



平成 27 年 3 月 9 日
京 都 大 学
東 京 大 学

丸い円盤銀河の出現時期は 70 億年前？

概要

京都大学、東京大学、国立天文台の研究者からなるチームは、ハッブル宇宙望遠鏡の撮像データを解析することによって、丸い円盤銀河が出現した時期が赤方偏移 0.9 付近（宇宙年齢約 60 億年、現在から約 70 億年前）の時代であることを明らかにしました。銀河とは約 1000 億もの星の大集団ですが、現在の宇宙では大別して円盤銀河と楕円銀河の二つのタイプの銀河が存在しています。円盤銀河は丸い円盤構造を持ち、楕円銀河は膨らんだ楕円体構造を持っています。しかし、このような形態が宇宙の歴史の中でいつどのようにできたのかはまだよくわかっていません。本研究では、銀河の形を統計的に調べるというシンプルで直接的な手法によって、丸い円盤銀河が現れてきた時代が、約 70 億年前であることを明らかにしました。

この研究結果は 2015 年 3 月 1 日発行のアメリカ天文学会のアストロフィジカルジャーナル誌に掲載されました。

1. 背景

銀河とは、約 1000 億の星とガスの大集団で、その大きさは 10 万光年くらいです。現在の宇宙では、銀河はその構造と性質によって大きく二つのタイプに分類されています。渦巻き模様の見られる渦巻銀河と、模様の見えない楕円銀河です（図 1）。渦巻き銀河では、星やガスが円盤状に分布しており、円盤銀河とも呼ばれます。また、星やガスはこの円盤の中心のまわりに回転運動しています。一方、楕円銀河は、みかんやレモンのような楕円体をしており、その中で星はランダムな方向に運動しています。また、円盤銀河にはガスが多く含まれ現在でも星が誕生しているのに対して、楕円銀河では星を生み出すガスが欠乏していて星形成が見られません。

宇宙の歴史の中で、いつどのようにして銀河が誕生し成長してきたのかという問題は、現代天文学の重要な研究課題の一つです。銀河は宇宙の初期にはガスだけで、その中で星がだんだん誕生して成長していくと考えられています。このようなガスから星への転換史という観点からの銀河進化の研究は以前から盛んに行なわれています。一方、銀河の形態進化も重要な問題ですが、近赤外線域での角分解能の高い観測が困難であったため、これまでよくわかっていませんでした。

ここ数年の研究で、赤方偏移が 2 付近（約 100 億光年、或いは宇宙年齢 30 億年頃、注 1）の宇宙に存在する星形成の活発な銀河の多くで、ガスの回転運動が見られることがわかってきました。これらの多くは、現在の宇宙の円盤銀河の先祖である可能性が高いと考えられます。そこで、この時代の星形成銀河が円盤状の形をしているのかどうかを調べるという研究を始めました。



円盤銀河(渦巻銀河)
正面から見たところ



円盤銀河(渦巻銀河)
真横から見たところ



楕円銀河

図1 現在の宇宙にみられる銀河

2. 研究手法・成果

この研究で我々が用いた円盤銀河の真の形の推定方法はシンプルで直接的です。赤方偏移2付近の星形成銀河を多数選んで、その見かけの軸比を測定し軸比分布を調べるだけです。もしこれらの銀河が厚みのない丸い円盤形状をしているとすると、これをランダムな方向から見るとみかけの軸比に対する個数分布は平坦になります。現実の銀河円盤には若干の厚みがあることなどから、完全に平坦な分布にはなりません、ほぼ平坦な分布になります。実際、現在の宇宙に存在する円盤銀河のみかけの軸比分布をみるとほぼ平坦です(図2左の黒線で示されたヒストグラム)。この原理を使って、赤方偏移2付近の星形成銀河の軸比分布を調べました。形態を調べるためにはよい角分解能が必須なため、ハッブル宇宙望遠鏡で最近得られた近赤外域での銀河サーベイ撮像観測データを用いました。その結果が図2左の色付のヒストグラムです。明らかに平坦な分布ではなく、現在の宇宙における円盤銀河の分布とは異なっていることがわかります。従って、これらの銀河は「丸い円盤」ではないことを示しています。

