

表面測光による $z \sim 1$ の楕円銀河の詳細な形状分析

満田 和真 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 M2)

Abstract

我々は Hubble Space Telescope (HST) Cluster Supernova Survey で得られた $z \sim 1$ の銀河団の楕円銀河について等面輝度形状の詳細な分析を行っている。近傍の楕円銀河は等面輝度線 (コントア) の歪みから Boxy 型, Disky 型に分類され, その違いは楕円銀河の形成過程に起因すると考えられており, Boxy 型は質量が大きく速度分散が卓越するが, Disky 型は比較的軽く回転運動が卓越するなど質量や力学構造との関係があり, Boxy 型には X 線放射が付随する。このようなことから, Boxy 型はガスの少ない衝突合体 (dry merger) で速度分散が卓越した系となることで形成され, また Disky 型はガスの多い衝突合体 (wet merger) でガスの角運動量で回転が卓越した系となることで形成されるという説が有力である。ところが遠方において, 上記のような近傍の観測結果と比較できる詳細な分析結果がなく, 楕円銀河の形状や力学構造がいつ, どのようにして形成され, 進化してきたかはよくわかっていない。遠方銀河は視直径と面輝度が小さく, これまでは詳細に形状を分析できる質の高いデータを得るのが難しかったためであり, また, 遠方銀河詳細な形状を分析するのに最適化された手法がなかったためである。しかし, 我々のチームは HST の撮像データの中でも, 何枚もの画像を他の HST データよりも精度よく足し上げ, 詳細な形状の分析に耐えうる高品質のデータを作成した。そこで我々は, 赤方偏移 1 程度の楕円銀河について詳細な形状を分析するために, 遠方楕円銀河の形状分析に最適化された表面測光の手法を構築してきた。前述の HST データにおいて分光によって赤方偏移が決定している $z \sim 1$ の早期型銀河のうちの 29 個について, 開発中の表面測光の手法でコントアの歪みを測定したところ, 最も暗いものを除く 28 個についてはコントアの歪みを測定でき Boxy 型, Disky 型に分類できた。今後, サンプルを増やし, 近傍の楕円銀河や理論モデルと比較することで Boxy 型, Disky 型の形成過程を探っていく。今回は, これらの楕円銀河のコントアの歪みを測定した結果を報告する。

1 Introduction

近傍の楕円銀河は等面輝度線 (コントア) の歪みにより, Boxy 型と Disky 型に分類される (図??)。Boxy 型は質量が大きく, 速度分散が卓越し (図??), X 線や電波の放射を伴う傾向がある一方, Disky 型は質量が比較的軽く, 回転が卓越し (図??), X 線や電波の放射がない傾向がある。(Bender et al. 1988, Bender et al. 1989, Kormendy & Bender 1996, Faber et al. 1997).

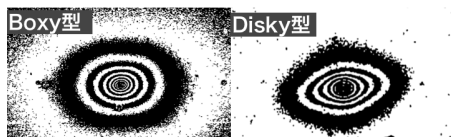


図 1: Box 型, Disk 型楕円銀河のコントア (Bender et al. 1988)

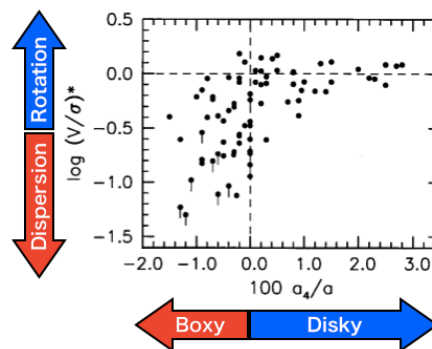


図 2: Boxy 型, Disky 型と力学構造の関係 (Kormendy & Bender 1996)

Boxy 型, Disky 型の違いは楕円銀河の形成過程によって生じると考えられており, Boxy 型はガスの少ない銀河同士の合体 (dry merger) によって星の速度分散が卓越した系となることで, また Disky 型はガス

の多い銀河の合体 (wet merger) によってガスの角運動量が残って円盤のような系になることで形成されるということが考えられている (Khochfar & Burkert 2005).

