

SED フィッティングによる大規模データからの 若返り銀河の検出

田中匠

東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 / Kavli IPMU (WPI)

1. はじめに

一般に銀河は、活発な星形成を行う星形成銀河と、ほとんど星形成を行わない非星形成銀河に大別される。星形成銀河がある程度成長すると何らかの要因で星形成活動が抑制され、星形成銀河が非星形成銀河に進化する、という一方通行の銀河進化シナリオが広く考えられている。星形成活動の評価は銀河進化を理解するうえで非常に重要な要素であり、一般に天文学分野では単位時間あたりに作られる恒星の総質量である星形成率 [太陽質量/年] を用いて星形成活動を評価することが多い。

一方で近年の大規模なサーベイ観測の進展や解析手法の開発を背景に、銀河内での星形成率を時間の関数としてみた星形成史の議論が進むようになってきた。その結果、星形成の抑制を経験し非星形成銀河に進化した上で直近に星形成を再開した「若返り銀河」と呼ばれる銀河が発見されている [1, 2, 3]。この若返り銀河は、上記の広く支持される銀河進化シナリオでは説明できない銀河であり、銀河進化の理解を深めるうえで非常に重要な種族である可能性がある。しかし、若返り銀河の先行研究では、サンプル数が小さい、研究により定義がばらばらである、そもそもバイアスのある母サンプルから探査している、といった問題点があり、結果的に若返り銀河の持つ性質の統計的な議論は進んでいない。そのため若返り銀河において星形成を再開する(若返り現象を起こす)メカニズムや、若返り銀河の銀河進化における重要性なども判明していない。

そこで我々は星形成史を用いた解析を通じて若返り銀河に関する未解決問題を解決することを目標とする HINOTORI¹ プロジェクトを立ち上げた。HINOTORI プロジェクトの第一段階である本課題では、先行研究よりも大規模かつ統一的な定義で選択された若返り銀河のサンプルを作成し統計的な議論を行った。なお本課題の成果は日本天文学会が出版している Publications of the Astronomical Society of Japan (PASJ, 欧文研究報告) 誌に accept 済みであり、プレプリント版も公開済みである [4]。研究成果を詳しく知りたい方はそちらを参照いただきたい。

2. 若返り銀河の選択手法

本研究では Prospector [5] と呼ばれる MCMC を用いた SED フィッティング手法を用いて大量の近傍銀河の星形成史を推定し、若返り銀河を選択した。SED フィッティングとは、銀河の観測データをモデルスペクトルでフィッティングすることで、星形成史や質量などの銀河の物理量を推定する手法である。Prospector では、銀河の時間進化を複数個のビンに区切り、各ビンにおいて一定の星形成率を仮定したノンパラメトリックな星形成史を仮定したフィッティングが可能である。一般的な SED フィッティング手法では、銀河の星形成史として指数的な減少など簡単な関

¹ star-formation History INvestigatiOn TO find RejuvenatIon プロジェクト

数を仮定することが多く、弱い仮定の下で自由度の高い星形成史でのフィッティングが可能である点は Prospector の強みである。

本研究で採用したモデルでは 8 つの時間ビンからなるノンパラメトリック星形成史を仮定しており、星形成史のほかにも質量、金属量など計 16 個のフリーパラメータを持つ。我々は結果の事前分布依存性を考慮するため、星形成史の事前分布として 2 つの異なる事前分布を仮定して実行した。フリーパラメータの数も多く、各モデルスペクトルの作成もコストが高いために、上記の設定では 1 コアで 1 天体実行するために 1 日程度の時間が必要となる。さらに後述するように天体数は約 1 万天体にもおよぶ。これらの高い計算コストに対応するため、本課題では「若手・女性利用者推薦制度」のインターン枠を利用し、Oakbridge-CX を利用することで上記の SED フィッティングを実行した。

サンプルは面分光²サーベイである MaNGA サーベイ [6] により観測された約 8857 天体の銀河を用いた。これらの天体は面分光データを持つために、若返り銀河選択後に詳しい個々の銀河の観測が可能であるというメリットを持つ。MaNGA サーベイによって得られた面分光データを次元に圧縮した分光データに加え、紫外線から赤外線までの測光データを Prospector に入力し、フィッティングを行った。

推定した星形成史を基に、我々は直近 1 億年以内に非星形成銀河から星形成銀河に戻った星形成史を持つ銀河を若返り銀河として選出し、1071 天体からなる若返り銀河サンプルを制作した。直近 1 億年という短い³期間に注目しているのは、一般に SED フィッティングにおいては星形成から時間が経過するごとに時間分解能が低下していくために、1 億年以前の星形成史を直近 1 億年と同程度の時間分解能で再現することが難しいためである。