どのような形をしているかを定量的に評価するために、三軸不等の楕円体モデルを仮定しこれをランダムな方向から見たときに期待されるみかけの軸比分布を計算し、観測される軸比分布と比較しました。三軸不等楕円体の最も長い軸の長さをA、次に長い軸の長さをBとし、最短軸の長さをCとすると、最頻値として $B/A \sim 0.7-0.8$ 、 $C/A \sim 0.25$ が得られました(図2中)。 $C/A \sim 0.25$ はいわば厚みにあたる量であり、現在の円盤銀河での値とほとんど同じです。しかし現在の円盤銀河では $B/A \sim 1$ つまり「丸い」円盤であるのに対して、これらの銀河は、丸くなく棒状に近い円盤であることがわかりました(図2右)。以上の結果は、Yuma 他(2011, 2012)で報告しました(注2)。

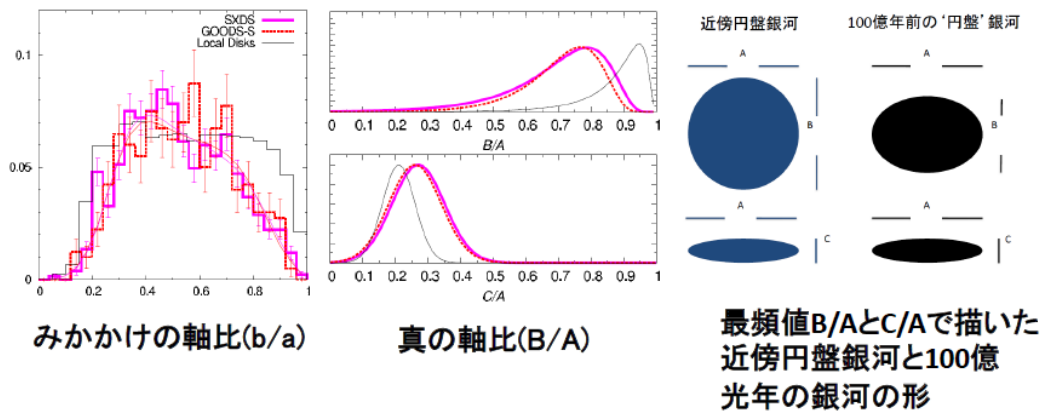
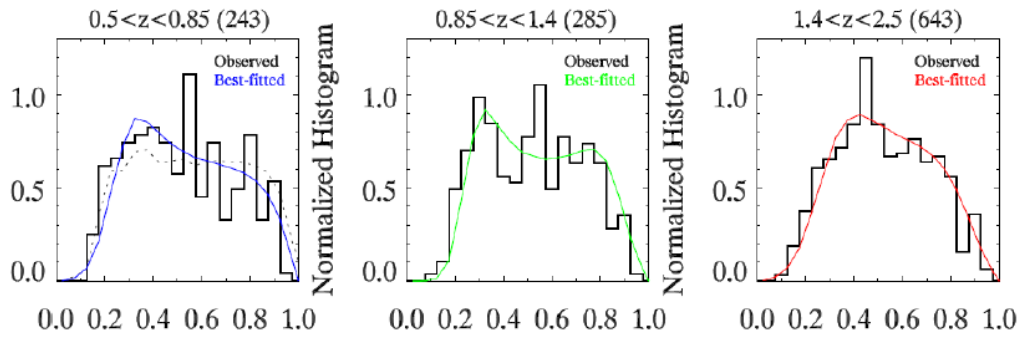


図2 左：約 100 億光年の星形成銀河のみかかけの軸比分布（赤と赤紫のヒストグラムはそれぞれ別の天域を示す）と、この分布を最もよく再現するモデルの分布（薄い実線）。黒線のヒストグラムは現在の宇宙における円盤銀河のみかかけの軸比分布。

中：みかかけの軸比分布を最もよく再現する三軸不等楕円体モデルによる真の軸比分布。 B/A は丸さ加減を表し、1 が完全な円に相当する。 C/A は厚みを表す。（縦軸は任意。）

