

مطالعه‌ی تحول زمانی ساختار کهکشان‌های راه‌شیری‌مانند

مریم هاشمی‌نیا^{1,2,3}، معین مصلح^{2,3}

¹ دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان، زنجان

² گروه فیزیک، دانشگاه شیراز، شیراز

³ رصدخانه ابوریحان بیرونی، دانشگاه شیراز، شیراز

چکیده

با استفاده از تحول رابطه‌ی رصدی جرم و ستاره‌زایی کهکشان‌ها، رشد جرمی کهکشان‌های راه‌شیری‌مانند، تخمین زده شده و اجداد اولیه‌ی کهکشان‌ها در بازه‌ی انتقال به سرخ 3/0 تا 7/1 انتخاب شده‌اند. این کار بر اساس داده‌های تلسکوپ فضایی هابل و محاسبه‌ی نمایه‌ی جرم ستاره‌های این اجرام صورت گرفته است. مطالعه‌ی تحول کمیت‌های ساختاری بر پایه‌ی جرم نشان می‌دهد که اندازه‌ی شعاع استاندارد (r_{50}) این کهکشان‌ها، با زمان تقریباً ثابت بوده است. این درحالی است که اگر از شعاع‌های r_{80} و r_{20} که به ترتیب شعاع‌هایی هستند که ۲۰ و ۸۰ درصد جرم را دربرمی‌گیرند استفاده شود، نتایج متفاوت است. نتایج نشان می‌دهد که در بازه‌ی مورد مطالعه به طرز چشمگیری کاهش یافته درحالی که r_{80} به شکل ملایمی در حال افزایش بوده است. این نتایج در کنار افزایش قابل توجه شاخص سرزیک نشان دهنده‌ی رشد دوکوهه (بالج) کهکشان‌ها به‌ویژه در انتقال به سرخ‌های کمتر از یک است. به طور کلی، افزایش نمایه‌ی جرمی این کهکشان‌ها به صورت تقریباً مشابه در دامنه‌ی وسیعی از فواصل کهکشانی به همراه تشکیل دوکوهه در نتیجه‌ی این مشاهدات موثر بوده است.

Studying Structural Evolution of Milky-Way Type Galaxies

M. Hasheminia^{1,2,3}, M. Mosleh^{2,3}

¹ Department of Physics, Institute for Advanced Studies in Basics Sciences, Zanjan

² Department of Physics, Shiraz University, Shiraz

³ Biruni Observatory, School of Science, Shiraz University, Shiraz

Abstract

A The inferred stellar mass growth of the Milky-Way Galaxy Type from the evolution of the star-forming main sequence is used to select its progenitors from $z \sim 1.7$ to $z \sim 0.3$ using the 3D-HST data. We estimated the evolution of sizes and concentration parameters by combining the structural parameters measured from their stellar mass profiles. We found that the half-mass radii (r_{50}) remain constant over the redshift range of this study, while the sizes containing 20% of the stellar masses (r_{20}) decrease ~ 60 percent. By evaluating the stellar mass profiles, we found that the bulge is assembled at later epochs ($z < 1$). In general, a self-similar mass profile growth over a wide range of radii and later bulge formation may be responsible for the constant half-mass sizes of the MW progenitors.

