

بررسی تأثیر محیط بر ویژگی کهکشان‌های پیر و جوان در جهان نزدیک

سپیده اسکندارلو*، سعید توسلی؛
دانشگاه خوارزمی، دانشکده فیزیک

دریافت: ۹۹/۱۰/۹ پذیرش: ۱۴۰۰/۶/۲۲

چکیده

در این پژوهش براساس داده‌های SDSS اثر محیط کهکشانی بر روی ویژگی‌های فیزیکی کهکشان‌های پیر و جوان مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور در دو محیط پرچگال (خوشه) و کم‌چگال (تهی‌جا) فهرستی از کهکشان‌هایی که درخشان‌تر از $M_r \sim -17$ هستند و در انتقال بسرخ $Z < 0/04$ قرار دارند، تهیه کرده‌ایم. نتایج به دست آمده در این بررسی نشان می‌دهد که در هر دو محیط کهکشانی، با افزایش جرم، سرعت پراکندگی کهکشان‌های پیر افزایش می‌یابد. در صورتی که به طور آماری چنین رفتاری برای کهکشان‌های کم جرم جوان دیده نمی‌شود. علاوه بر این در هر دو محیط، اندازه کهکشان‌های پیر نسبت به کهکشان هم جرم جوان کوچک‌تر است. همچنین شاخص سرسیک برای کهکشان‌های کم جرم جوان در هر دو محیط مقدار ثابتی است در صورتی که با افزایش جرم، شاخص سرسیک کهکشان‌های پیر افزایش می‌یابد. در نهایت ارتباط میان جرم و رنگ کهکشان‌ها در هر دو محیط نشان می‌دهند که رنگ کهکشان‌های پیر با افزایش جرم ثابت است اما در مقابل رنگ کهکشان‌های جوان با افزایش جرم قرمزتر می‌شود. به طور کلی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ویژگی فیزیکی کهکشان‌های پیر و جوان مستقل از محیط کهکشانی است که در آن قرار دارند.

واژگان کلیدی: کهکشان پیر و جوان، محیط کهکشانی، جرم ستاره‌ای، سرعت پراکندگی، اندازه، شاخص سرسیک، رنگ

مقدمه

یکی از سوال‌های چالش برانگیز در کیهان‌شناسی رصدی، ویژگی ساختاری کهکشان‌هاست، اما با توجه به داده‌های رصدی موجود، چگونگی مطالعه بر روی این اجرام در انتقال به سرخ‌های مختلف و ویژگی فیزیکی آنها یکی از سوالات مطرح شده در دهه‌های اخیر است. نقشه‌برداری‌های مساحی‌های بزرگ مقیاس در انتقال به سرخ‌های گوناگون نشان می‌دهند که کهکشان‌ها به صورت تصادفی در کیهان توزیع نشده‌اند، بلکه در محیط‌هایی به نام خوشه، گروه، فیلامان و

*نویسنده مسئول: sepiddeh.eskandarlou@gmail.com

تهی جاها قرار دارند. گروه و خوشه به مجموعه‌ای از کهکشان‌ها گفته می‌شود که به واسطه نیروی گرانشی به صورت فشرده و در فواصل نسبتاً نزدیک و مؤثر از هم قرار دارند و بر همدیگر تأثیر قابل توجه‌ای می‌گذارند. چگال‌ترین و پرجمعیت‌ترین تجمع کهکشان‌ها در خوشه‌هاست و معمولاً بیش از ۵۰ کهکشان در فاصله مگا پارسکی قرار دارد. اما اگر تجمع کهکشان‌ها کم‌تر از این مقدار باشد گروه گفته می‌شود. معمولاً این تعاریف برای گروه و خوشه به طور دقیق نیست و معمولاً فرق میان گروه و خوشه را تعداد اعضای آنها و یا سرعت پراکندگی مشخص می‌کند. گروه و خوشه محیط‌های مناسبی برای مطالعه ریخت‌شناسی کهکشان‌ها هستند. برخلاف خوشه و گروه‌ها، در تهی جاها تجمع کهکشان‌ها بسیار کم است. در واقع تهی جاها به فضای خالی گسترده در میان رشته‌های کهکشانی با اندازه حدود ۲۰ تا ۵۰ مگا پارسک گفته می‌شود که چگالی عددی کهکشان‌ها در آنها بسیار کم‌تر از چگالی زمینی است. یکی از سوالات اساسی و برجسته در زمینه کیهان‌شناسی رصدی، فهم چگونگی تأثیر این محیط‌ها بر روی ویژگی کهکشان‌ها و تکامل آنها با گذشت زمان است. نتایج مطالعات پژوهشگران در چند دهه اخیر، نشان می‌دهد که اکثر کهکشان‌هایی که در محیط‌های کم چگال قرار دارند از نوع پسین^۱ و اکثراً آبی رنگ و ستاره‌زا هستند، از طرف دیگر بیش‌تر کهکشان‌هایی که در نواحی پرچگال به خصوص در خوشه‌های غنی قرار دارند، کهکشان‌های پرجرم بیضوی با ستاره‌زایی کم و قرمز رنگ هستند [۱۰-۱۱-۱۸-۲۸].

در سال‌های اخیر پژوهشگران پی برده‌اند که کهکشان‌هایی که در نواحی پرچگال قرار دارند ۲۵ مرتبه درخشان‌تر از کهکشان‌هایی هستند که در نواحی کم‌چگال قرار دارند [۱۲]. بر اساس باور اکثر پژوهشگران، محیط‌های پرچگال کهکشانی برخلاف نواحی کم‌چگال، نواحی هستند که با پدیده ستاره‌زایی در کهکشان‌ها کاملاً مخالف است [۶-۹-۱۷-۲۵]. در این محیط‌ها به دلیل تکرار فرایندهای فیزیکی مانند نیروهای کشندی^۲، فشار خالی^۳، روده شدن گاز^۴، ادغام^۵ و ... میزان گاز سرد در کهکشان‌ها کاهش یافته و باعث کاهش ستاره‌زایی می‌شود [۱۶-۲۲-۲۴-۲۷-۳۸]. همچنین مطالعه دیگر بر روی کهکشان‌های در انتقال به سرخ پایین نشان می‌دهد که نرخ ستاره‌زایی در کهکشان‌ها با حرکت از فیلامان‌ها به سمت نواحی پرچگال کاهش می‌یابد [۱۵].