右：近傍円盤銀河における最頻値 B/A と C/A で描いた形と 100 億光年の銀河でのそれを比べたところ。

さて、そうだとすると、一体「丸い」円盤銀河はいつできたのだろうか？という疑問が湧いてきます。この疑問に答えるのが今回の研究目的です。この目的のために、より赤方偏移の小さい（つまり、より現在に近い）時代の星形成銀河の形を系統的に調べることにしました。赤方偏移 2.5-1.4（109 億光年から 90 億光年、或いは宇宙年齢 26 億年から 44 億年）の時代、1.4-0.85（90 億光年から 71 億光年、或いは宇宙年齢 44 億年から 64 億年）の時代、0.85-0.50（71 億光年から 50 億光年、或いは宇宙年齢 64 億年から 84 億年）の時代と約 20 億年ごとの時代にわけて、各時代において上記と同じ手法を用いて統計的に銀河の形に制限をつけました。図 3 に結果のヒストグラムとこれを最もよく再現するモデルの分布を示します。また図 4 に、このモデルから推定される真の軸比 B/A と C/A の分布の進化を示しました。厚みに相当する C/A の値はほぼ不変で現在の円盤銀河と同じであるのに対して、円盤の歪を表す B/A の最頻値は各時代で 0.81, 0.84, 0.92 となり、最後の値は現在の宇宙に見られる円盤銀河の丸さである 0.95 とほぼ一致していることがわかりました。形の進化は徐々に起こっているようで、ある時代に突然丸くなったとは言えませんが、概ね赤方偏移 0.85 付近になると、もうほぼ丸い円盤になってきたと言ってよいと考えられます。すなわち、現在の宇宙で見られる丸い円盤の出現時期は宇宙年齢 60 億年頃、今から約 70 億年前と言えると考えられます。図 5 は、実際の銀河の画像を用いた進化のイメージ図です。（実際に個別の銀河の形の進化を追うことはできません。）



みかかけの軸比(b/a)