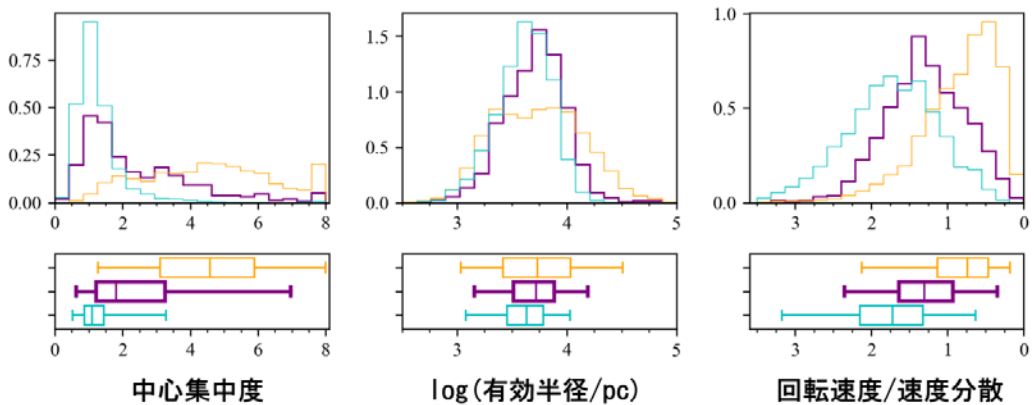
なお本研究では、様々な星形成史を仮定したモデルにより作られた模擬銀河データを用いて手法の検証も行った。その結果、上記の我々の手法では、若返りによって再開した星形成によって全星質量の約 0.1%程度が形成されたような若返り銀河を 66%程度の精度で選択することが可能であることを確認した。また MaNGA サンプルはすでに様々な研究がなされているサンプルであり、ノンパラメトリックな星形成史を仮定しない SED フィッティングにより推定された物理量のカタログも公開されている。本研究により得られた星質量やダスト減光量などの物理量は、既存のカタログともコンシステントな結果であることも確認済みであり、我々の結果の正当性を支持している。

3. 結果

本研究にて構築した若返り銀河サンプルより、若返り銀河は全銀河の約 8%程度を占めることが判明した。また若返り銀河は星形成を活発に行っている銀河の中でも大質量側に多く分布しており、星形成銀河よりも大きな質量を持つ傾向のある非星形成銀河から進化したとする定義と一致した結果となっている。

² 空間方向に分割したビンごとに分光を行うことで、空間的に広がった天体の場所ごとの分光データを手に入れることができる観測のこと。

³ 銀河進化の時間スケールから見れば非常に短い時間スケールであることに注意。



第1図: 銀河の形態指標を比較したヒストグラム, および箱ひげ図。

(左) 銀河の光学的プロファイルの中心集中度を比較している。値が小さいほど中心集中度の弱い円盤銀河のようなプロファイルであることを示す。(中) 銀河の光学的なサイズの指標である有効半径を比較している。有効半径は、各銀河の半分の光度が含まれる半径に対応する。(右) 銀河の力学的な形態指標である回転速度と速度分散の比を比較している。値が大きいかほど回転が卓越した円盤銀河のような力学的構造を持つことを示す。各グラフにおいて、オレンジ、紫、水色がそれぞれ非星形成銀河、若返り銀河、星形成銀河を示している。

次に銀河の形態に注目する。第1図は銀河の力学的指標を、若返り銀河、非星形成銀河、星形成銀河で比較している。一般に星形成銀河は円盤状の広がった形態を、非星形成銀河は楕円状の中心集中度の高い形態を示す傾向があることが知られている。光学的な形態指標である中心集中度や、力学的な形態指標である回転速度/速度分散の比の値を比較した結果、若返り銀河は星形成銀河と非星形成銀河の中間的な形態を示し、非星形成銀河よりも明確に円盤状な構造を持つことが判明した。

他にも本課題では、銀河の環境や、分光データの特徴などの比較も行っているが、本記事では割愛させていただく。詳細な解析結果については論文 [4] を参照いただきたい。

4. 考察

星形成史を基にした選択手法は、若返り銀河を選ぶ手法として最も直接的な手法であるうえに、本研究で構築したサンプルは過去最大の若返り銀河サンプルであり、若返り銀河の特性を探るための統計的な解析も可能となる。本章では、初の若返り銀河の統計的解析により示唆された、若返り銀河の重要性や、星形成再開のメカニズムなどについて、簡単に報告する。

4. 1. 若返り銀河の重要性

最も直近の時間ビンにおける星形成率を用いて、現在の宇宙における全星形成率において若返り銀河における星形成活動の占める割合を計算した結果、約20%となった。この値は特に大質量側で高く、現在の宇宙における（特に大質量銀河での）星形成活動を考える際に、若返り銀河が無視できない種族であることを意味している。

また若返り銀河において、全星質量に占める直近1億年以内に形成した星質量の割合も計算した。その結果概ね0.1%程度となり、各銀河の質量進化において1回の若返り現象の持つ役割は小さいと考えられる。ただし、前述したように我々の手法は全星質量の0.1%程度を再開した星