یکی از پارامترهای مهمی که به کمک آن می‌توان نرخ ستاره‌زایی را تا مقیاس زمانی یک گیگا سال گذشته در کهکشان‌ها مشخص کرد، پارامتر Dn-4000 است به عبارت دیگر از این پارامتر می‌توان برای گزارش سن یک کهکشان نیز استفاده کرد، به نحوی که کهکشان‌هایی که جمعیت ستاره‌های جوانی دارند (برای مثال ستاره‌های نوع O و B) مقدار این پارامتر کم است، [۵]. مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که به طور آماری کهکشان‌هایی که نواحی مرکزی آنها خاموش است

¹ Late-type

² Tidal Forces

³ Ram Pressure

⁴ Gas stripping

⁵ Merge

مقدار این پارامتر $Dn-4000 > 1/6$ و برای کهکشان‌هایی که در نواحی مرکزی آنها ستاره‌زایی دیده می‌شود مقدار این پارامتر $Dn-4000 < 1/6$ است [۲۶]، بنابراین مقدار کم پارامتر $Dn-4000$ در کهکشان‌های نوع پسین نشان از جمعیت ستاره‌ای جوان‌تر نسبت به کهکشان‌های نوع پیشین است. براساس نتایج به دست آمده مقدار این پارامتر برای اکثر کهکشان‌های داخل تهی‌جاها کم‌تر از $1/5$ است که تأییدی است بر فعال بودن و ستاره‌زا بودن کهکشان‌ها در این محیط‌ها است [۲۹]. همچنین در نواحی پرچگال با افزایش جرم ستاره‌ای مقدار این پارامتر از $1/27$ به $1/6$ افزایش می‌یابد، که این رفتار بیانگر این موضوع است که اکثر کهکشان‌های پرجرم که در محیط‌های پرچگال قرار دارند دارای جمعیت ستاره‌ای پیری هستند و $1/25 > Dn-4000$ است [۲۱]. با توجه به این نکته که هنوز نحوه تجمع جرم در کهکشان‌ها به طور دقیق مشخص نیست، مطالعه سن کهکشان‌ها در محیط‌های مختلف می‌تواند راه‌کاری مناسب در جهت بهتر فهمیدن سیر تکاملی کهکشان‌ها باشد [۲۱-۴۰].

هدف ما در این پژوهش بررسی ویژگی کهکشان‌های پیر و جوان در دو محیط پرچگال (خوشه) و کم‌چگال (تهی‌جاها) و چگونگی تغییر این پارامترها در کهکشان‌های هم جرم برای هر دو محیط است.

داده‌ها

در این پژوهش برای بررسی ویژگی کهکشان‌ها در دو محیط از داده‌های SDSS^۶ استفاده کرده‌ایم. SDSS دارای یک تلسکوپ اپتیکی $2/5$ متری است که تا به امروز موفق شده است یک سوم از آسمان را مساحت کند. داده‌های حاصل از این مساحت شامل دو نوع اطلاع نورسنجی و طیف‌سنجی به کمک پنج باند اپتیکی u, g, r, i, z است. برای به کار بردن کهکشان‌های داخل تهی‌جاها از کاتالوگ توسلی و همکاران (۲۰۱۳) که بر مبنای دهمین داده کاوی SDSS^۷ است، استفاده کردیم، این کاتالوگ تهی‌جا شامل ۱۰۱۴ کهکشان درخشان‌تر از قدر مطلق -17 در باند r و انتقال به سرخ بین $0/10$ تا $0/055$ است. این کهکشان‌ها درون ۱۶۷ تهی‌جاها که اندازه شعاع آنها بزرگ‌تر از ۷ مگا پارسک است قرار دارند [۳۵]. برای استخراج کهکشان‌های داخل خوشه‌ها از کاتالوگ تمپل و همکاران (۲۰۱۴) استفاده کردیم، این کاتالوگ هم بر مبنای دهمین داده کاوی، داده‌های SDSS است که شامل ۵۸۸۱۹۳ کهکشان و ۸۲۴۵۸ گروه و خوشه است. این کهکشان‌ها دارای قدرظاهری کم‌تر از $17/77$ و انتقال به سرخ کم‌تر از $0/2$ هستند. در این مطالعه معیار ما برای انتخاب محیط‌های پرچگال، خوشه‌های کهکشانی دارای بیشتر از ۱۴ عضو کهکشان است [۳۶].

⁶ Sloan Digital Sky Survey

⁷ Data Release

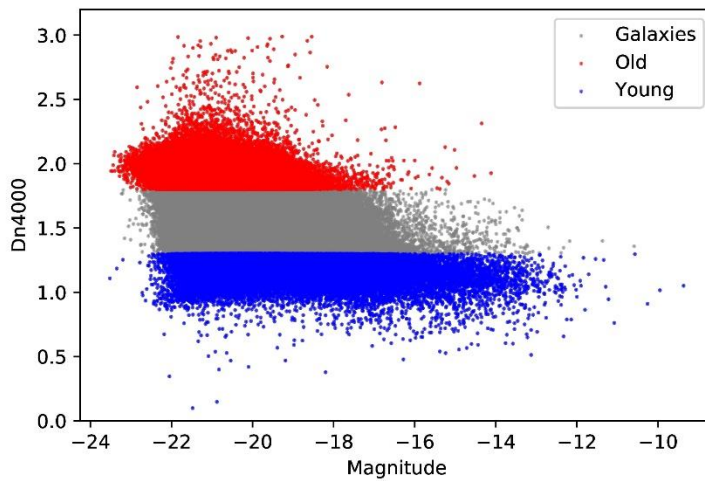
با توجه به این که هدف از این پژوهش، بررسی اثر محیط بر روی ویژگی‌های فیزیکی کهکشان‌های پیر و جوان است، از هر دو نمونه کاتالوگ به طور یکسان، کهکشان‌هایی که درخشان‌تر از قدر ۱۷- در باند r و در انتقال به سرخ کم‌تر از ۰/۰۴ هستند، برای این مطالعه انتخاب شده‌اند.

