

MaNGAサーベイデータで探る近傍棒渦巻銀河の星種族年齢の分布

村田 一心¹

¹法政大学 理工学部 応用情報工学科

Stellar age profiles of local barred and unbarred galaxies as revealed with MaNGA

Kazumi MURATA¹

¹Department of applied informatics, faculty of Science and Engineering, Hosei University,
3-7-2, Kajino-cho, Koganei, Tokyo, Japan
murata.kazumi.204@gmail.com

(Received 2019 October 28; Accepted 2019 December 21)

概要

本研究では可視面分光サーベイMaNGAデータを用いて、近傍棒渦巻銀河の星種族年齢分布を調査した。サンプルセレクションにはGalaxy Zooカタログを利用し、顕著な棒構造を持つ棒銀河サンプルと、棒構造を持たないコントロールサンプルを作成した。星質量ごとの傾向を調べるため、これらのサンプルを $\log M/M_{\odot} = 10.0-10.5, 10.5-11.0, 11.0-11.5$ の3グループに分類した。各グループにおける天体数は、棒銀河サンプルが5, 24, 19天体、コントロールサンプルが25, 48, 38天体となった。棒銀河サンプルの光度加重平均年齢分布は、中心の3 kpcで平坦となり、外側の領域ではコントロールサンプルより0.2-0.4桁高かった。これは、棒状構造によって中心では星形成活動が誘発され、外側では低下したことを示す。一方、質量加重平均年齢の分布は両サンプルとも全グループにおいて中心ほど増加した。この傾向は、棒状構造を持っていても、他の銀河と同様にインサイド-アウトの進化を示すことを示す。

Abstract

This study investigates radial age profiles of local barred and unbarred galaxies using Mapping Nearby Galaxies at APO (MaNGA) survey data. Galaxies with prominent bars were selected from the Galaxy Zoo catalogue as a barred sample, and those without bars as a control sample. These samples were divided into three stellar-mass bins, $\log M/M_{\odot} = 10.0-10.5, 10.5-11.0, 11.0-11.5$, respectively. The numbers of galaxies in each bin were 5, 24, and 19 for the barred sample, and 25, 48, and 38 for the mass-matched control sample, respectively. The luminosity-weighted age profiles of barred galaxies were flat at central 3 kpc regions and were 0.2-0.4 dex higher than the control sample at outer regions. This indicates bar-induced star-formation in the central regions and bar-quenching in the outer regions. On the other hand, the mass-weighted age profiles of both samples monotonically increased towards the central regions. This suggests that barred galaxies also follow inside-out quenching, regardless of bar-induced central star-formation and/or bar-quenching of disk regions.

Key words: galaxies:evolution—barred galaxies—age-gradient

1. 序論

現代天文学の課題の一つは、銀河の形態と星形成活動の推移との関係を明らかにすることである。銀河の形態は、渦巻銀河と楕円銀河に大きく分類される。一般に渦巻銀河は活発な星形成活動を示し、楕円銀河は星形成活動をしていない(e.g. Cano-Díaz et al. 2019)。しかし渦巻銀河の中でも棒状構造を持つ銀河はガスが少なく、星形成活動も弱いことが報告されている(Masters et al. 2010; Masters et al. 2012; Kruk et al. 2018)。

棒状構造は銀河の星形成活動の分布にも大きな影響を及ぼしている。棒状構造を持つ銀河は中心にガスが集中し、活発な星形成活動をしているものが多く見つかっている(Sakamoto et al. 1999; Wang et al. 2012; Lin et al. 2017; Chown et al. 2018)。また、円盤領域での星形成活動は棒状構造を持たない銀河と比べて弱く(Masters et al. 2010; Kruk et al. 2018)、棒状構造内での星形成活動も非常に弱い(James & Percival 2015, 2016, 2017, Yajima et al.

2019)。

これらの現象は次のように理解されている(Gavazzi et al. 2015)。棒状構造は非軸対称であるため、その回転は円盤内の重力ポテンシャルの形を歪める。その結果、円盤内のガスは角運動量を失い、中心に輸送される。そのため、星形成活動は円盤内で低下し、中心で増加する。

一方、通常の渦巻銀河は中心ほど早く星形成活動を終える、インサイド-アウトの進化を考えると考えられている(Tacchella et al. 2015; Belfiore et al. 2017; Abdurro'uf & Akiyama 2017; Ellison et al. 2018; Wang et al. 2018)。つまりこのような銀河は中心ほど星形成活動が弱い。しかし、棒状構造が存在すると中心の星形成活動が活発になり、円盤領域の星形成活動は低下するため、インサイド-アウトの進化は弱まると考えられる。

棒状構造とインサイド-アウトの関係を調べるには、星形成活動や星種族の年齢分布を調べれば良い。Abdurro'uf & Akiyama (2017)は近傍銀河を空間分解してSEDフィッティングを行い、棒状構造の有無と比星形成率 (specific Star-

Formation Rate; sSFR)の分布との関係を調べた。彼らは銀河中心でのsSFRは棒状構造を持つ銀河の方が低い、外側では棒状構造の有無に依らないと主張している。一方、Lin et al. (2017)やChown et al. (2018)は多くの棒状構造を持つ銀河の中心で星形成活動が増加する様子を捉えている。また、年齢の勾配に関する研究ではロングスリットを用いた可視分光観測が多く行われており、棒状構造を持つ銀河は年齢の勾配が小さいと報告されている(Pérez et al. 2007; Pérez et al. 2009; Sánchez-Blázquez et al. 2011)。しかしロングスリットを用いるだけでは、棒状構造の年齢勾配を推定できても、棒状構造が銀河全体に与える影響を詳しく調べることはできない。そのような研究を行うには、近年活発に行われるようになってきた可視面分光観測が必要である。面分光観測では、銀河内の全領域を同じ手法で解析できるため、棒状構造と銀河全体の関係を調べるのに適している。しかし、棒状構造の有無と年齢の勾配との間に有意な相関はないとする研究(Sánchez-Blázquez et al. 2014)がある一方、棒状構造を持つ銀河の棒領域では年齢の勾配が円盤領域よりも緩やかとする研究もある(Seidal et al. 2016; Fraser-McKelvie et al. 2019)。