また近年の近傍楕円銀河の面分光による研究では楕円銀河の内部力学構造を調べることにより, 系の角運動量の小さい Slow Rotator (SR) と角運動量の大きい Fast Rotator (FR) に分類できることがわかってきた (Emsellem et al 2007). 楕円銀河の形状と力学構造は関係があり, SR は Boxy 型, FR は Disky 型に対応する. SR と FR を作り分ける理論計算から SR と FR の割合は赤方偏移 $z \sim 2$ から 0 にかけて変化することが予想され, 星質量の大きな ($> 10^{11} M_{\odot}$) 銀河については SR と FR の比が逆転するとされている (Khochfar et al. 2011).

このように, 近傍楕円銀河の形状や内部力学構造が詳しく研究されており進化についても理論的に調べられている一方, 遠方の楕円銀河については近傍の結果と比較できる詳細な分析結果がなく, Boxy, Disky といった楕円銀河の形状や SR, FR といった力学構造がいつ, どのように形成され進化してきたのかはよくわかっていない. ひとつの理由としては, 遠方銀河は視直径と面輝度が小さいために, これまでは詳細に形状を分析できるような質の高いデータを得るのが難しかったためである.

しかし近年, ハッブル宇宙望遠鏡 (HST) による高解像度, 高深度の良質なデータが得られつつあり, 特に我々のチームは HST Cluster Supernova (SN) survey (Dawson et al. 2009) において HST の撮像データの中でも, 何枚もの画像を他の HST のデータよりも精度よく足しあげた高品質のデータを作製した (Mayers et al. 2012). そこで, 本研究ではこのデータを使って $z \sim 1$ 程度の遠方銀河について詳細な形状を分析する表面測光の手法を構築, 実行し楕円銀河の形状の進化を調べる.

今回は, $z \sim 1.2$ の銀河団の楕円銀河について, 現在はまだ予備的な結果ではあるが, コントアの歪みを測定し, Boxy 型, Disky 型に分類した結果を紹介する.

2 Sample and Data

本研究には HST Cluster Supernova (SN) survey (Dawson et al. 2009) で得られたハッブル宇宙望遠鏡の撮像データを用いた. このデータは HST の Advanced Camera for Surveys (ACS) によって得られたものであり, F775W と F850LP の 2 つのフィルターで撮像された. 本研究ではより深く撮像された F850LP のデータを使用した. 今回の $z \sim 1.2$ の銀河団 Y については 1-5 万秒程度の積分時間であり, 典型的な point spread function (PSF) は $0.1''$ FWHM 程度である.

また今回解析の対象とする銀河は分光によって赤方偏移が測定されたものである (Demarco et al. 2007). このような銀河のうち Postman et al. 2005 による形態分類で T-type が 0 以下の早期型銀河について形状分析を行った. 最終的に対象とした銀河は 29 個となった.

3 Method

我々はこれまで近傍楕円銀河に用いられてきた表面測光の手法を応用し, 遠方楕円銀河に最適化された手法を開発した. 遠方銀河のコントアの歪みなどの詳細な形状の研究例がなく, これまでの手法は遠方銀河にマッチしたものではなかったためである.

楕円銀河の詳細な形状, 特にコントアの歪みを測定するために, 撮像データから得たコントアに楕円をあてはめる解析手法を応用した. この手法では, あてはめた楕円 ($x = a \cos \theta, y = b \sin \theta$) からのコントアの歪みを $\Delta r_{\theta} = \sum_n (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta)$ と展開し, a_4 の値で評価する (図??). a_4 は楕円の長短軸に対して対称なゆがみを表す最低次の係数であり, これが負であれば Boxy, 正であれば Disky 型に分類される (Bender & Möllenhoff 1987).

3.1 How to determine contours

面輝度が低く, 視直径の小さい銀河ではフォトンノイズの影響でコントアが精度よく決められない恐れがあるため, できるだけ多くのピクセルからコントアを決定してノイズの影響を抑えた.