آنالیز

یکی از روش‌های ارزیابی سن یک کهکشان تعیین مقدار شاخص Dn-4000 است، در واقع مقدار این شاخص بیانگر سن جمعیت ستاره‌ای در حال حاضر آن کهکشان است، به این معنا که هرچه کهکشان پیرتر باشد این شاخص مقدار بیشتری دارد [۲۱-۴۱]، به طور کلی این شاخص را می‌توان بر اساس نرخ شار کهکشان در دو بازه طیفی ۳۸۵۰-۳۹۵۰ و ۴۰۰۰-۴۱۰۰ آنگستروم، که منطبق با شکست ۴۰۰۰ آنگستروم است، تعیین کرد، در واقع این شاخص نرخ ستاره‌زایی را تا مقیاس زمانی یک میلیارد سال گذشته در کهکشان مشخص می‌کند [۱]. در این بررسی، شاخص Dn-4000، برحسب مقادیری که در کاتالوگ MPA/JHU^۸ گزارش شده، برای هر دو نمونه کهکشان در محیط‌های کهکشانی تهی جا و خوشه، در نظر گرفته شده است [۴-۲۱-۳۰]. در شکل ۱- نمودار Dn-4000، برحسب قدر مطلق کهکشان‌های استخراج شده از مساحی SDSS در انتقال بسرخ کم‌تر از ۰/۲ نشان داده شده است. همان‌طور که از روی شکل نمایان است، کهکشان‌های پر جرم و درخشان دارای شاخص Dn-4000 (سن) بالایی هستند.

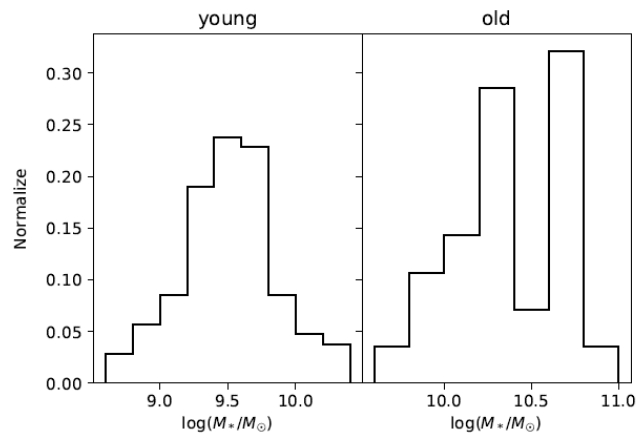
همان‌طور که در مقدمه هم اشاره شد به طور آماری کهکشان‌هایی که مقدار شاخص Dn-4000 آنها کم‌تر از ۱/۶ است به عنوان کهکشان‌های ستاره‌زا (جوان) و آن دسته از کهکشان‌هایی را که مقدار شاخص Dn-4000 آنها بیش‌تر از ۱/۶ می‌باشد به عنوان کهکشان‌های خاموش (پیر) در نظرمی‌گیرند [26]. با توجه به این که هدف ما از این مطالعه بررسی ویژگی‌های کهکشان‌های پیر و جوان در محیط‌های کم و پر چگال است، برای این که اختلاف بین کهکشان‌های پیر و جوان، در هر دو محیط به طور بارزتری مشخص شود و بتوان این اختلاف را بهتر دید براساس شکل ۱-، در هر دو محیط کهکشان‌هایی که در آنها $1/8 > \text{Dn-4000}$ و $1/3 < \text{Dn-4000}$ است به ترتیب به عنوان کهکشان‌های پیر و جوان در نظر گرفته شده‌اند.

⁸ Max-Planck-Institute for Astrophysics / Johns Hopkins University SDSS DR7



شکل ۱. نقاط خاکستری رنگ نشان‌دهنده کپکشان‌های استخراج شده از مساحی SDSS. نقاط قرمز رنگ $(Dn-4000 > 1/3)$ و آبی رنگ $(Dn-4000 < 1/3)$ به ترتیب به عنوان کپکشان‌های پیر و جوان در هر دو محیط کپکشانی تهی‌جا و خوشه

در چند دهه اخیر مطالعات گسترده نشان داده‌اند که جرم کپکشان‌ها نقش بسیار مهمی در تحول کپکشان‌ها دارند. از آنجایی که هدف ما در این پژوهش بررسی ویژگی کپکشان‌های پیر و جوان در محیط‌های مختلف است، بدین منظور، برای یک‌سان کردن توزیع جرمی کپکشان‌های پیر و جوان، بازه جرمی که، بین دو محیط تهی‌جاها و خوشه‌ها مشترک بود در نظر گرفتیم. (شکل-۲) تا بتوانیم نقش محیط را بر روی ویژگی‌های کپکشان‌های پیر و جوان صرف نظر از جرم آنها، بررسی کنیم. که این بازه همان‌طور که در شکل-۲ مشخص است برای کپکشان‌های جوان بین $1/6$ تا $10/4$ و برای کپکشان‌های پیر بین $9/6$ تا 11 است.



شکل ۲. توزیع جرم کهکشان‌های پیر و جوان در دو محیط خوشه و تهی جا

جدول ۱- تعداد کهکشان‌های پیر و جوان را در دو محیط خوشه و تهی جا پس از یکسان‌سازی توزیع جرم آنها نشان می‌دهد. در ادامه، این کهکشان‌ها را به عنوان نمونه‌های اصلی این پژوهش در نظر می‌گیریم و ویژگی‌های فیزیکی آنها را مانند سرعت پراکندگی، اندازه کهکشان‌ها، نرخ ستاره‌زایی که براساس کاتالوگ‌های NYU-VAGC^۹ و MPA/JHU استخراج شده‌اند، مورد بررسی قرار می‌دهیم [۳].

جدول ۱: تعداد کهکشان‌های پیر و جوان (خوشه‌ها و تهی جاها) در نظر گرفته شده در این مطالعه

کهکشان‌ها	تهی جاها	خوشه‌ها
پیر	۲۸	۲۸۰
جوان	۱۰۵	۱۰۵

بررسی ویژگی‌های فیزیکی کهکشان‌های پیر و جوان

رابطه بین جرم و اندازه کهکشان‌ها

یکی از روش‌های ارزیابی اندازه کهکشان‌ها به کمک داده‌های رصدی، محاسبه درخشندگی سطحی کهکشان‌ها است. امروزه پروفایل‌های نوری مختلفی مانند تابع نوکر^{۱۰}، تابع سرسیک^{۱۱}، تابع دیوکولرز^{۱۲} توسط محققان معرفی شده‌اند که می‌توان از روی آنها توزیع نور کهکشان‌ها را برحسب فاصله از مرکز کهکشان توصیف کرد. به فاصله‌ای از مرکز کهکشان که در آن درخشندگی کهکشان به نصف مقدار خود می‌رسد شعاع مؤثر^{۱۳} گفته می‌شود که از این شعاع به عنوان معیاری برای مقایسه اندازه کهکشان‌ها در نظر گرفته می‌شود. در این مطالعه، اندازه کهکشان‌ها را براساس شعاع مؤثر پروفایل دیوکولرز برگرفته از دوازدهمین داده کاهی SDSS تعیین کردیم.