形成活動で形成したような若返り銀河のみを選択する傾向があることにバイアスされている可能性がある。一方で、後述する単一の銀河で複数回若返りが起こる可能性や、1億年以内に再開した星形成活動が今後長い間継続する可能性を考えると、上で議論した値は各銀河の質量進化における再開した星形成の寄与を過小評価している可能性がある。

4. 2. 複数回若返る可能性

今回の SED フィッティングにより推定した星形成史の分析から、星形成再開のタイムスケール、すなわち再開した星形成が継続する時間は平均して3億年程度の時間であると推定された。単一の銀河が直近の約80億年⁴の間に若返り現象を起こした回数を、若返り銀河の全銀河に占める割合がこの期間の間ずっと一定であるという仮定⁵の下で計算すると、約2.1回となった。さらに、前述したように若返り銀河は大質量な銀河ほど多くなるため、この質量依存性を考慮したうえで銀河内の星質量が 10^{11} 太陽質量を超える銀河に限定して直近80億年に若返りを起こした回数を計算すると、約4.4回となる。

以上のことから、特に大質量の銀河は銀河のその進化の中で複数回若返り減少を経験した可能性が高いと考えられる。この結果は、銀河は一度星形成をやめて非星形成銀河になったとしても、タイムスケールで星形成の抑制と再開を繰り返すという描像を示唆している。

4. 3. 若返りのメカニズム

結果で述べたように、多くの若返り銀河は光学的にも力学的にも非星形成銀河よりも円盤状（あるいは回転運動が卓越した）形態を示している。一方で、定義上若返り銀河は星形成を再開する前には非星形成銀河であったはずである。若返り現象のタイムスケールは数億年程度と、銀河の形態を第1図にも表れているほど大きく変えるには短すぎると考えられる。これらを踏まえば、若返り銀河は非星形成銀河と同様の形態を持っているはずである。

我々は若返り銀河と非星形成銀河との間の形態の不一致を説明するシナリオとして、円盤状の形態を持つ希少な非星形成銀河こそ若返り銀河の前駆体であり、そうした銀河が選択的に若返り現象を起こす、というシナリオを考えている。今後、電波での観測により若返り銀河内のガスの分布や運動を議論することとで、若返り現象のメカニズムを含め、若返り銀河の円盤状の形態の起源についても議論する予定である。

5. まとめ

本課題では、面分光サーベイである MaNGA のサンプル 8857 個からなる分光・測光データを SED フィッティング手法で解析し、推定した星形成史を基に 1071 天体からなる過去最大の若返り銀河サンプルを構築した。このサンプルの統計的解析から、若返り現象は現在の宇宙における星形成の20%程度に貢献していること、単一の銀河が何回も若返り現象を経験した可能性があること、円盤状の形態を持つ非星形成銀河が選択的に若返り現象を起こしている可能性があること、などが判明した。今後は MaNGA サーベイにより得られている面分光データや電波観測のデータを用いて個々の若返り銀河を詳しく解析することで、若返り現象のメカニズムを議論する予定である。

⁴ 赤方偏移0から1の時間を想定。

⁵ 赤方偏移約0.8(約70億年前)でも、少数サンプルの解析より10%程度の割合が報告されているため[1,3]、それなりに妥当性のある仮定であると考えている。

謝 辞

本研究では東京大学理学部“2022 Undergraduate Research Abroad in Science Program”, および東京大学情報基盤センター スーパーコンピューティング部門「若手・女性利用者推薦」の支援を受けました。

参 考 文 献

- [1] Chauke, P., van der Wel, A., Pacifici, C., et al. (2019). Rejuvenation in $z \sim 0.8$ Quiescent Galaxies in LEGA-C. *The Astrophysical Journal*, 877, 48. doi:10.3847/1538-4357/ab164d
- [2] Mancini, C., Daddi, E., Juneau, S., et al. (2019). Rejuvenated galaxies with very old bulges at the origin of the bending of the main sequence and of the ‘green valley’. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 489, 1265. doi:10.1093/mnras/stz2130
- [3] Tacchella, S., Conroy, C., Faber, S. M., et al. (2022). Fast, Slow, Early, Late: Quenching Massive Galaxies at $z \sim 0.8$. *The Astrophysical Journal*, 926, 134. doi:10.3847/1538-4357/ac449b
- [4] Tanaka, T. S., Shimasaku, K., Tacchella, S., et al. (2023). HINOTORI I: The Nature of Rejuvenation Galaxies. Accepted to Publications of the Astronomical Society of Japan. doi:10.1093/pasj/psad076 (arXiv:2307.14235)
- [5] Johnson, B. D., Leja, J., Conroy, C., & Speagle, J. S. (2021). Stellar Population Inference with Prospector. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 254, 22. doi:10.3847/1538-4365/abef67
- [6] Bundy, K., Bershady, M. A., Law, D. R., et al. (2015). Overview of the SDSS-IV MaNGA Survey: Mapping nearby Galaxies at Apache Point Observatory. *The Astrophysical Journal*, 798, 7. doi:10.1088/0004-637X/798/1/7