

بررسی اثر ستاره‌های سنگین بر تحول دینامیکی خوشه‌های باز با به کارگیری دو روش نمونه‌گیری بهینه و نمونه‌گیری تصادفی

ملیحه ربیعی، اکرم حسنی زنوزی، و حسین حقی

دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان

پست الکترونیکی: m.rabiee@iasbs.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۲۸؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۲/۰۳/۰۴)

چکیده:

ستاره‌های سنگین از نوع O و B (OB) موجود در خوشه‌های باز، اثر مهمی بر تحولات دینامیکی این خوشه‌ها دارند. در شبیه‌سازی خوشه‌های ستاره‌ای، روش نمونه‌گیری به کار گرفته شده در تعیین تابع جرم خوشه، بر تعداد و جرم ستاره‌های سنگین مؤثر است. دو روش «نمونه‌گیری بهینه» و «نمونه‌گیری تصادفی» برای تولید ستاره‌های اولیه خوشه پیشنهاد شده است. در روش نمونه‌گیری تصادفی، تغییر عدد تصادفی جرم سنگین‌ترین ستاره و تعداد ستاره‌های سنگین را تغییر می‌دهد که این موضوع بر تحول دینامیکی خوشه‌های باز جوان اثرگذار است. بررسی‌های ما نشان می‌دهد که اگر طبیعت از روش نمونه‌گیری تصادفی در تولید ستاره‌ها پیروی کرده باشد، بسته به این که تعداد ستاره‌های OB در آنها چقدر باشد، مسیر تحولی خوشه‌های کم جرم با شرایط اولیه یکسان می‌تواند کاملاً متفاوت باشد. این بدان معنی است که در مدل‌هایی که تعداد ستاره‌های OB بیشتر است و در نتیجه آن بقایای ستاره‌های بیشتری تشکیل می‌شوند، خوشه با نرخ سریع‌تری جرم از دست می‌دهد و در زمان کوتاه‌تری منحل می‌شود. همچنین در این مقاله نشان داده شده است که نگهداشتن بقایای ستاره‌ای در خوشه نقش مهمی در تحول خوشه بازی می‌کند. در مدل‌هایی که تعداد ستاره‌های سنگین بیشتر است، در صورت نگهداشتن بقایای ستاره‌ای در خوشه، سرعت انحلال افزایش می‌یابد. اگر چه با در نظر گرفتن مدل‌های واقعی‌تر برای این خوشه‌های جوان و کم جرم، که اکثر بقایای ستاره‌ای بلافاصله بعد از تشکیل از خوشه خارج شوند، تفاوت روند تحولی مدل‌های با ستاره‌های OB-min و OB-max کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: خوشه باز، تابع جرم اولیه، نمونه‌گیری بهینه، نمونه‌گیری تصادفی

۱. مقدمه

منحل شده و به ستاره‌های زمینه کهنکشان‌ها ملحق شده‌اند. این خوشه‌ها غالباً جرم کمی دارند و جرم اکثر آنها کمتر از $10^5 M_{\odot}$ است. همچنین خوشه‌های باز جوان، سامانه‌های ستاره‌ای مهمی برای مطالعه شکل‌گیری و تحول ستارگان هستند [۱ و ۲]. ستاره‌های سنگینی که در زمان شکل‌گیری این خوشه‌ها متولد شده‌اند، بر تحول دینامیکی و بلند مدت این خوشه‌ها بسیار اثرگذارند. ستاره‌های سنگین، ستاره‌هایی از نوع

خوشه‌های ستاره‌ای باز، مجموعه‌ای از چند صد تا چند هزار ستاره هستند که تقریباً هم‌زمان در یک ابر مولکولی متولد شده‌اند. این خوشه‌ها به طور معمول با سنی کمتر از ۱ میلیارد سال، نسبت به خوشه‌های کروی در کهنکشان جوان‌تر هستند. بنابراین کسر قابل توجهی از خوشه‌های بازی که در گذشته تشکیل شده‌اند، احتمالاً