پروفایل دیوکولرز به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود:

$$I(R) = I_e \exp\left(-7.67 \left[\frac{R^4}{R_e^4} - 1\right]\right) \quad (1)$$

⁹ New York University Value-Added Galaxy Catalog

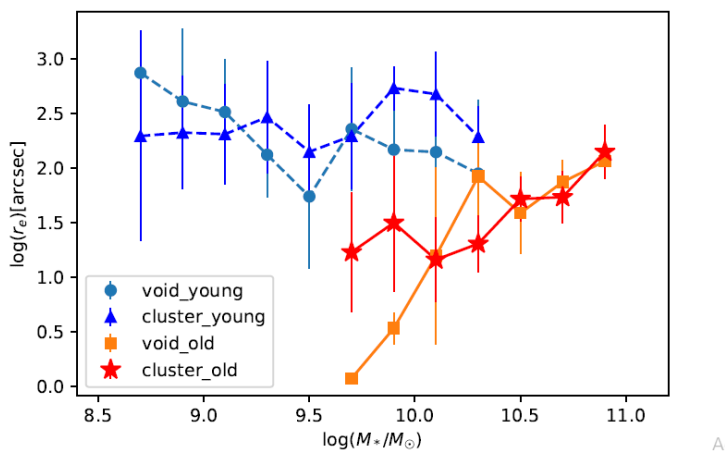
¹⁰ Nuker

¹¹ Sersic

¹² de Vaucouleurs

¹³ Effective Radius

که در این رابطه $I(R)$ نشان‌دهنده درخشندگی سطحی در فاصله R از مرکز کهکشان است، R_e نشان‌دهنده شعاع مؤثر یا همان شعاعی است که نیمی از درخشندگی کهکشان در آن قرار دارد و I_e بیانگر میزان درخشندگی سطحی در شعاع مؤثر است.



شکل ۳. نمودار تغییرات اندازه کهکشان (شعاع مؤثر) برحسب جرم ستاره‌ای کهکشان‌های پیر و جوان در دو محیط مختلف

رابطه میان اندازه و جرم کهکشان‌ها یکی از روابط با معنی در تحول کهکشان‌ها می‌باشد که حاوی اطلاعاتی در مورد تاریخچه به وجود آمدن کهکشان است. مطالعات آماری نشان می‌دهند که رابطه خطی میان اندازه و جرم کهکشان‌ها وجود دارد به نحوی که کهکشان‌های پرجرم، بزرگتر از کهکشان‌های کم جرم هستند [۳۴] که این امر می‌تواند ناشی از ادغام بین کهکشان‌ها و بر افزایش گاز باشد. البته این رابطه خطی به طور آماری برای کهکشان‌های کم جرم، چندان نمایان نیست [۱۳]. شکل ۳- اندازه و جرم کهکشان‌های پیر و جوان را در دو محیط تهی‌جا و خوشه مقایسه می‌کند. همان‌طور که از روی شکل نمایان است، در هر دو محیط کهکشان‌های جوان نسبت به کهکشان‌های پیر بزرگ‌تر هستند که براساس مطالعات صورت گرفته به دلیل این‌که هاله ماده تاریک کهکشان‌های پیر نسبت به جوان متمرکزتر است، اندازه آنها نسبت به کهکشان‌های هم جرم ستاره‌ای جوان، کوچک‌تر است [۴۱-۱۹-۲]. هم‌چنین اندازه کهکشان‌های جوان، مستقل از جرم آنها، در هر دو محیط خوشه و تهی‌جا به طور آماری تقریباً یکسان است. اما در مقابل اندازه کهکشان‌های پیر با افزایش جرم بزرگ‌تر می‌شوند که این رفتار در کهکشان‌های محیط تهی‌جا کاملاً مشهود است. بر اساس این شکل، اندازه کهکشان‌های پیر و سنگین در هر دو محیط کاملاً یکسان است اما اختلاف اندازه در کهکشان‌های

سبک‌تر دیده می‌شود اما از آنجایی که بزرگی خطا در سائز این نوع از کهکشان‌ها کاملاً مشهود است نمی‌توان به طور کاملاً دقیق در مورد علت این امر صحبت کرد. داده‌های بیش‌تر ناشی از مساحی‌های آینده کمک شایانی پیرامون این نتیجه خواهد داشت.

رابطه بین جرم و سرعت پراکندگی

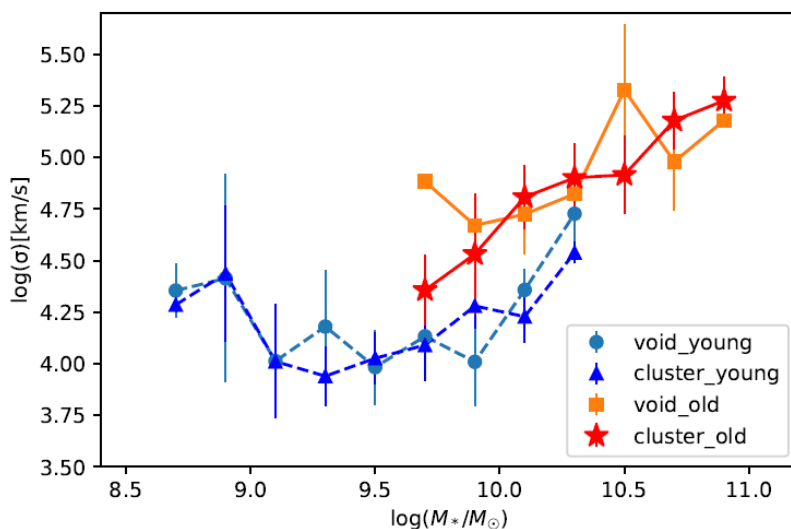
در ادامه تأثیر محیط‌های کهکشانی بر روی سرعت پراکندگی کهکشان‌های پیر و جوان مورد بررسی قرار می‌دهیم. از آنجا که داده‌های استخراج شده در این مطالعه برگرفته از مساحی SDSS است و با توجه به این که اندازه‌گیری سرعت پراکندگی کهکشان‌ها در این مساحی براساس طیف‌سنجی از طریق فیبر نوری با شعاع ثابت ۱/۵ ثانیه قوسی است، لذا می‌بایست بر روی سرعت پراکندگی کهکشان‌هایی که تصویر آنها بیش‌تر از ابعاد فیبر نوری است، تصحیحاتی صورت گیرد. برای این منظور با توجه به مطالعات صورت گرفته توسط کریستف و همکاران (۲۰۱۳) رابطه زیر را برای تصحیح سرعت پراکندگی کهکشان‌های مورد نظر در این پژوهش در نظر می‌گیریم [۳۱]:

$$\sigma_0 = \sigma_{SDSS} \left(\frac{r_{fiber}}{\frac{r_{cor}}{8}} \right)^{0.04} \quad (2)$$

در این رابطه σ_0 سرعت پراکندگی تصحیح شده، σ_{SDSS} سرعت پراکندگی اولیه به دست آمده از مساحی SDSS و r_{fiber} اندازه شعاع فیبر نوری است. همچنین r_{cor} به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$r_{cor} = r_{SDSS} \left(qb/a \right)^{0.5} \quad (3)$$

که در این رابطه qb/a معرف نسبت نیم‌قطر کوچک به نیم قطر بزرگ است که در مساحی SDSS تحت عنوان پروفایل دیوکولرز شناخته شده است.