図3 みかかけの軸比分布の進化。右が昔で左が最近の宇宙。

右：赤方偏移 2.5-1.4（宇宙年齢 26 億年から 46 億年の時代）。

中：1.4-0.85（宇宙年齢 46 億年から 66 億年の時代）。

左：0.85-0.50（宇宙年齢 66 億年から 86 億年の時代）。

各パネルの実線は、観測される軸比分布を最もよく再現するモデルの分布。左パネルの破線は現在の宇宙における円盤銀河のみかかけの軸比分布。

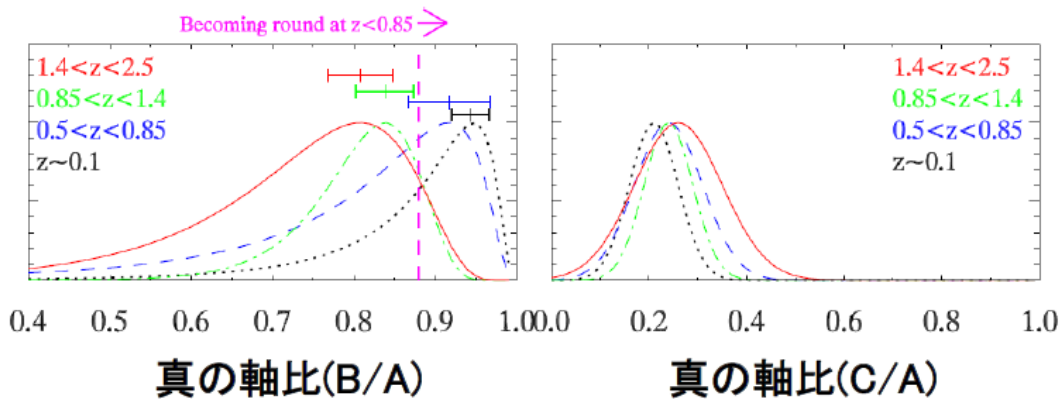


図4 みかかけの軸比分布を最もよく再現するモデルに基づく真の軸比分布の進化。

左：B/A 分布の進化。最頻値 B/A がだんだん丸い値(1)に近づいていくことが見て取れる。

右：C/A 分布の進化。ほとんど進化は見られない。

丸くなる円盤銀河進化のイメージ図

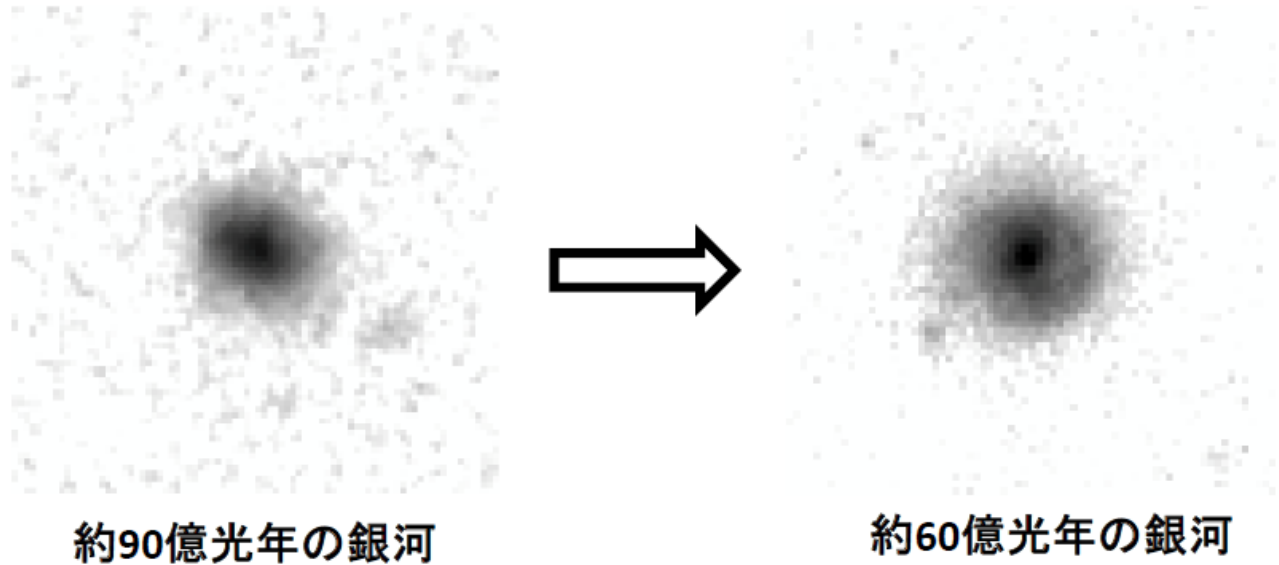


図5 丸くなる円盤銀河の進化のイメージ図

3. 結果の解釈と今後

では、一体どうしてだんだん丸くなってきたのでしょうか？理論的な研究によると、棒状構造を持つ星の系の中心に集中したある程度重い構造があると、銀河内での力学的相互作用によって棒状構造がほどけて、20億年ほど経つと丸くなるというシミュレーション結果があり、このような効果があったのかもしれない。実際、宇宙年齢40–50億年頃は、円盤銀河の中心に存在するバルジ（注3）と呼ばれる構造が発達した時期である可能性が指摘されています。或いはまた、銀河中心に存在する超巨大ブラックホールの成長が激しかった時代とも考えられており、これらの構造の成長に伴って丸い円盤になった可能性が考えられます。他に、銀河相互作用がだんだん頻繁でなくなってきたため、力学的な擾乱がなくなり徐々に丸くなってきた可能性も考えられます。そもそも、なぜ昔は丸くなかったのか？という疑問もあります。昔は銀河相互作用が激しく、乱れた構造をしていたのかもしれない。

まだ形態進化の物理的な原因はよくわかりませんが、より多くのサンプルを用いてさらに詳細な構造の進化を追い、また環境との関係を見ながら形態との関係を探ることで因果関係を知ることができる可能性があると考えられます。バルジの進化と関係する可能性を指摘しましたが、そもそもどうやってバルジができて現在の宇宙に見られるような円盤銀河の構造に進化したのかという問題も大きな課題です。このような銀河構造の進化については、建設の始まった30m望遠鏡によって大きく研究が進展することと期待されます。

<論文タイトルと著者>

When did round disk galaxies form?

Astrophysical Journal vol 801, 2 (2015)

著者

竹内智恵 (元京都大学)、太田耕司(京都大学)、Suraphong Yuma (東京大学)、矢部清人(国立天文台)

<注>

注1 :

ここでは、宇宙論パラメータとして、ハッブル定数 70 km/s/Mpc , $\Omega_M=0.3$, $\Omega_\Lambda=0.7$ を用いました。

注2 :

Yuma, S., Ohta, K., Yabe, K., Kajisawa, M., Ichikawa, T.

Intrinsic Shape of Star-forming BzK Galaxies at $z\sim 2$ in GOODS-N

Astrophysical Journal, vol. 736, 92 (2011)

Yuma, S., Ohta, K., Yabe, K.

Intrinsic Shape of Star-forming BzK Galaxies II. Rest-frame Ultraviolet and Optical Structures in GOODS-S and SXDS

Astrophysical Journal, vol. 761, 19 (2012)

注3 :

バルジ(bulge)とは、円盤銀河の中心部に存在する明るい楕円体構造を指します。図1の左の渦巻き模様
の中心付近の明るい構造です。図1中を見ると、膨らんだ構造を持つことがわかります。