このように、棒状構造の有無とインサイド-アウトの進化との関係は未だよくわかっていない。その原因の一つは、棒構造が弱い銀河でも棒構造ありとしてサンプルに含まれているため、棒構造の有無による違いが見えにくくなってしまっていることである。また、棒状構造の有無で星質量が異なっており、棒状構造の有無による原因と星質量の大小による原因とが区別できていないことが考えられる。加えて、サンプルの少なさも影響していると考えられる。これを解決するには、棒状構造の有無に強弱があること(Nair & Abraham 2010)、棒状構造を持つ銀河ほど星質量が大きいことを考慮した多数のサンプルを作成し、棒状構造の有無による違いをより見やすくすることが考えられる。

そこで本研究では、「棒状構造が非常に強い銀河サンプル」と、「棒状構造がほとんど見えないが星質量は同一なコントロールサンプル」を用いる。このような両極端のサンプルを星質量でグループ分けして作成するには、大規模なデータセットが必要になる。そこで本研究では、大規模サンプルを持つMapping Nearby Galaxies at APO (MaNGA; Bundy et al. 2015; Blanton et al. 2017)データと、視覚的に大量の銀河の形態を分類したGalaxy Zoo 2プロジェクト(Willett et al. 2013)のデータを用いた。また、先行研究では銀河の年齢勾配を調査していたが、勾配の領域ごとの違いは考慮していなかった。それに対し本研究では、年齢の半径方向プロファイルそのものを調査し、年齢の大きさと勾配について、領域ごとに調査する。これにより、棒状構造によって誘発された星形成活動やその低下が星種族に与える影響を詳しく調べる。

本論文は次のように構成されている。次節では用いたデータおよび物理量の算出方法を説明する。第3節では棒状構造の有無で年齢プロファイルが有意に異なる結果を示し、第4節では年齢プロファイルと棒状構造による星形成活動の低下、インサイド-アウトの進化との関係を議論する。第5節では結論を述べる。本研究では、宇宙論パラメータとして $(H_0, \Omega_\Lambda, \Omega_m) = (70 \text{ km/s/Mpc}, 0.7, 0.3)$ を使用した。

2. 使用データ

2.1. サンプルセレクション

本研究では可視面分光サーベイMaNGAのアーカイブデータDR14、および銀河の形態を分類する市民プロジェクトGalaxy Zooを用いた。MaNGAサーベイは近傍銀河1万天体を面分光観測するプロジェクトで、DR14ではおよそ2500天体が収録されている。視野は30 arcmin程度で、波長範囲3600-10000 Å、波長分解能 $R \sim 2000$ でファイバー分光をしている。視野に適度に収まるように、赤方偏移 $z \sim 0.03$ の銀河を主なターゲットにしている。MaNGAサーベイのサンプルセレクションは、原則として質量ごとに均等になるように設定されており、銀河進化の統計的な研究においても無バイアスなサンプルとして使用できる。

Galaxy Zooは一般市民が銀河のカラー画像を見て形態を投票・判別するプロジェクトである(Lintott et al. 2008)。初期のプロジェクトでは楕円、渦巻き、不規則銀河の判別のみ行っていたが、Galaxy Zoo 2ではより詳細な形態への投票を行っている。MaNGAサンプルについては、全ての天体についてGalaxy Zoo 2における形態分類が行われている(Aguado et al. 2019)。Galaxy Zoo 2プロジェクトでは、棒状構造の強さについては定めていない。しかし、大多数の市民が「棒状構造がある」と判別した銀河は顕著な棒状構造を持っていると考えられる。実際、他の方法とGalaxy Zooでの結果を比較した研究では、投票が高いほど強い棒状構造を持っていることが示されている(Masters et al. 2012)。

本研究で用いる棒銀河サンプルは次のように選んだ。まずGalaxy Zooによる形態分類で「disk or feature」「spiral」「no edge on」「bar」への投票が8割を超えた天体を選んだ。これにより選択された天体は57天体であった。ここで、エッジオンを避けたのは円盤領域のプロファイルを詳細に調べるためである。また、複数の銀河が視野に写っているサンプルは視覚的に確認し、取り除いた。活動銀河核の影響を避けるため、BPT図(Baldwin et al. 1981, 図1)を用いてセイファートと分類された銀河は取り除いた。その際、BPT図は[NII] $\lambda 6584$ 輝線を用いた方法(Kauffmann et al. 2003)、[SII] $\lambda \lambda 6717, 6731$ 輝線を用いた方法(Kewley et al. 2006)の2つを適用し、どちらか一方でもセイファートと分類された銀河(図1における点線と破線の上側に分布する銀河)は使わなかった。最後に星質量で分類し、本研究で用いた棒渦巻銀河のサンプル数は、星質量 $\log M/M_\odot = 10-10.5, 10.5-11, 11-11.5$ のグループでそれぞれ、5, 24, 19天体となった。もっとも軽い銀河のグループの数は非常に少なく、統計的な議論は難しいが、参考のために同様に解析した。

棒銀河サンプルと比較するためのコントロールサンプルは次のように選んだ。まず、棒銀河サンプルの選択における「spiral」を「no spiral」として、155天体が得られた。棒銀河サンプルと星質量を揃えるため、各星質量グループの棒銀河サンプルと星質量が0.1 dex以内で等しい銀河を1天体ずつランダムに選択した。グループ内の全ての棒銀河に対応天体が見つかられば選択された天体をコントロールサンプルに加え、対応天体が見つからなくなるまでこれを繰り返した。その結果、各星質量グループ $\log M/M_\odot = 10-10.5, 10.5-11, 11-11.5$ におけるコントロールサンプルはそれぞれ、25, 48, 38天体となった。すなわち各グループにおける、棒銀河の対応天体はそれぞれ5, 2, 2天体存在する。図2に棒銀河サンプルとコントロールサンプルの例を1天体ずつ示した。