مقدمه

علیرغم مطالعات گسترده‌ی نظری و رصدی که در طی دهه‌های گذشته بر روی نحوه‌ی شکل‌گیری و تحول کهکشان‌ها انجام شده است، هنوز سوالات بسیاری در این مورد وجود دارد: منشأ شکل و جزئیات ساختاری کهکشان‌ها، با توجه فرآیندهای متفاوت فیزیکی دخیل در پیدایش این اجرام، چیست؟ چه فرآیندهایی عامل تحول کهکشان‌ها هستند و سازوکارهای داخلی و خارجی موثر در تحول کهکشان‌ها در هر دوره‌ی زمانی چه سهمی در شکل‌گیری اجزاء ساختاری دارند؟ از اینرو بررسی نحوه‌ی تحول ساختار و اجزای کهکشان یکی از اهمیت ویژه‌ای در مطالعه‌ی کهکشان‌ها برخوردار است. علاوه بر این، کهکشان راه‌شیری به عنوان نمونه‌ای از کهکشان‌های بسیار متدوال از لحاظ جرمی و یک کهکشان قرصی شکل نوعی، منبعی کلیدی در درک بهتر و عمیق‌تر ساختار و نحوه‌ی تحول این گونه سیستم‌ها شناخته می‌شود [1]. به ویژه آنکه در سال‌های اخیر به واسطه‌ی داده‌های دقیق و ارزشمند تلسکوپ فضایی گایا، در کنار انواع شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای، مطالعات بسیاری بر روی تاریخچه‌ی شکل‌گیری و تحول کهکشان راه‌شیری انجام شده است. با توجه به اطلاعات بدست آمده در مورد نحوه‌ی تجمع جرم و ادغام‌های احتمالی، به نظر می‌رسد که بیشتر جرم ستاره‌های راه‌شیری درون کهکشان تولید شده و کسر بسیار کوچکی از جرم فعلی مربوط به ادغام‌های رخ داده طی تحول این کهکشان است [2]. با در نظر گرفتن تمامی این موارد، مطالعه‌ی تاریخچه‌ی رشد جرم و تغییر

ساختارهای راه‌شیری از منظر اخترفیزیک فراکهکشانی می‌تواند به درک بهتر نحوه‌ی تحول کهکشان‌ها و پاسخ به سوالات موجود در این زمینه کمک کند. به همین دلیل ما در این کار، با تلاش برای استفاده از تاریخچه‌ی رشد جرمی و انتخاب نمونه‌ای مناسب رصدی، نحوه‌ی تغییر اندازه و شاخص تمرکز جرمی کهکشان‌های راه‌شیری‌مانند را با به صورت دقیقی در طی زمان مورد مطالعه قرار می‌دهیم.

داده‌ها

مجموعه‌ی داده‌های مورد استفاده در این کار برمبنای کاتالوگ‌های موجود و داده‌های تصویربرداری 3D- HST [3, 4] و CANDELS [5, 6] است. داده‌ها شامل پنج فیلد AEGIS، GOODS-N، GOODS-S، COSMOS و UDS است. بررسی نحوه‌ی تجمع و توزیع جرم در کهکشان‌ها نیازمند این است که نمایه‌ی جرمی برآورد و مطالعه شود. استفاده از نمایه‌ی جرمی راهی دقیق‌تر و مناسب‌تر برای مطالعه‌ی فرایندهای فیزیکی دخیل در تحول جرم و ساختار کهکشان‌ها و مقایسه‌ی نتایج رصدی با شبیه‌سازی‌هاست. توزیع جرم در کهکشان‌ها را می‌توان با استفاده از داده‌های نورسنجی چندطول‌موجی و تبدیل نمایه‌ی نوری به نقشه‌ی جرمی دوبعدی و نمایه‌ی جرمی یک‌بعدی بدست آورد. برای این کار از رابطه‌ی ساده‌ی رنگ-نسبت جرم به درخشندگی و یا تکنیک برازش توزیع انرژی طیفی پیکسل به پیکسل استفاده می‌شود. از اینرو ما برای مطالعه‌ی تحول ساختار کهکشان‌ها از نمایه‌ی جرمی به‌جای نمایه‌ی نوری استفاده کردیم. بدین منظور برای به‌دست آوردن پارامترهای ساختاری برمبنای نمایه‌ی جرمی، کاتالوگ نقشه‌ی جرمی تهیه شده توسط مصلح و همکاران ۲۰۲۰ برای ۵۵۵۷ کهکشان تا انتقال به سرخ ۲ مورد استفاده قرار گرفت [7].