شکل ۴. نمودار تغییرات سرعت پراکندگی برحسب جرم ستاره‌ای کهکشان‌های پیر و جوان در دو محیط مختلف

در دهه‌های اخیر به کمک داده‌های رصدی و شبیه‌سازی، مطالعات گسترده‌ای بر روی سرعت پراکندگی کهکشان‌ها صورت گرفته است که ارتباط میان پتانسیل گرانشی و سرعت پراکندگی کهکشان را نشان می‌دهند، به نحوی که هاله‌های سنگین‌تر دارای سرعت پراکندگی بیش‌تری هستند [۳۲]. از طرف دیگر نتایج به دست آمده بر روی شبیه‌سازی‌های هیدرودینامیکی کیهانی نشان از ارتباط میان سرعت پراکندگی کهکشان و سرعت پراکندگی هاله ماده تاریک دارد [۳۹]. همچنین مطالعات آماری نشان می‌دهند که تأثیر ناشی از رشد جرم کهکشان‌ها بر روی سرعت پراکندگی بسیار بیش‌تر از تأثیری است که رشد اندازه کهکشان‌ها بر روی سرعت پراکندگی کهکشان‌ها دارد. این اثر سبب می‌شود که در کهکشان‌های خاموش با افزایش جرم ستاره‌ای سرعت پراکندگی هم افزایش یابد [۴۱]. شکل-۴، ارتباط میان سرعت پراکندگی کهکشان‌های پیر و جوان در دو محیط خوشه و تهی‌جا را برحسب جرم آنها نشان می‌دهد. همان‌طور که از روی شکل نمایان است، در هر دو محیط سرعت پراکندگی کهکشان‌های پیر نسبت به جوان بیش‌تر است و با افزایش جرم، سرعت پراکندگی کهکشان‌ها افزایش می‌یابد. که این می‌تواند به این دلیل باشد که احتمالاً کهکشان‌های پیرتر در انتقال به سرخ‌های بالاتر در یک جهان متراکم با چگالی بالا و گاز زیاد تشکیل شده‌اند که باعث شده است کهکشان‌های پیرتر سرعت پراکندگی بالاتری داشته باشند [۴۱]. اما در کهکشان‌های جوان، با افزایش جرم، سرعت پراکندگی در هر دو محیط ابتدا کاهش می‌یابد و پس از این‌که مقدار آن به طور آماری در بازه $9.0 < \log\left(\frac{m}{m_{\odot}}\right) < 10.0$ تقریباً ثابت ماند، سرعت پراکندگی افزایش می‌یابد.

رابطه بین جرم و شاخص سرسیک

امروزه تابع سرسیک به عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌های توصیف توزیع نور از مرکز تالیه کهکشان معرفی می‌شود. این تابع که به نوعی تعمیم یافته مدل دیوکولرز است دارای سه پارامتر آزاد R_e شعاع مؤثر، I_e درخشندگی در شعاع مؤثر و n شاخص سرسیک است. توزیع نور بر حسب فاصله از مرکز کهکشان بر اساس پروفایل سرسیک، به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$I(R) = I_e \exp\left(-b_n \left[\left(\frac{R}{R_e}\right)^{\frac{1}{n}} - 1\right]\right) \quad (4)$$

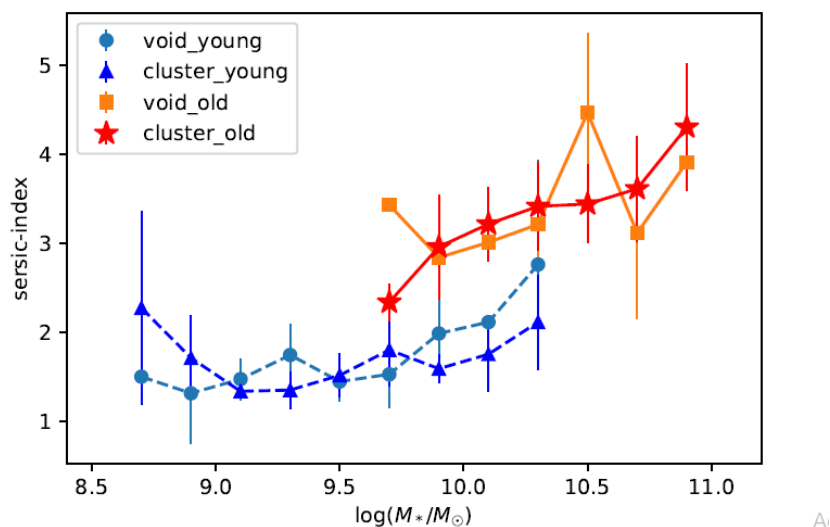
که در این رابطه میزان تمرکز نور کهکشان به کمک پارامتر شاخص سرسیک تعیین می‌شود. مطالعات نشان می‌دهند که اندیس سرسیک با ریخت کهکشان‌ها ارتباط دارد. به طور مثال کاجنر و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که کهکشان‌هایی که مقدار شاخص سرسیک آنها کم‌تر از ۲/۵ است، کهکشان‌های مارپیچی هستند که مؤلفه دیسک آنها نسبت به مؤلفه برآمدگی^{۱۴} کهکشان غالب است و در مقابل کهکشان‌هایی که مؤلفه برآمدگی آنها غالب است و همچنین از نوع کهکشان‌های بیضوی هستند دارای شاخص سرسیک بیش‌تر از ۲/۵ هستند [۲۳]. علاوه بر این نزدیک بودن مقدار پارامتر شاخص سرسیک برای کهکشان‌های بیضوی و قسمت برآمدگی کهکشان‌های مارپیچی، نشان از این دارد که تاریخچه شکل‌گیری و تحول آنها تقریباً یکسان است [۳۳]. در جدول ۲- بر اساس معیار مطالعات کاجنر و همکاران (۲۰۱۷) در دو محیط خوشه و تهی‌جا، درصد فراوانی کهکشان‌هایی که دارای شاخص سرسیک کم‌تر و بیش‌تر از ۲/۵ هستند را مورد مطالعه قرار دادیم. بر اساس آمار به‌دست آمده در هر دو محیط، عمده کهکشان‌هایی که دارای $n > 2/5$ هستند، از نوع کهکشان‌های پیر می‌باشند و در مقابل عمده کهکشان‌های با $n < 2/5$ شامل کهکشان‌های جوان هستند. همچنین برای کهکشان‌هایی که دارای $n > 2/5$ هستند، درصد فراوانی کهکشان‌های پیر درون محیط خوشه بیش‌تر از محیط تهی‌جا است، در مقابل درصد فراوانی کهکشان‌های پیر در محیط‌های تهی‌جا با $n < 2/5$ بیشتر از محیط خوشه است.