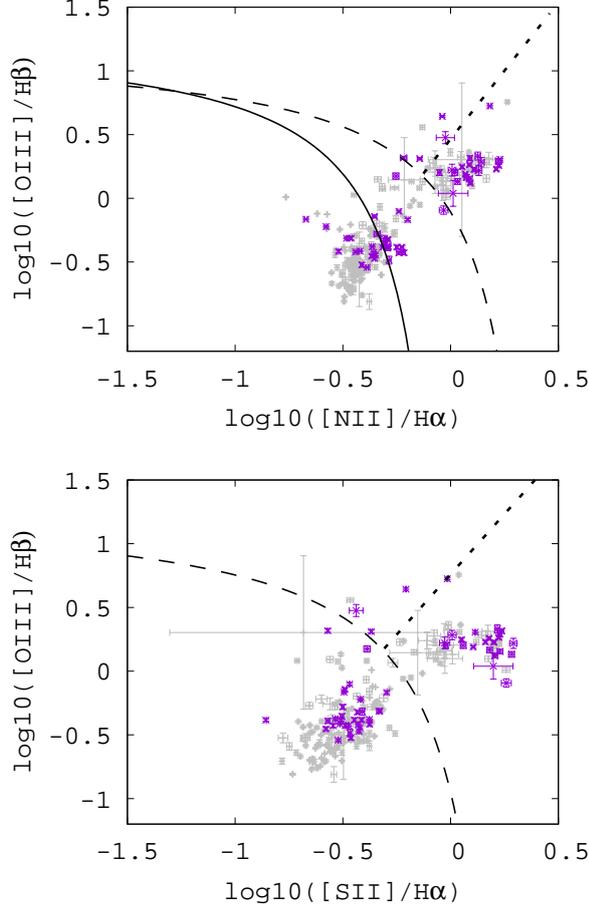


Fig. 1. BPT diagrams of our samples. Magenta and grey symbols indicate barred- and unbarred (control) samples, respectively. Top: BPT diagram based on the [NII] line. The dashed line indicates the separation between star-forming galaxies and AGNs as defined by Kewley et al. (2001). The dotted (solid) line shows the separation between Seyfert galaxies and LINERS (star-forming and composite galaxies) as suggested by Kauffmann et al. (2003). Bottom: BPT diagram based on the [SII] line defined by Kewley et al. (2006). The dashed line indicates a separation between star-forming galaxies and AGNs, and the dotted line separates Seyfert galaxies and LINERS.



Fig. 2. Example SDSS pseudo-colour images of the barred and unbarred galaxies. The left panel shows the barred galaxy 8616-6104, and the right panel shows the unbarred galaxy 8550-9102.

Table 1. Barred galaxy sample used in this study. Each column shows the MaNGA ID, stellar mass, redshift and fraction of voting to “bar” in the Galaxy Zoo catalogue.

MaNGA ID	$\log M/M_{\odot}$	z	f_{bar}
Low mass sample			
8549-6103	10.028	0.0417	0.885
8600-12701	10.321	0.0280	0.857
8945-12701	10.443	0.0327	0.903
8330-9101	10.480	0.0349	0.872
8547-9102	10.496	0.0435	0.971
Middle mass sample			
8931-12704	10.512	0.0254	0.969
8440-3703	10.523	0.0270	0.840
8078-6104	10.544	0.0442	0.844
8083-12703	10.555	0.0243	0.828
8931-12702	10.573	0.0277	0.886
8728-12701	10.601	0.0284	0.871
8726-12701	10.629	0.0286	0.976
8724-12701	10.675	0.0316	0.815
8439-3701	10.786	0.0271	0.905
8440-12701	10.791	0.0289	0.814
8140-12701	10.803	0.0286	1.000
8715-12701	10.807	0.0242	0.818
8602-12705	10.816	0.0318	0.977
8987-3703	10.818	0.0269	0.925
8597-12703	10.836	0.0260	0.897
9042-12703	10.861	0.0328	0.865
8312-12702	10.864	0.0320	0.913
8979-3704	10.872	0.0621	0.833
8601-12705	10.873	0.0297	0.838
8626-12702	10.877	0.0294	0.886
8452-12704	10.903	0.0518	0.806
8947-12704	10.964	0.0271	0.806
8616-6104	10.980	0.0540	0.889
8939-12703	10.990	0.0278	0.806
High mass sample			
8482-1902	11.005	0.0578	0.932
8078-12703	11.010	0.0281	0.829
8602-12701	11.025	0.0268	0.975
9026-9101	11.027	0.0314	0.971
8945-6104	11.033	0.0338	0.960
8325-9102	11.052	0.0674	0.923
8135-6103	11.058	0.0488	0.878
8486-6101	11.086	0.0589	0.853
8481-1902	11.093	0.0651	0.946
8454-6104	11.159	0.0635	0.806
8717-9101	11.165	0.0457	0.868
8712-12704	11.167	0.0324	1.000
8252-3702	11.196	0.0906	0.923
8721-6103	11.207	0.0454	1.000
8454-12702	11.273	0.0764	0.853
8450-12705	11.306	0.0428	0.889
8655-3701	11.362	0.0712	0.857
8452-12703	11.380	0.0610	0.907
8135-12701	11.416	0.0618	0.896

2.2. 用いた物理量

本研究では、MaNGAサーベイの2次データPIPE3Dを使用した(Sánchez et al. 2016; Sánchez et al. 2017)。PIPE3Dでは、MaNGAの各分光データに対してスペクトルフィッティングを行い、ピクセルごとに星質量、年齢、輝線強度などのデータをまとめている。フィッティングには星種族合成スペクトルが使用され、各種属の存在量から星質量や年齢が推定されている。本研究におけるサンプルセレクションで用いた星質量は、視野内に含まれる星質量の総和とした。