انتخاب نمونه‌ی کهکشان‌ها

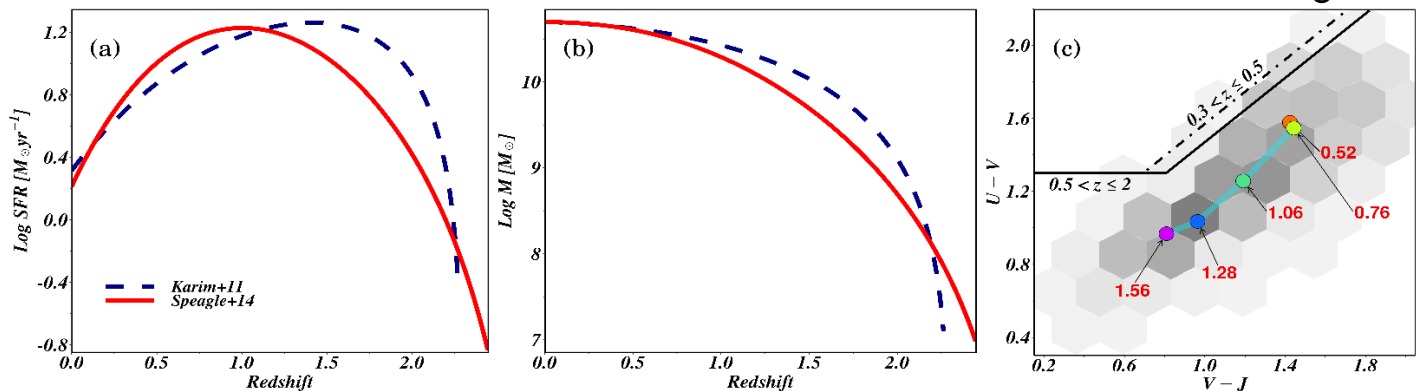
اولین گام برای مطالعه‌ی تغییر ساختار کهکشان‌ها، انتخاب کهکشان‌های نمونه است. بایستی به این نکته توجه داشت که نحوه‌ی انتخاب نمونه‌ی مورد مطالعه می‌تواند بر روی نتیجه‌ی کار اثرگذار باشد و باید با دقت زیادی همراه باشد. به‌منظور بررسی اینکه یک نوع خاص از کهکشان‌ها چگونه متحول می‌شوند، نیاز به روشی برای اتصال اجداد اولیه به کهکشان‌های امروزی داریم. یکی از این روش‌ها، استفاده از رابطه‌ی رصدی بین نرخ ستاره‌زایی (SFR) و جرم ستاره‌ای (M_*) کهکشان‌های ستاره‌زاست. این ایده بر این اساس بنا شده است که اگر کهکشان‌های ستاره‌زای امروزی همیشه ستاره‌زا بوده‌اند و بیشتر جرم آن‌ها حاصل ستاره‌زایی درون کهکشانی بوده باشد، همیشه در پراکندگی محدود اطراف رشته‌ی اصلی قرار داشته‌اند [8]. در این روش فرض می‌شود که ادغام نقش قابل توجهی در انباشت جرم نداشته است که با توجه به مطالعات اخیر بر روی تاریخچه‌ی تجمع جرم و اثر ادغام‌ها بر روی جرم کهکشان راه‌شیری [2]، می‌توان این فرض را قابل قبول دانست. با توجه با این موضوع، برای محاسبه تاریخچه‌ی رشد جرم راه‌شیری با جرم امروزی [9] $M_* = 5 \times 10^{10} M_\odot$ ما از دقیق‌ترین روش ارائه شده بر اساس رابطه‌ی رصدی بین نرخ ستاره‌زایی و جرم ستاره‌ای کهکشان‌های ستاره‌زا، یعنی انتگرال‌گیری روی رشته‌ی اصلی MSI استفاده کردیم، که توسط لایتنر و کراوتسوو 2011 پیشنهاد شده است [8]. در این روش برخلاف کارهای دیگر که میزان اتلاف جرم (\mathcal{R}) در طی تحول ثابت در نظر گرفته می‌شود، \mathcal{R} تابعی وابسته به زمان در نظر گرفته می‌شود که از روی مدل‌های تحول ستاره‌ای بدست آمده است. برمبنای این روش، جرم ستاره‌ای M_* با نرخ $\Phi(t)$ افزایش می‌یابد. نرخ تغییر جرم شامل دو جمله است که یکی با استفاده از نرخ ستاره‌زایی رصدی، رشد جرم را توصیف می‌کند ($\Psi(M_*, z)$) و دیگری براساس نرخ اتلاف جرم ستاره‌ای کل کهکشان، میزان بازگشت جرم به محیط را محاسبه می‌نماید:

$$\Phi(t) = \Psi(M_*, z) - R(t) \quad (1)$$

با توجه به داده‌های مورد استفاده در این کار، از رابطه‌ی رصدی $SFR - M_*$ محاسبه شده توسط اسپینگل و همکاران 2014 [10] استفاده شده است. آن‌ها برمبنای داده‌های جمع‌آوری شده از ۲۵ کار پیشین، تحول $SFR - M_*$ را در بازه‌ی $z \in [0, 6]$ را مورد بررسی قرار داده است. در الگوریتم MSI تحول جرم کهکشان با شرط مرزی $M_{*0} = M_*(z_{obs})$ شروع شده و با استفاده از معادله‌ی 1 مقدار نرخ ستاره‌زایی و جرم کهکشان در هر بازه‌ی زمانی رو به گذشته محاسبه می‌شود. اما مسئله‌ای که در اینجا با آن مواجهیم نحوه‌ی محاسبه‌ی نرخ اتلاف جرم کل است که از معادلات زیر به دست می‌آید:

$$R(t) = \int_{t_0}^t \Phi(t') f_{ml}(t-t') dt' \text{ و } f_{ml}(t) = 0,046 \ln \left(\frac{t}{2,76 \times 10^5} + 1 \right) \quad (2)$$

باتوجه به معادله 2 برای محاسبه‌ی اتلاف جرم به $\Phi(t)$ نیاز داریم، اما اتلاف جرم برای حل معادله 1 لازم است، با یک معادله‌ی خودسازگار روبرو هستیم. برای حل این معادله از یک روش تکرارشونده‌ی ساده بهره می‌بریم. برای این کار، ابتدا با فرض $R=0,45$ ، معادله 1 را حل کرده و گام به گام در زمان به عقب حرکت می‌کنیم. پس از مشخص شدن جرم و زمان تقریبی شکل‌گیری کهکشان موردنظر، این بار با فرض اینکه R در هنگام شکل‌گیری صفر است، معادلات را گام به گام تا زمان حال حل کرده و مقادیر را محاسبه می‌کنیم. این کار را برای چندین مرتبه تکرار می‌کنیم تا توابع به همگرایی برسند و مقادیر نهایی تاریخچه‌ی شیب نمایه‌ی جرم و ستاره‌زایی بدست آید. تاریخچه‌ی به دست آمده با دو رابطه $SFR-M_*$ متفاوت، در شکل 1a و 1b نشان داده شده است.

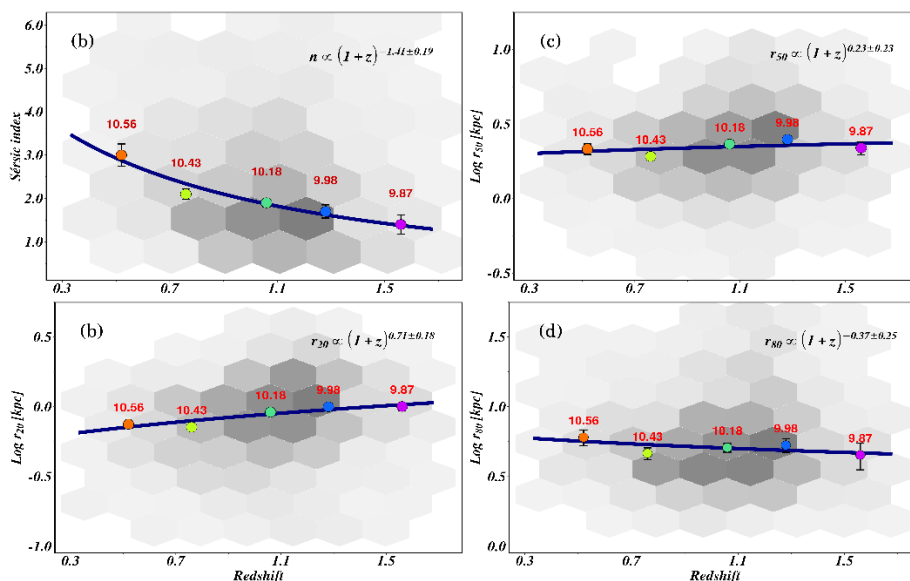


شکل 1: تاریخچه‌ی ستاره‌زایی (a) و جمع جرم (b) محاسبه شده برای کهکشانی با جرم فعلی $5 \times 10^{10} M_{\odot}$ با استفاده از روش MSI. تاریخچه‌ی حاصل از رابطه‌ی نرخ ستاره‌زایی با جرم اسپینگل و همکاران 2014 [10] و کریم و همکاران 2011 [11] به ترتیب با خط قرمز و خط چین آبی مشخص شده است. (c) نحوه‌ی تغییر رنگ کهکشان‌های راه‌شیری مانند بر روی نمودار UV-VJ. دایره‌های رنگی میانه در هر بازه‌ی انتقال به سرخ را نشان می‌دهد.