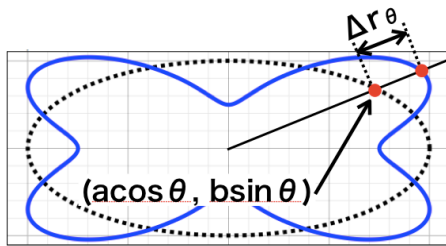


図 3: 面輝度の歪みの測定方法

コントアは、コントアを決めるための円環の決定、その円環からコントアを定義するという二段階を経て決定する。一つめの段階では銀河中心から外側までの一連の円環を太さが2ピクセル以上となるように決定する(図??)。次の円環を決定する際に各ピクセルの flux を使うことで、Signal-to-Noise Ratio(SNR)が低い外側ではノイズの影響で円環に入るピクセルの数すなわち独立な自由度が増え、SNR は自由度の平方根で上がるためランダムノイズの影響を抑えることができる。コントアの高さは各円環内のピクセルの flux の平均とする。

二つめの段階では、以下のように一連の円環からコントアを定義するサンプル点を決定する(図??)。(i) 楕円 ($x = a \cos \theta, y = b \sin \theta$) の θ が一定間隔 $\Delta\theta$ となるような放射線を引き、 $\Delta\theta$ の幅を持つ扇形のピンを定義する。円環内のピクセル数が30個未満のときはピンの数がピクセル数の3倍となるようにし、それ以外では90のピンとなるように $\Delta\theta$ を定める。(ii) 円環の定義上、ひとつのピンに必ず2つ以上のピクセルが入り、それぞれのピクセルの銀河中心からの距離 r_i と flux z_i の関係を直線で fit し、その直線から面輝度の高さ z を与える r を計算する。(iii) 最後にそのピンの polar angle を使って r を x, y に直してサンプル点とする。(ii) と (iii) の操作をすべてのピンについて行ってコントアを定義する。また、各ピクセルのフォトンノイズ ($\sigma_{z,i}$) からサンプル点の座標の誤差 (σ_r) への誤差伝播を計算する。

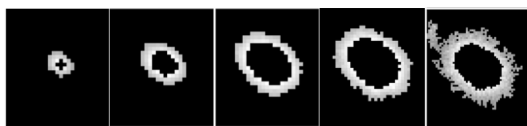


図 4: 一連の円環の例

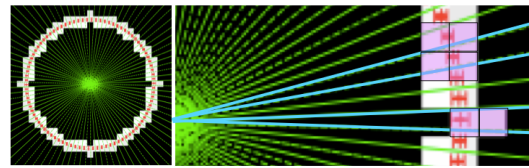


図 5: 左: 円環を扇形のピンに分け、各ピンの中でコントアを定義するサンプル点を決める。右: 各ピン(青い線で挟まれた部分)には必ず2ピクセル以上(ピンクのピクセル)が入る。

3.2 Deviated ellipse fit

決定されたコントアに、楕円と3次から6次までの歪み (a_3-a_6, b_3-b_6) を同時に最小二乗フィットする。フィットするパラメータは楕円の中心 (x_0, y_0)、PA、半長軸径 a, q の5つに加えて a_3-a_6, b_3-b_6 の計13個である。0から2次の歪みは楕円の5つのパラメータと関係するためこのフィットには含めない。最小二乗の式は $\chi^2 = \frac{(x_j - x_e)^2 + (y_j - y_e)^2}{\sigma_{r,j}^2}$ であり、 x_j, y_j は各サンプル点の x, y 座標 x_e, y_e はフィットする楕円の座標、また $\sigma_{r,j}$ は各サンプル点の座標の誤差である。

フィットの手順としてはまず楕円の5つのパラメータを掃いて χ^2 が最小となるものを調べ、それを初期値として、歪みまで含めた13個のパラメータについて Downhill Simplex 法で χ^2 が最小となるものを求めることを3回繰り返す。さらに a_0-a_6, b_0-b_6 の13個のパラメータについても再度 Downhill Simplex 法で χ^2 が最小となるものを求め、これを3回繰り返す。このようにして最終的な楕円と歪みのパラメータを決定した。

3.3 Error estimation

楕円のパラメータと歪みのパラメータの誤差は Monte-Carlo シミュレーションで推定する。コントア上の各サンプル点に分散 $\sigma_{r,j}$ の Gaussian 統計に従うランダム誤差を与え、誤差を与えたコントアに deviated ellipse fit を行う。これを100回繰り返し、最終的に各パラメータの r.m.s. を誤差とした。