銀河を構成する星種族の年齢には2種類ある。光度加重平均年齢(Luminosity-weighted age; age_{LW})と質量加重平均年齢(Mass-weighted age; age_{MW})である。光度加重平均年齢は5500 Åでの光度で各星種族に重みをつけた平均年齢、質量加重平均年齢は名前の通り各星種族の質量で重みをつけた平均年齢である。なお、PIPE3Dでは年齢の対数に対して平均を計算しており、一般的な平均年齢とは定義が少し異なる。

これらの年齢は銀河の星形成史を反映する。光度加重平均年齢は、寿命の短い星により大きな重みがかかるため、最近の星形成活動に大きく影響される。すなわち光度加重平均は、銀河が活発な星形成活動を行うと小さくなり、クエンチングが起きると大きくなる。一方、質量加重平均年齢は寿命の長い星に大きな重みがかかるため、より過去の星形成史を反映している。そのため、星形成活動が活発に行われても、光度加重平均年齢ほどには変化しない。このことから両者の比、すなわち質量加重平均年齢/光度加重平均年齢が小さいほどクエンチングが起きていると判断できる。つまり、インサイド-アウトの進化をしている銀河は、中心ほど年齢比が小さくなる。

2.3. 解析方法

棒状構造とインサイド-アウトの進化との関係を調査するため、各星質量グループにおける星種族年齢の半径方向プロファイルを求めた。その際、各銀河の年齢プロファイルを求めた後、グループごとに平均化した。各銀河の年齢プロファイルを求める際は、幅1ピクセルの円環内の年齢の平均を求めた。グループごとの平均を求める際は、中心から10 kpcまでの領域を0.5 kpcのビンで分類し、各ビンに含まれる個々の銀河の星種族年齢の平均と分散を算出した。

このように2段階に分けてプロファイルを求めたのは、各銀河画像のピクセルの物理スケールが異なるため、全銀河を同時に計算すると銀河ごとに重みを均一にできないためである。ここでは簡単のため、傾斜角の補正はしなかった。ただし、サンプルからエッジオン銀河は取り除いたためその影響は小さいと考えられる。また、棒状構造の有無で傾斜角にバイアスがかかることは考えにくく、本研究の結果に大きな影響はないと考えられる。

3. 結果

得られた年齢プロファイルを図3~5に示す。図3上段は光度加重平均年齢、下段は質量加重平均年齢、図4は棒銀河サンプルとコントロールサンプルとの比のプロファイルを示している。図5には、質量加重、光度加重平均年齢の比を示した。図3、5では棒銀河サンプルは左図に、コントロールサンプルは右図に示した。

これらの図からまずわかることは、中心ほど年齢が高いこと、重い銀河ほど年齢が高いことである。前者はインサイド-アウトの進化と、後者はダウンサイジングと無矛盾である。この傾向は棒銀河、コントロール共に、2種類の年齢両方で見られる。以下では、これらの図について詳しく見ていく。

3.1. 光度加重平均年齢

図3上段は、光度加重平均年齢のプロファイルを示している。棒銀河サンプル(左)とコントロールサンプル(右)とを比べると、顕著な違いが2つ見られる。一つ目は、棒銀河サンプルでは中心付近で年齢の増加が頭打ちしていることである。この傾向は(Lin et al. 2017; Chown et al. 2018)が示した星形成活動や年齢の指標($H\alpha$ と $H\delta$ の等価幅、 $Dn4000$)のプロファイルの中心付近での折り返しと類似している。

二つ目の違いは、もっとも軽いグループ(青)を除き、外側では棒銀河サンプルの方が年齢が高いことである。これは、棒状構造を持つ銀河の円盤領域で星形成活動が弱いとする研究(Kruk et al. 2018)とも一致する。棒銀河サンプルでは、中心での年齢の増加が頭打ちし、外側の年齢が大きいため、コントロールサンプルと比較して勾配が小さい。この傾向は、面分光を用いて円盤領域より棒領域の方が年齢の勾配が小さいことを示した先行研究(Seidal et al. 2016; Fraser-McKelvie et al. 2019)とも無矛盾である。

より詳細に棒銀河サンプルとコントロールサンプルを比較するため、図4(左)に両者の光度加重平均年齢プロファイルの比を示す。星質量 $\log M/M_{\odot} > 10.5$ のグループ(緑、紫)では、棒銀河サンプルの方が年齢が高いが、中心付近ではその差が小さくなっていることがわかる。つまり、棒銀河サンプルでは相対的に中心が若く、外側で年老いているということである。

3.2. 質量加重平均年齢

質量加重平均年齢のプロファイル(図3下段)は光度加重平均年齢と違い、年齢の増加の頭打ちは見られない。そのため、棒銀河、コントロール共に年齢が中心に向かって単調増加している。棒銀河サンプルとコントロールサンプルのプロファイルの比(図4右)を見ると、両プロファイルに顕著な違いは見られない。この傾向は、Sánchez-Blázquez et al. (2011)やSánchez-Blázquez et al. (2014)の結果とも一致している。

3.3. 質量加重平均年齢・光度加重平均年齢比

次に、質量加重平均年齢と光度加重平均年齢との比($age_{MW/LW}$)のプロファイル求めた(図5)。棒銀河サンプル(左)とコントロールサンプル(右)とで、振る舞いが大きく異なることがわかる。

中心付近での年齢比は、コントロールサンプルでは大きく減少しているのに対し、棒銀河サンプルでは折り返しが見られる。また、星質量 $\log M/M_{\odot} > 10.5$ のグループでは、外側の年齢比が棒銀河サンプルの方が小さい。先述した通り、年齢比の減少は星形成活動が低下を示唆する。つまりこの結果は、コントロールサンプルでは中心付近で星形成活動が低下、棒銀河サンプルでは中心付近で活性化、外側で低下したことを示唆する。