پس از محاسبه‌ی تاریخچه‌ی رشد جرم، کهکشان‌های ستاره‌زا را براساس مکان آن‌ها روی نمودار رنگ UVJ که توسط ویلیامز و همکاران در سال ۲۰۰۹ تعریف شد [12] و با کمک معیارهای بازتعریف شده توسط مصلح و همکاران 2017 [13] برای بازه‌ی $z \in [0,0/5]$ و $z \in [0/5,2]$ ، انتخاب می‌کنیم. حال می‌توانیم با استفاده از تاریخچه‌ی رشد جرم، کهکشان‌های مشابه با اجداد کهکشان راه‌شیری را تعیین کنیم. برای این کار کهکشان‌های ستاره‌زایی که در بازه‌ی جرمی لگاریتمی $0/1 \text{ dex}$ حول جرم اجداد اولیه‌ی کهکشان موردنظر در بازه‌ی انتقال به سرخ داده شده قرار دارند را انتخاب می‌کنیم. در انتها ۱۲۵۰ کهکشان به عنوان اجداد کهکشان راه‌شیری در بازه‌ی انتقال به سرخ $[1/7, 0/3]$ انتخاب شدند که نمودار رنگ UV-VJ آن‌ها در شکل 1c دیده می‌شود. دایره‌های رنگی میانه در هر بازه‌ی انتقال به سرخ (میانه‌ی هر بازه به رنگ قرمز در نمودار درج شده است) را نشان می‌دهد.

نحوه تحول اندیس سرزیک و اندازه‌ی کهکشان‌های راه‌شیری مانند

در ابتدا ما به بررسی نحوه‌ی تحول شاخص سرزیک کهکشان‌های راه‌شیری مانند پرداختیم. همانطور که در شکل a2 دیده می‌شود، شاخص سرزیک میانه (دایره‌های رنگی) با زمان در حال افزایش است به گونه‌ای که در بازه‌ی مورد بررسی با ضریب ۲.۷ رشد کرده است. خط آبی در این نمودار برآزش روی میانه با معادله‌ای به فرم $n = C(1+z)^{-1/41} \pm 0/19$ است.



شکل ۳: تحول شاخص سرزیک (a)، شعاع نیمه جرم (b)، r_{20} (c) و r_{80} (d) کهکشان‌های راه‌شیری‌مانند. جرم میانه در هر بازه انتقال به سرخ با رنگ قرمز در هر نمودار درج شده است.

ما برای بررسی چگونگی تغییر اندازه کهکشان‌های راه‌شیری‌مانند، علاوه بر اندازه استاندارد که شعاع نیمه جرم یا نیمه نور است، از شعاع‌های r_{20} و r_{80} ، که به ترتیب شعاع‌هایی هستند که ۲۰ و ۸۰ درصد جرم را دربر می‌گیرند، نیز استفاده کرده‌ایم. این دو کمیت دید دقیق‌تری نسبت به نحوه توزیع و در نتیجه انباشت جرم ارائه می‌دهد که منجر به درک بهتر فرایندهای دخیل در تحول ساختار کهکشان‌ها می‌شود. میلر و همکارانش در سال ۲۰۱۹ به بررسی اثر استفاده از کمیت‌های r_{20} و r_{80} برای مطالعه نحوه توزیع کهکشان‌ها روی نمودار اندازه-جرم پرداختند [14]. آن‌ها نشان دادند که r_{20} با فرایندهایی که در ستاره‌زایی و خاموش شدن کهکشان موثرند و r_{80} با ویژگی‌های هاله و سازوکارهای برافزایش جرم در قسمت‌های بیرونی مرتبط هستند و در نتیجه مطالعه این دو شعاع در درک فیزیک تحول کهکشانی بسیار موثر خواهد بود. نحوه تحول اندازه این کهکشان‌ها با زمان در شکل ۳ نشان داده شده است. ما از تابعی به فرم $r \propto (1+z)^{\gamma}$ برای برازش روی میانه استفاده کردیم که شیب تابع برای شعاع‌های r_{50} ، r_{80} و r_{20} به ترتیب برابر با ۰/۷۱، ۰/۲۳ و ۰/۳۷ است. این بدین معناست که شعاع r_{80} به آرامی در حال رشد بوده در حالی که شعاع r_{20} به طور قابل توجهی کاهش یافته که به معنای افزایش چگالی مرکزی کهکشان‌هاست. این رشد متفاوت در r_{80} و r_{20} موجب ایجاد تعادلی نسبی در رشد شعاع نیمه جرم شده، به گونه‌ای که در بازه انتقال به سرخ مورد مطالعه ما r_{50} اندکی تغییر کرده است.