جدول ۲: درصد فراوانی کهکشان‌های پیر و جوان در دو محیط خوشه و تهی‌جا براساس پارامتر سرسیک

	$n > 2/5$		$n < 2/5$	
	پیر	جوان	پیر	جوان
خوشه	٪۹۰	٪۱۲	٪۱۰	٪۸۸
تهی‌جا	٪۸۵	٪۱۲	٪۱۵	٪۸۸

¹⁴ Bulge

شکل ۵ رابطه میان شاخص سرسیک و جرم کهکشان‌های پیر و جوان را در دو محیط خوشه و تهی‌جا نشان می‌دهد. براساس این شکل در هر دو محیط، شاخص سرسیک برای کهکشان‌های پیر بزرگ‌تر از کهکشان‌های جوان است (حتی در نواحی که دارای جرم یکسانی هستند $10/25 < \log\left(\frac{m}{m_{\odot}}\right) < 9/75$). همچنین وابستگی میان جرم و شاخص سرسیک کهکشان‌های جوان در هر دو محیط دیده نمی‌شود و عمده کهکشان‌ها دارای شاخص سرسیک بین ۱/۵ تا ۲ هستند. اما در مقابل در کهکشان‌های پیر با افزایش جرم، شاخص سرسیک افزایش می‌یابد که البته این ارتباط برای کهکشان‌های خوشه نسبت به کهکشان‌های تهی‌جا نمایان‌تر است. با توجه به این‌که به طور آماری تغییرات شاخص سرسیک با جرم برای هر دو نمونه کهکشان‌های جوان و پیر در دو محیط خوشه و تهی‌جا تقریباً یکسان است، می‌توان نتیجه گرفت که سیر تحولی کهکشان‌های پیر و جوان وابسته به محیط کهکشانی نیست. زاهد و همکارانش در سال ۲۰۱۷، از ارتباطی که میان اندیس سرسیک و سرعت پراکندگی کهکشان‌های خاموش وجود داشت، دریافتند کهکشان‌های خاموش از نظر ساختاری همگن نیستند [۴۱]، که در این پژوهش این ارتباط، هم برای کهکشان‌های پیر (در هر دو محیط) و هم برای کهکشان‌های جوانی که در خوشه‌ها قرار دارند، مشاهده می‌شود.

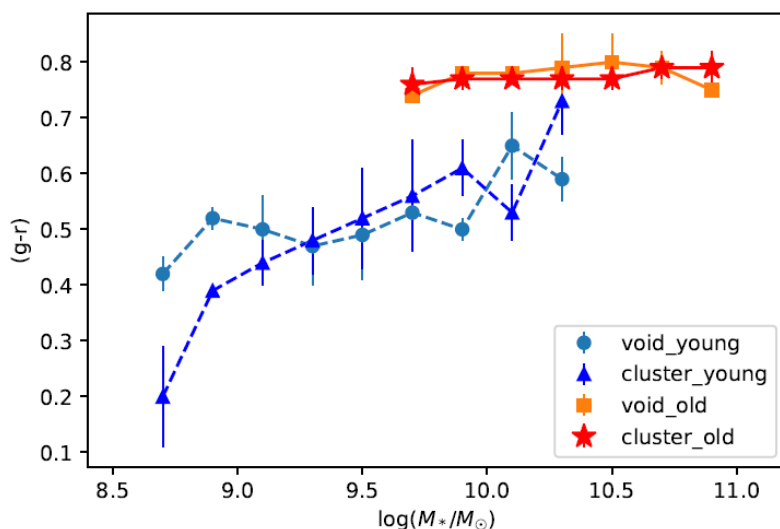


شکل-۵. نمودار تغییرات شاخص سرسیک برحسب جرم ستاره‌های کهکشان‌های پیر و جوان در دو محیط مختلف

رابطه بین جرم با رنگ

مطالعات آماری بر روی داده‌های رصدی نشان از ارتباط میان جرم و سن کهکشان با رنگ آن دارد. به نحوی که کهکشان‌های پر جرم و پیر قرمزتر از کهکشان‌های کم جرم و جوان دیده می‌شوند [۸]. علاوه بر این طی بررسی‌های آماری انجام شده، بیشتر کهکشان‌های نوع پی‌شین^{۱۵} دارای رنگ آبی و کهکشان‌های نوع پ‌سین^{۱۶} دارای رنگ قرمز هستند [۳۷]. اما بین دو گروه کهکشان‌های قرمز و آبی گروهی از کهکشان‌ها قرار دارند که کهکشان‌های سبز نام دارند. کهکشان‌های سبز در حال تغییر ریخت بین دو جمعیت آبی و قرمز هستند. بر اساس نتایج به دست آمده از مطالعات جرارد و همکارانش (۲۰۲۱)، کهکشان‌های سبزی که در انتقال به سرخ‌های پایین قرار دارند شامل هر دو دسته از کهکشان‌های نوع پ‌سین و نوع پیشین می‌باشند [۲۰].

شکل-۶ ارتباط میان رنگ و جرم کهکشان‌های پیر و جوان در دو محیط خوشه و تهی‌جا نشان می‌دهد. براساس این شکل، کهکشان‌های پیر نسبت به کهکشان‌های جوان قرمزتر دیده می‌شوند که مطابق با نتایج پیش‌بینی شده است. کهکشان‌های جوان در هر دو محیط خوشه و تهی‌جا با افزایش جرم دارای یک روند رو به افزایش هستند در صورتی که برای کهکشان‌های پیر وابستگی میان رنگ و جرم کهکشان وجود ندارد و در هر دو محیط رنگ کهکشان در طول بازه جرم به طور آماری دارای مقدار ثابت $g-r = 0.8$ است. براساس این شکل، عمده کهکشان‌های جوان در هر دو محیط تهی‌جاها و خوشه‌ها به رنگ آبی هستند، با این حال، در هر دو محیط تعدادی از آنها به رنگ سبز دیده می‌شوند که با نتایج جرارد و همکاران (۲۰۲۱) سازگاری دارد.