4 Results

HST Cluster SN Survey の銀河団 Y について、前述の表面測光の方法でコントアの歪みを測定したところ、測定対象の 29 個の早期型銀河について、K バンドでもっとも暗い銀河 (ID=248 in Demarco et al. 2007) 以外の 28 個についてコントアの歪み (a_4) を測ることができた。図?? は 2 番目に暗い銀河 (ID=149 in Demarco et al. 2007) の a_4 の radial profile である。

また、 a_4 の測定ができた 28 個の銀河について 0.5 半光度半径における a_4/a と ellipticity(1-q) をプロットしたものが図?? である。Kormendy & Bender 1996 などの近傍の結果と同様に V 字の特徴が見られ、これまでの近傍楕円銀河の観測と比べられる程度に a_4 を測定できていると考えられる。

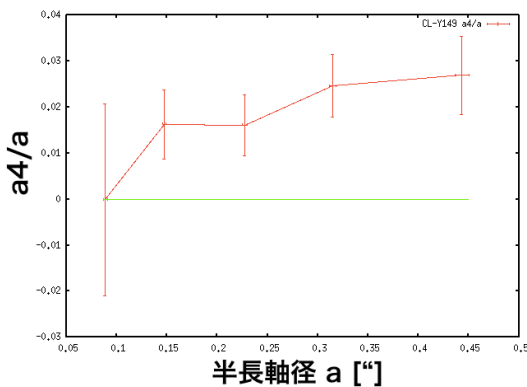


図 6: 2 番目に暗い銀河の a_4 radial profile

5 Conclusion

本研究では楕円銀河の形成・進化の過程を探るため、表面測光の手法を使って近傍楕円銀河の研究と比較できるような、詳細な形状の分析を $z \sim 1$ の楕円銀河について行い予備的な結果を得た。

遠方銀河の詳細な形状の分析に最適化した表面測光の手法を開発し HST Cluster SN survey で得られた高解像度、高深度の撮像データに適用した。

今回は HST Cluster SN survey の銀河団のうちの銀河団 Y の早期型銀河について解析を行った。29 個

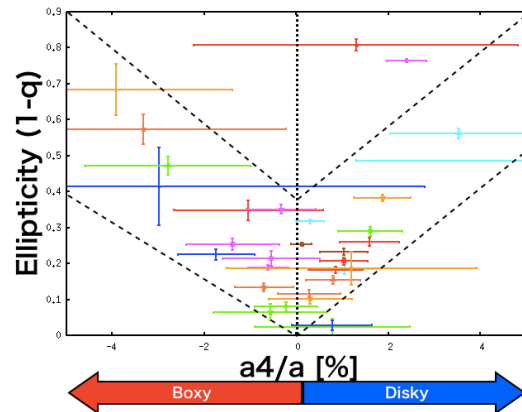


図 7: 横軸: a_4/a [%], 縦軸: ellipticity(1-q).

の早期型銀河のうち K バンドで最も暗い銀河以外は a_4 を測定することができた。

今後は a_4 と他のパラメーターとの関係を調べると同時に他の銀河団の早期型銀河についても測定を行って統計的な議論を行い、近傍の結果との比較や進化について調べていく予定である。

Reference

- R.Bender & C.Möllenhoff, 1987. A&A.177.71
- R.Bender, S.Döbereiner & C.Möllenhoff, 1988. A&AS.74.385
- R.Bender, P.Surma, S.Döbereiner, C.Möllenhoff & R.Madejsky, 1989. A&A.217.35
- K.S.Dawson, G.Aldering, R.Amanullah et al., 2009. AJ.138.1271
- R.Demarco, P.Rosati, C.Lidman et al., 2007. ApJ.663.164
- E.Emsellem, M.Cappellari, D.Krajnovic, et al., 2007. MNRAS.379.401
- S.M.Faber, S.Tremaine, E. A.Ajhar et al., 1997. AJ.114.177
- S.Khochfar & A.Burkert, 2005. MNRAS.359.1379
- S.Khochfar, E.Emsellem, P.Serra et al., 2011. MNRAS.417.845
- J.Kormendy & R.Bender, 1996. ApJ.464.L119
- J.Kormandy, D.B.Fisher, M.E.Cornell & R.Bender, 2009. ApJS,182.216
- J.Meyers, G.Aldering, K.Barbary et al., 2012. ApJ.750.1
- M.Postman, M.Franx, N.J.G.Cross et al., 2005. ApJ.623.721