一方、星質量に対する依存性を見ると、特に棒銀河サンプルでは質量が大きいほど年齢比が1(つまり対数を取ると0)に近い。これは、光度の大きい星種族と、質量に支

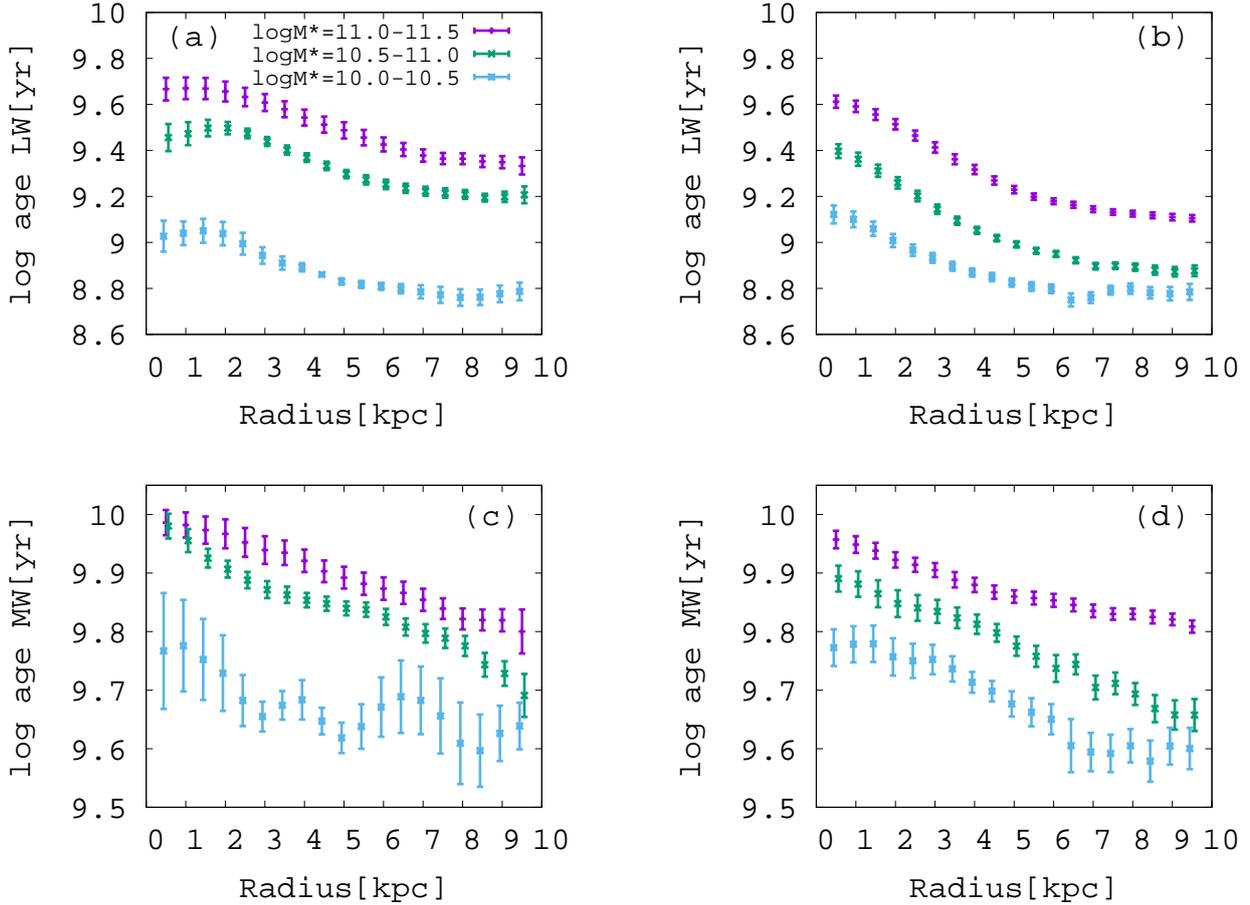


Fig. 3. Radial age profiles for the barred- and unbarred (control) samples. The cyan, green, and magenta symbols indicate the subsamples with the stellar mass of $\log M_* = 10.0-10.5$, $10.5-11.0$, and $11.0-11.5$, respectively. (a): Luminosity-weighted age profiles for the barred sample. (b): Mass-weighted age profiles for the barred sample. (c): Same as (a), but for the control sample. (d): Same as (b), but for the control sample. The symbols are shifted slightly along the x-axis (± 0.06 kpc) to improve the visibility.

配的な星種族の年齢が近いことを意味する。つまり、重い銀河ほど星形成活動が低下し、寿命の短い星がいなくなってきたことを示唆する。

4. 議論

本研究では、可視面分光データを使い、銀河を構成する星種族の年齢プロファイルを棒状構造の有無と星質量ごとに調査した。その結果、棒銀河サンプルはコントロールサンプルと比べ、光度加重平均年齢は中心では同程度だが外側では大きいこと、質量加重平均年齢は銀河全域で同程度であることがわかった。本節ではこれらの結果と先行研究との知見を合わせ、棒状構造と星形成活動の低下、およびインサイド-アウトの進化との関係を議論する。

4.1. 棒状構造による星形成活動の低下

図4(左)で示したように、棒銀河サンプルはコントロールサンプルと比べ、外側の光度加重平均年齢が大きい。これは、棒状構造の存在が円盤の星形成活動を低下させていることを示唆しており、先行研究(Cheung et al. 2013; Newnham et al. 2019)やシミュレーション(Khoperskov et al. 2017)とも一致している。興味深いことに、中間の星質量

を持つグループ(緑; $\log M/M_\odot = 10.5-11$)が最も棒構造の有無による光度加重平均年齢の差異が大きい。この質量範囲の光度加重平均年齢プロファイルを見ると、コントロールサンプル(図3b)では半径5 kpcより外側の年齢が10億年にも満たないのに対し、棒銀河サンプル(図3a)では15-20億年の年齢である。つまり、コントロールサンプルの円盤部は活発な星形成活動をしているのに対し、棒銀河サンプルは星形成活動が弱りつつある。これは、棒構造による円盤部の星形成活動の低下は星質量が $\log M/M_\odot = 10.5-11$ の範囲にある銀河に最も効果的であることを示唆している。