شکل-۶. نمودار تغییرات جرم برحسب رنگ کهکشان‌های پیر و جوان در دو محیط خوشه و تهی‌جا

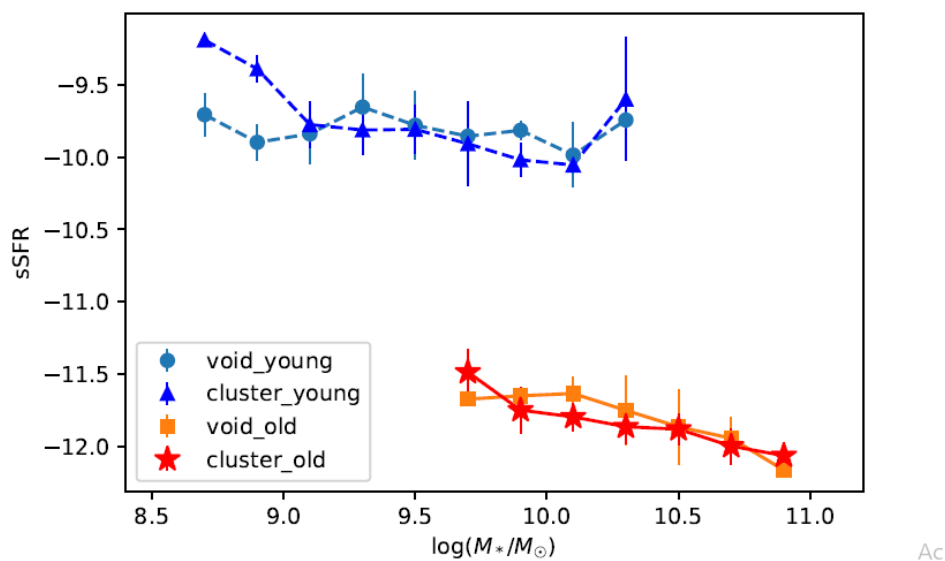
¹⁵ Early-type

¹⁶ Late-type

رابطه بین جرم با نرخ ستاره‌زایی ویژه^{۱۷}

نرخ ستاره‌زایی ویژه یک کهکشان پارامتری است که آهنگ ستاره‌زایی در واحد جرم کهکشان را بیان می‌کند که به میزان گاز سرد موجود در کهکشان ارتباط دارد. هرچقدر میزان گاز سرد در یک کهکشان بیشتر باشد به همان نسبت میزان ستاره‌زایی در یک کهکشان افزایش می‌یابد [۳۲]، از طرفی دیگر با افزایش ستاره‌زایی، سرعت پراکندگی هم در آن کهکشان افزایش می‌یابد پس براساس نتایج به دست آمده ارتباط مستقیمی بین میزان ستاره‌زایی و سرعت پراکندگی یک کهکشان وجود دارد [۱۴]. در دهه اخیر، مطالعات صورت گرفته بر روی نرخ ستاره‌زایی کهکشان‌ها در انتقال بسرخ‌های مختلف کمک شایانی در دانستن چگونگی شکل‌گیری و تحول کهکشان‌ها داشته است [۷].

شکل-۷ رابطه بین نرخ ستاره‌زایی ویژه کهکشان‌های پیر و جوان در دو محیط خوشه و تهی‌جا را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است میزان ستاره‌زایی کهکشان‌های جوان در هر دو محیط بسیار بیشتر از کهکشان‌های پیر است و همچنین با افزایش جرم، آهنگ ستاره‌زایی کهکشان‌های پیر و جوان کاهش می‌یابد.



شکل-۷. نمودار تغییرات نرخ ستاره‌زایی برحسب جرم کهکشان‌های پیر و جوان در دو محیط مختلف

¹⁷specific Star Formation Rate (sSFR)

نتیجه‌گیری

در این مطالعه براساس داده‌های مساحی SDSS، ویژگی‌های فیزیکی کهکشان‌های پیر و جوان در دو محیط پرچگال (خوشه) و کم‌چگال (تهی جا) مورد بررسی قرار دادیم. کهکشان‌های در نظر گرفته شده در این پژوهش دارای قدر درخشان-تر از $M_r \sim -17$ و در انتقال بسرخ $z < 0/04$ هستند. با توجه به نتایج به دست آمده، در هر دو محیط کهکشان‌های پیر دارای اندازه کوچک‌تر و سرعت پراکندگی بیش‌تری نسبت به کهکشان‌های جوان هستند. همچنین کهکشان‌های جوان با افزایش جرم قرمزتر می‌شوند اما رنگ کهکشان‌های پیر کاملاً از جرم و محیط مستقل است. علاوه بر این، تغییرات نرخ ستاره‌زایی کهکشان‌های جوان (پیر) برحسب جرم آنها در هر دو محیط یکسان است و با افزایش جرم کاهش می‌یابد. با توجه به مطالعات صورت گرفته در این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که ویژگی‌های فیزیکی کهکشان‌های پیر و جوان مستقل از محیط کهکشانی است. نتایج به دست آمده در این پژوهش و مقایسه آنها با نتایج شبیه‌سازی، می‌تواند نقش به‌سزایی در فهمیدن ارتباط میان محیط‌های کهکشانی و تحول کهکشان‌ها داشته باشد.

منابع

1. Balogh, Michael L., et al. "Differential galaxy evolution in cluster and field galaxies at $z=0.3$." *The Astrophysical Journal* 527.1 (1999): 54.
2. Behroozi, P., Wechsler, R. H., Hearin, A. P., & Conroy, C. (2019). UniverseMachine: The correlation between galaxy growth and dark matter halo assembly from $z=0-10$. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 488(3), 3143-3194.
3. Blanton, Michael R., et al. "New York University Value-Added Galaxy Catalog: A galaxy catalog based on new public surveys." *The Astronomical Journal* 129.6 (2005): 2562.
4. Brinchmann, Jarle, et al. "The physical properties of star-forming galaxies in the low-redshift Universe." *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 351.4 (2004): 1151-1179.
5. Bruzual, G. 1983, ApJ, 273, 105
6. Couch, Warrick J., and R. M. Sharples. "A spectroscopic study of three rich galaxy clusters at $Z=0.31$." *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 229.3 (1987): 423-456.

