaku.K, & Ouchi.M 2008, Apj, 679, 269