O یا B هستند که جرم اولیه آنها بیش از ۸ برابر جرم خورشید است و عمرشان پس از یک انفجار ابرنواختری پایان می‌یابد [۳ و ۴] و به بقایای ستاره‌ای^۱ یعنی سیاه‌چاله‌ها و ستاره‌های نوترونی تبدیل می‌شوند. وجود ستاره‌های سنگین در خوشه‌های جوان و چگال می‌تواند منجر به شکل‌گیری دوتایی‌های سیاه‌چاله-سیاه‌چاله شود، که منشأ تابش امواج گرانشی هستند [۵]. فراوانی ستاره‌های نوع O و B (از این به بعد ستاره‌های OB) در یک خوشه به شرایط اولیه شکل‌گیری آن بستگی دارد و با تابع جرم اولیه^۲ (IMF) مشخص می‌شود.

تابع جرم اولیه، تابع توزیع جرمی ستاره‌هایی است که به طور تقریباً همزمان و در یک «رویداد ستاره‌زایی» در یک حجم مشخص از فضا شکل گرفته‌اند [۶]. از آنجایی که تحول ستاره‌ها به شدت به جرم آنها وابسته است، IMF تحول ستاره‌ای خوشه را به تحول دینامیکی آن مرتبط می‌کند. اروپا با استفاده از مشاهدات مربوط به مجموعه‌ای از سامانه‌هایی که از N ذره تشکیل شده بودند، استنباط کرد که یک رابطه منحصربه‌فرد و جهانی برای تابع جرم اولیه قابل تعریف است؛ که به تابع جرم اولیه استاندارد بندادی^۳ معروف است [۷].

دو روش برای توصیف توزیع جرم یک جمعیت ستاره‌ای معرفی شده‌اند که نمونه‌گیری بهینه و نمونه‌گیری تصادفی نامیده می‌شوند. روش نمونه‌گیری بهینه بر اساس رویکرد خود تنظیمی است. در این رویکرد، فرایندهای فیزیکی همیشه به شرایط مرزی بستگی دارند و پدیده‌ای مانند توزیع جرم ستاره‌ای کاملاً با ابزارهای ریاضی قابل محاسبه است. روش نمونه‌گیری بهینه رابطه جرم سنگین‌ترین ستاره با جرم خوشه [۸]

(mmax-Mecl) و شکل دقیق IMF را به ما می‌دهد. در واقع در این روش، جرم تک تک ستاره‌های خوشه قابل محاسبه است. بنابراین یک همبستگی قوی بین جرم ستاره‌های OB و جرم کل ابر گازی وجود دارد. طبق این رویکرد اصطلاحاً گفته می‌شود که طبیعت هنگام شکل‌گیری ستاره‌ها تاس نمی‌اندازد [۹]. در شبیه‌سازی جمعیت‌های ستاره‌ای در خوشه باز ONC^۴ از روش نمونه‌گیری بهینه استفاده شده است [۱۰ و ۱۱]. این خوشه جوان که کمتر از ۳ میلیون سال عمر دارد، سه جمعیت ستاره‌ای با سن‌های ۲/۸۸، ۱/۸۶ و ۱/۲۳ میلیون سال دارد [۱۲]. بنابراین در جمعیت‌های دوم و سوم هنوز تحول ستاره‌ای چندانی رخ نداده است و روش نمونه‌گیری بهینه، روش مناسبی برای محاسبه جرم و تعداد ستاره‌های سنگین در این جمعیت‌ها است.

در سوی دیگر، روش نمونه‌گیری تصادفی قرار دارد که بر پایه رویکرد جرم حدی جینز^۵ است و تشکیل ستاره‌ها به طور ذاتی پدیده‌ای تصادفی است. یعنی، IMF یک تابع توزیع احتمالی است و تغییرات آماری منجر به تغییر شکل IMF می‌شود. اگر شکل‌گیری ستاره‌ها تصادفی باشد، تعداد ستاره‌های OB در یک ابر گازی با نمونه‌گیری تصادفی مشخص می‌شود. بنابراین اگر گروهی از خوشه‌های باز کم جرم، ویژگی‌های اولیه یکسانی داشته باشند (جرم و شعاع یکسان)، به دلیل تنوع زیادی که در تعداد ستاره‌های OB وجود دارد، پس از چندین میلیون سال، تحولات دینامیکی متفاوتی را نشان خواهند داد [۹].