7. Davies, L. J. M., et al. "Galaxy And Mass Assembly (GAMA): The sSFR–M* relation part I–σsSFR–M* as a function of sample, SFR indicator, and environment." *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 483.2 (2019): 1881-1900.
8. Dekel, Avishai, and Yuval Birnboim. "Galaxy bimodality due to cold flows and shock heating." *Monthly notices of the royal astronomical society* 368.1 (2006): 2-20.
9. Dressler, A., I. B. Thompson, and S. A. Sheckman. "Statistics of emission-line galaxies in rich clusters." *The Astrophysical Journal* 288 (1985): 481-486.
10. Dressler, Alan. "Galaxy morphology in rich clusters-Implications for the formation and evolution of galaxies." *The Astrophysical Journal* 236 (1980): 351-365.
11. Dressler, Alan, et al. "Studying the star formation histories of galaxies in clusters from composite spectra." *The Astrophysical Journal* 617.2 (2004): 867.
12. Einasto, Jaan, et al. "Toward understanding environmental effects in SDSS clusters." *Astronomy & Astrophysics* 439.1 (2005): 45-58.
13. Fernández Lorenzo, M., Sulentic, J., Verdes-Montenegro, L., & Argudo-Fernández, M. (2013). The stellar mass–size relation for the most isolated galaxies in the local Universe. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 434(1), 325-335.
14. Girard, M., et al. "Systematic difference between ionized and molecular gas velocity dispersion in $z \sim 1-2$ disks and local analogues." *arXiv preprint arXiv:2101.04122* (2021).
15. Gomez, Percy L., et al. "Galaxy star formation as a function of environment in the early data release of the sloan digital sky survey." *The Astrophysical Journal* 584.1 (2003): 210.
16. Gunn, James E., and J. Richard Gott III. "On the infall of matter into clusters of galaxies and some effects on their evolution." *The Astrophysical Journal* 176 (1972): 1.

17. Hashimoto, Yasuhiro, et al. "The influence of environment on the star formation rates of galaxies." *The Astrophysical Journal* 499.2 (1998): 589.
18. Hogg, David W., et al. "The dependence on environment of the color-magnitude relation of galaxies." *The Astrophysical Journal Letters* 601.1 (2004): L29.
19. Huertas-Company, M., Mei, S., Shankar, F., Delaye, L., Raichoor, A., Covone, G., ... & Povic, M. (2013). The evolution of the mass–size relation for early-type galaxies from $z \sim 1$ to the present: dependence on environment, mass range and detailed morphology. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 428(2), 1715-1742.
20. Hung, Chao-Ling, et al. "What drives the evolution of gas kinematics in star-forming galaxies?." *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 482.4 (2019): 5125-5137.
21. Kauffmann, Guinevere, et al. "Stellar masses and star formation histories for 105 galaxies from the Sloan Digital Sky Survey." *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 341.1 (2003): 33-53.
22. Kormendy, John, et al. "Structure and formation of elliptical and spheroidal galaxies." *The Astrophysical Journal Supplement Series* 182.1 (2009): 216.
23. Kuchner, U., et al. "The effects of the cluster environment on the galaxy mass-size relation in MACS J1206. 2-0847." *Astronomy & Astrophysics* 604 (2017): A54.
24. Larson, R. B., B. M. Tinsley, and C. Nelson Caldwell. "The evolution of disk galaxies and the origin of S0 galaxies." *The Astrophysical Journal* 237 (1980): 692-707.
25. Lewis, Ian, et al. "The 2dF Galaxy Redshift Survey: the environmental dependence of galaxy star formation rates near clusters." *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 334.3 (2002): 673-683.
27. Li, Cheng, et al. "P-MaNGA: gradients in recent star formation histories as diagnostics for galaxy growth and death." *The Astrophysical Journal* 804.2 (2015): 125.

28. Merritt, D. "Relaxation and tidal stripping in rich clusters of galaxies. I. Evolution of the mass distribution." *The Astrophysical Journal* 264 (1983): 24-48.
28. Postman, M., and M. J. Geller. "The morphology-density relation-The group connection." *The Astrophysical Journal* 281 (1984): 95-99.
29. Rojas, Randall R., et al. "Spectroscopic properties of void galaxies in the sloan digital sky survey." *The Astrophysical Journal* 624.2 (2005): 571.
30. Salim, Samir, et al. "UV star formation rates in the local universe." *The Astrophysical Journal Supplement Series* 173.2 (2007): 267.
31. Saulder, Christoph, et al. "Calibrating the fundamental plane with SDSS DR8 data." *Astronomy & Astrophysics* 557 (2013): A21.
32. Seo, Gangil, Jubee Sohn, and Myung Gyoon Lee. "Tracing Dark Matter Halos with Satellite Kinematics and the Central Stellar Velocity Dispersion of Galaxies." *The Astrophysical Journal* 903.2 (2020): 130.
33. Sersic, J. L. (1968). Atlas de galaxias australes. adga.
34. Shankar, Francesco, and Mariangela Bernardi. "The age dependence of the size–stellar mass relation and some implications." *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters* 396.1 (2009): L76-L80.
35. Tavasoli, Saeed, et al. "The Galaxy Population in Voids: Are All Voids the Same?." *The Astrophysical Journal Letters* 803.1 (2015): L13.
36. Tempel, E., et al. "Flux-and volume-limited groups/clusters for the SDSS galaxies: catalogues and mass estimation." *Astronomy & Astrophysics* 566 (2014): A1.

37. van der Wel, Arjen. "The dependence of galaxy morphology and structure on environment and stellar mass." *The Astrophysical Journal Letters* 675.1 (2008): L13.
38. Veilleux, Sylvain, Gerald Cecil, and Joss Bland-Hawthorn. "Galactic winds." *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 43 (2005): 769-826.
39. Vogelsberger, Mark, et al. "Introducing the Illustris Project: simulating the coevolution of dark and visible matter in the Universe." *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 444.2 (2014): 1518-1547.
40. Zahid, H with Dynamical. Jabran, and Margaret J. Geller. "Velocity Dispersion, Size, Sérsic Index, and $D_n 4000$: The Scaling of Stellar Mass Mass for Quiescent Galaxies." *The Astrophysical Journal* 841.1 (2017): 32.
41. Zahid, H. Jabran, et al. "Quiescent Compact Galaxies at Intermediate Redshift in the COSMOS Field. II. The Fundamental Plane of Massive Galaxies." *The Astrophysical Journal* 806.1 (2015): 122.