先行研究の中には、棒状構造の有無と星形成活動や星種族の年齢に有意な違いはないとするものもある(Kim et al. 2017; George et al. 2019)。しかし、これらの研究はSDSSの中心だけに当てたファイバーによる分光観測を元に行っている。本研究においても中心の特に光度加重平均年齢は、棒状構造の有無で大きな差異は見られず(図4左; 半径 ~ 0 で年齢比の対数は0に近い)、先行研究と矛盾するとは言えない。しかし外側の領域では棒状構造の有無によって大きく異なる。このような研究は面分光観測を行うことで初めてできるものであり、棒状構造による星形成活動の低下を有意に示すことができたと言える。

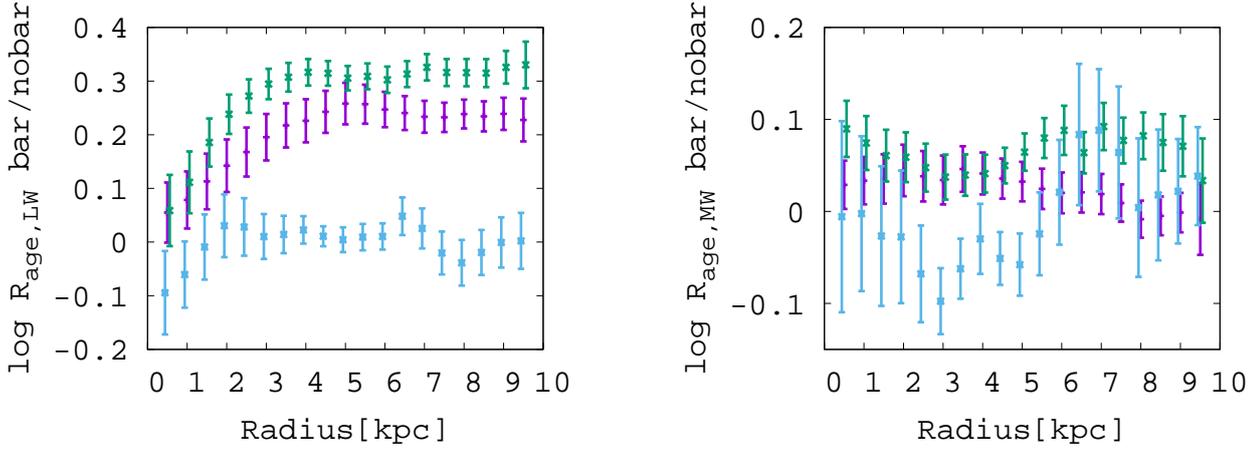


Fig. 4. Radial profiles of the ratio of the ages between barred- and unbarred samples. The left panel shows the profiles based on the Luminosity-weighted age, and the right panel shows that based on the mass-weighted age. The symbols are the same as in the Fig. 3, and shifted slightly along the x-axis (± 0.06 kpc) to improve the visibility.

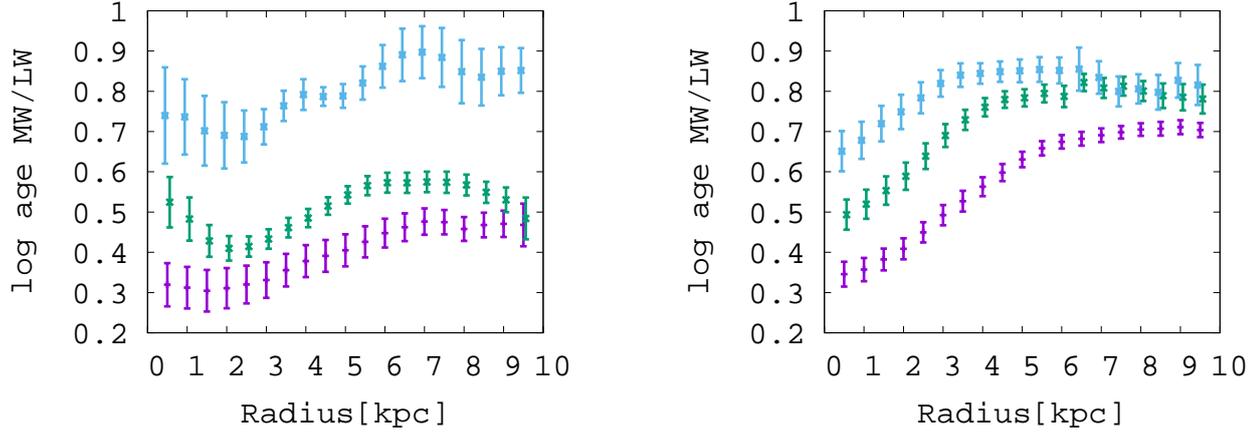


Fig. 5. Radial profiles of the ratio between mass- and luminosity-weighted ages. The left panel shows the barred sample, and the right panel shows the unbarred sample. The symbols are the same as Fig. 3, and shifted slightly along the x-axis (± 0.06 kpc) to improve the visibility.