نتیجه‌گیری

کاهش اندازه r_{20} و افزایش چگالی مرکزی کهکشان‌ها به همراه رشد شاخص سرزیک با زمان، بیانگر این است که دوکوهه همراه با دیگر قسمت‌های کهکشان در حال شکل‌گیری است و سرعت رشد آن در انتقال به سرخ‌های پایین بیشتر است. همچنین شعاع نیمه جرم در بازه انتقال به سرخ مورد مطالعه تقریباً ثابت بوده است که با چند کار رصدی قبلی که بر روی تحول اندازه‌ی راه‌شیری انجام شده متفاوت است، هرچند که برخی از نتایج اخیر بر کند بودن این تحول اشاره داشته‌اند [1, 15, 16]. دلیل اصلی این اختلاف استفاده از نمایه جرمی به جای نمایه نوری است که در مطالعات متعددی مورد بررسی و تأیید قرار گرفته است [7, 13, 17]. این موضوع نشان‌دهنده اهمیت استفاده از نمایه‌های جرمی در مطالعه تحول ساختار کهکشان‌هاست.

مرجع‌ها

- [1] Papovich, C., Labbé, I., Quadri, R., et al. 2015, *ApJ*, 803, 26.
 [2] Kruijssen, J. M. D., Pfeffer, J. L., Chevance, M., et al. 2020, *MNRAS*, 498, 2472.
 [3] Brammer, G. B., van Dokkum, P. G., Franx, M., et al. 2012, *ApJS*, 200, 13.

- [4] Skelton, R. E., Whitaker, K. E., Momcheva, I. G., et al. 2014, *ApJS*, 214, 24.
- [5] Grogin, N. A., Kocevski, D. D., Faber, S. M., et al. 2011, *ApJS*, 197, 35.
- [6] Koekemoer, A. M., Faber, S. M., Ferguson, H. C., et al. 2011, *ApJS*, 197, 36.
- [7] Mosleh, M., Hosseinnejad, S., Hosseini-ShahiSavandi, S. Z., et al. 2020, *ApJ*, 905, 170.
- [8] Leitner, S. N. & Kravtsov, A. V. 2011, *ApJ*, 734, 48.
- [9] McMillan, P. J. 2017, *MNRAS*, 465, 76.
- [10] Speagle, J. S., Steinhardt, C. L., Capak, P. L., et al. 2014, *ApJS*, 214, 15.
- [11] Karim, A., Schinnerer, E., Martínez-Sansigre, A., et al. 2011, *ApJ*, 730, 61.
- [12] Williams, R. J., Quadri, R. F., Franx, M., et al. 2009, *ApJ*, 691, 1879.
- [13] Mosleh, M., Tacchella, S., Renzini, A., et al. 2017, *ApJ*, 837, 2.
- [14] Miller, T. B., van Dokkum, P., Mowla, L., et al. 2019, *ApJL*, 872, L14.
- [15] Patel, S. G., Fumagalli, M., Franx, M., et al. 2013, *ApJ*, 778, 115.
- [16] van Dokkum, P. G., Leja, J., Nelson, E. J., et al. 2013, *ApJL*, 771, L35.
- [17] Suess, K. A., Kriek, M., Price, S. H., et al. 2019, *ApJ*, 877, 103.