棒状構造を持つ銀河の割合は、星質量が大きいほど高いことが知られている(Nair & Abraham 2010; Masters et al. 2012)。つまり、棒状構造による星形成活動の低下は質量クエンチング(星質量が関連する星形成活動の低下; Peng et al. 2010)の一種と言える。一方、棒状構造を持たない銀河でも質量が大きいほど年齢が大き(図3b)、質量加重平均年齢/光度加重平均年齢比は小さい(図5右)。これは、棒状構造を持たなくても、質量が大きいほど星形成活動が低下(光度加重平均年齢は増加)することを示している。すなわち、質量クエンチングの原因には棒状構造以外の成分があることを示している。そのようなメカニズムの候補として、活動銀河核によるフィードバックやバルジが原因となる形態学的クエンチング(Martig et al. 2009)が議論されているが、本研究の結果だけではそれらを区別することはできない。

本研究では、Galaxy Zooにおいて「棒状構造を持つ」あるいは「棒状構造を持たない」に8割以上の市民が投票した銀河だけを用いた。つまり、本研究のサンプルは「非常に顕著な棒状構造を持つ銀河」「それらしい構造を全く持たない銀河」に二極化されており、微弱な棒状構造を持つ銀河は除

外されている。棒状構造は一度形成されると、なかなか破壊されないことがシミュレーションによって示されている(Athanassoula 2013; Spinoso et al. 2016)。そうだとすると、微弱な棒状構造は比較的最近形成されたと考えられ、星形成史に与えてきた影響も限定的なはずである。そのような、棒状構造の強さと星形成活動との関係を詳しく調べるためには、棒状構造の強さを定量評価する必要があるが、Galaxy Zooだけでは細かい定量評価は難しい。将来研究として、棒状構造の形状、長さ、質量を測定し、構成する星種族の年齢や星形成活動を調査することが考えられる。

棒状構造を持つ質量 $\log M/M_{\odot} > 10.5$ のグループの銀河中心の質量加重平均年齢は、およそ100億歳に達している(図3c)。この結果は先行研究(Sánchez-Blázquez et al. 2014)とも一致する。これは大部分の星が赤方偏移 $z \sim 2$ に形成されたことに対応する。遠方ほど棒状構造を持つ銀河の割合は小さくなることが知られており、 $z = 1$ では現在の半分程度と推定されている(Melvin et al. 2014)。そのため、本研究で用いた棒銀河サンプルは棒状構造が顕著であること、棒状構造はそう簡単に破壊されないこと(Athanassoula 2013)

を考慮すると、 $\log M/M_{\odot} > 10.5$ の棒銀河サンプルの中心は初期に形成された棒銀河の影響により急速に星形成を行なったことを示唆する。

4.2. 棒状構造とインサイド-アウトの進化との関係

渦巻銀河は通常、中心から外側にかけて徐々に星形成活動を低下するインサイド-アウトの進化をすることが知られている。本研究でのコントロールサンプルにおいてもその傾向を示しており、光度・質量加重平均年齢どちらのプロファイルにおいても、中心ほど年齢が高く、外側ほど若い(図3b,d)。

一方、棒銀河サンプルの光度加重平均年齢プロファイルを見ると、コントロールサンプルと比べ、インサイド-アウトの傾向が弱くみえる。中心と半径10 kpcでの光度加重平均年齢の差は、コントロールサンプルでは0.4 dexほどあるのに対し、棒銀河サンプルでは0.2 dex程度しか見られない(図3a,b)。加えて、中心付近(半径2 kpc以内)のプロファイルは平坦になっている。これは、棒状構造によって中心の星形成活動が誘発になり、外側での活動が低下したと解釈できる。光度加重平均年齢は寿命が短い星に大きな重みがかかるため、活発な星形成があれば年齢が小さくなり、活動が低下すれば年齢が大きくなるためである(Coelho & Gadotti 2011)。

しかし、棒銀河サンプルの質量加重平均年齢を見ると、中心ほど年齢が高く、プロファイルに平坦な領域も見られない。これは、棒状構造に誘発された星形成活動は、それまでに形成された総質量に比べれば無視できるほど小さいことを意味している。すなわち星形成活動による若返りは近傍銀河においては極めて限定的で、棒銀河においてもインサイド-アウトの進化をすると結論できる。

本研究の類似研究としてCALIFAを用いた研究がある(Sánchez-Blázquez et al. 2014)。彼らは棒銀河の円盤内の年齢勾配は、棒構造の有無による違いはないとしている。一方本研究では、光度加重平均年齢のプロファイルは棒状構造の有無によって異なる結果を得た。両者の違いは、解析方法とサンプル数の違いに由来すると考えられる。すなわち、調査した領域は彼らは円盤領域だけだったが、本研究は銀河の全領域である。また、彼らは年齢の勾配を調査したのに対し、本研究は年齢の半径方向プロファイルを調査した。そこで比較のため、棒銀河サンプルとコントロールサンプルの光度加重平均年齢プロファイルの比を見ると(図4左)、中心から半径4 kpc以上離れた領域の傾きは誤差の範囲でゼロである。ただし、それより内側の領域の傾きはゼロではなく、棒銀河サンプルの方が年齢勾配は小さいことを示す。つまり、領域ごとに年齢の勾配は異なる。しかしSánchez-Blázquez et al. (2014)では年齢勾配を一律として求めている。また、彼らの図6をよく見ると、有意ではないものの、棒銀河の方が光度加重平均年齢の勾配が小さい傾向が見て取れる。本研究の棒銀河サンプル数($\log M/M_{\odot}=10.5-11$ のグループで24天体)は、先行研究(10天体程度)の2倍以上である。これらを考慮すると、棒銀河サンプルの年齢勾配はコントロールサンプルと比べ、中心付近では小さく、外側では同程度と結論できる。

本研究では、年齢プロファイルの変化をすべて星形成活動によるものとして議論を進めているが、星の半径方向への移動(radial migration)によっても起き得る(e.g. Fraser-McKelvie et al. 2019)。本研究でその可能性を棄却することはできない。しかし棒銀河サンプルの年齢プロファイ

ルがすべて円盤で生成された星が中心に移動したものに因るとすると、銀河中心で生成された若い星はより少なかったことになる。つまりこの場合でも、棒銀河もインサイド-アウトの進化をすると結論には影響を与えない。

5. 結論

本研究では可視面分光サーベイMaNGAのアーカイブデータを使用し、近傍渦巻銀河における棒状構造の有無と星種族の年齢プロファイルとの関係を調査した。棒構造の影響を明確にするため、顕著な棒構造を持つ棒銀河サンプル、ほとんど見えないコントロールサンプルを作成し、比較した。ここで、棒構造の有無はGalaxy Zooにおいて、「棒構造あり」「棒構造なし」にそれぞれ8割以上の投票があるものとした。また、コントロールサンプルは棒銀河サンプルと星質量が0.1 dex以内で一致するものをランダムに選び、作成した。星質量の範囲を $\log M/M_{\odot}=10.0-10.5, 10.5-11.0, 11.0-11.5$ に分け、各グループにおける光度加重平均年齢、質量加重平均年齢の半径方向プロファイルを求めた。

その結果、棒銀河サンプルは中心から3 kpc以上離れた領域で光度加重平均年齢が有意に大きく、棒構造による星形成の低下を示した(図4左)。この傾向は特に中間の星質量グループで顕著に見られた。一方、銀河の中心付近では光度加重平均年齢の有意な違いは見られず、棒構造による星形成活動の誘発を示唆した。また、棒銀河サンプルの光度加重平均年齢は中心付近で平坦なプロファイルを示したが、質量加重平均年齢は中心ほど大きくなった(図3左)。このことから、棒構造が中心での星形成活動を誘発しても、近傍銀河のインサイド-アウトの進化を止められないことを示唆した。

Funding for the Sloan Digital Sky Survey IV has been provided by the Alfred P. Sloan Foundation, the U.S. Department of Energy Office of Science, and the Participating Institutions. SDSS-IV acknowledges support and resources from the Center for High-Performance Computing at the University of Utah. The SDSS web site is www.sdss.org.

SDSS-IV is managed by the Astrophysical Research Consortium for the Participating Institutions of the SDSS Collaboration including the Brazilian Participation Group, the Carnegie Institution for Science, Carnegie Mellon University, the Chilean Participation Group, the French Participation Group, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Instituto de Astrofísica de Canarias, The Johns Hopkins University, Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (IPMU) / University of Tokyo, the Korean Participation Group, Lawrence Berkeley National Laboratory, Leibniz Institut für Astrophysik Potsdam (AIP), Max-Planck-Institut für Astronomie (MPIA Heidelberg), Max-Planck-Institut für Astrophysik (MPA Garching), Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik (MPE), National Astronomical Observatories of China, New Mexico State University, New York University, University of Notre Dame, Observatório Nacional / MCTI, The Ohio State University, Pennsylvania State University, Shanghai Astronomical Observatory, United Kingdom Participation Group, Universidad Nacional Autónoma de México, University of Arizona, University of Colorado Boulder, University of Oxford, University of

Portsmouth, University of Utah, University of Virginia, University of Washington, University of Wisconsin, Vanderbilt University, and Yale University.

This project makes use of the MaNGA-Pipe3D dataproductions. The author thanks the IA-UNAM MaNGA team for creating this catalogue, and the ConaCyt-180125 project for supporting them.

References

- Abdurro'uf & Akiyama, Masayuki, 2017, MNRAS, 469, 2806
Athanassoula E., 2013, MNRAS, 429, 1949
Aguado D. S. et al., 2019, ApJS, 240, 23
Baldwin J., Phillips M., Terlevich R., 1981, PASP, 93, 5
Belfiore F. et al., 2017, MNRAS, 466, 2570
Bundy K. et al., 2015 ApJ, 798, 7
Blanton M. R. et al., 2017, AJ, 154, 28
Cano-Díaz M. et al., 2019, MNRAS, 488, 3929
Cheung E. et al., 2013, ApJ, 779, 162
Chown R. et al., 2018, MNRAS, 484, 5192
Coelho P. & Gadotti D. A., 2011, ApJ, 743, L13
Ellison S. L. et al., 2011, MNRAS, 416, 2182
Ellison S. L. et al., 2018, MNRAS, 474, 2039
Fraser-McKelvie A. et al., 2019, MNRAS, 488, L6
Gavazzi G. et al., 2015, A&A, 580, A116
George K., 2019, A&A, 628, 24
James P. A. & Percival S. M., 2015, MNRAS, 450, 3503
James P. A. & Percival S. M., 2016, MNRAS, 457, 917
James P. A. & Percival S. M., 2018, MNRAS, 474, 3101
Kauffmann G. et al. 2003, MNRAS, 346, 1055
Kewley L. et al., 2001, ApJ, 556, 121
Kewley L. et al., 2006, MNRAS, 372, 961
Khoperskov S. et al. 2017, A&A, 609, 60
Kim E. et al., 2017, ApJ, 845, 93
Kruk S. J. et al., 2018, MNRAS, 473, 4731
Lin L. et al., 2017, ApJ, 838, 105
Lintott C. J. et al., 2008, MNRAS, 389, 1179
Martig M. et al., 2009, ApJ, 707, 250
Masters K. L. et al., 2010, MNRAS, 405, 783
Masters K. L. et al., 2012, MNRAS, 424, 2180
Melvin T. et al., 2014, MNRAS, 483, 2882
Preethi B. Nair & Roberto G. Abraham, APJ, 714, L260
Newnham L. et al. 2019, MNRAS,
Peng Y. et al., 2010, ApJ, 721, 193
Pérez I., Sánchez-Blázquez P., and Zurita, A., 2007, A&A, 465, L9
Pérez I., Sánchez-Blázquez P., and Zurita, A., 2009, A&A, 495, 775
Sakamoto K. et al., 1999, ApJ, 525, 691
Sánchez S. F. et al., 2016, RevMex, 52, 171
Sánchez S. F. et al., 2017, RMxAA, 54, 271
Sánchez-Blázquez et al., 2011, MNRAS, 415, 709
Sánchez-Blázquez et al., 2014, A&A, 570, A6
Seidel M. K. et al., 2016, MNRAS, 460, 378
Spinoso D. et al., 2016, MNRAS, 465, 3729
Tacchella S. et al. 2015, Science, 348, 314
Wang J. et al., 2012, MNRAS, 423, 3486
Wang E. et al., 2018, ApJ, 856, 137
Willett K. W. et al., 2013, MNRAS, 435, 2835
Yajima Y. et al. 2019, PASJ, Advance Access