لازم به ذکر است بلافاصله بعد از زمانی که این ستاره‌های سنگین به بقایای ستاره‌ای (یعنی ستاره‌های نوترونی و

۱. Stellar remnants

۲. Initial Mass Function (IMF)

۳. Canonical Initial Mass Function

۴. Orion Nebula Cluster

۵. Jeans-Mass Ansatz

($Z = 0.02$) در نظر گرفته شده است. در روش نمونه‌گیری بهینه، جرم سنگین‌ترین ستاره خوشه با رابطه زیر محاسبه می‌شود [۸]:

$$\log_{10}(M_{max} / M_{\odot}) = 2.56 \log_{10}(M_{ecl} / M_{\odot}) (3.82^{9/17} + \quad (1)$$

$[\log_{10}(M_{ecl} / M_{\odot})]^{9/17})^{1/17} - 0.38$,
در اولین سری شبیه‌سازی‌ها، شعاع نیمه‌جرم اولیه خوشه را $r_h = 2 \text{ pc}$ در نظر می‌گیریم. شرایط اولیه این خوشه را یک بار با روش نمونه‌گیری بهینه و ۳۰۰ بار با روش نمونه‌گیری تصادفی، با استفاده از کد Mcluster^۲ می‌سازیم [۱۷].

همچنین جهت بررسی اثر حفظ بقایای‌های ستاره‌ای در خوشه، بر تحول دینامیکی آن، پارامتری با نام کسر ابقا یا ماندگاری^۳ را نیز وارد می‌کنیم. این که چه درصدی از بقایای انفجارات ابرنواختری، یعنی سیاه‌چاله‌ها و ستاره‌های نوترونی، پس از شکل‌گیری در خوشه باقی می‌ماند، اثر مهمی بر تحول خوشه دارد. کسر ابقا به کسری از بقایای ستاره‌ای که پس از انفجارات ابرنواختری همچنان داخل خوشه باقی می‌مانند، گفته می‌شود و با η نشان داده می‌شود [۱۸]. این کسر بین صفر و یک تغییر می‌کند. اگر $\eta = 1$ باشد پس از انفجار ابرنواختری، بقایای ستاره‌ای در خوشه باقی می‌مانند، تا زمانی که یک فرایند دینامیکی باعث خروج آنها شود. اگر $\eta = 0$ باشد، تمامی بقایای ستاره‌ای پس از شکل‌گیری، سرعت ضربه^۴ دریافت می‌کنند و در زمان کوتاهی از خوشه خارج می‌شوند.

در سری دوم، به منظور بررسی یک مدل واقعی‌تر، شعاع نیمه‌جرم را با استفاده از رابطه مارکس-کروپا به دست می‌آوریم.

سیاه‌چاله‌ها) تبدیل می‌شوند، در اثر سرعت ناشی از عدم تقارن پدیده انفجار ابرنواختری، می‌توانند از خوشه خارج شوند. ما در این مقاله، به بررسی اثر نمونه‌گیری بهینه و نمونه‌گیری تصادفی بر تعداد ستارگان OB و نیز تحول دینامیکی خوشه‌ها در دو حالت می‌پردازیم: ابتدا حالتی که بقایای ستاره‌ای بلافاصله بعد از تشکیل، از خوشه خارج می‌شوند و سپس حالتی که تا مدت زمانی در خوشه باقی می‌مانند.

۲. روش محاسبات

با هدف بررسی اثر ستاره‌های OB و بقایای ستاره‌ای بر تحول دینامیکی خوشه‌های باز، تعدادی شبیه‌سازی N ذره‌ای با استفاده از کد NBODY7 انجام می‌دهیم. کد NBODY7 نسخه جدیدتری از کد NBODY6 است، که امکان دستیابی به ادغام نسبی عامی را برای جملات فراینوتونی^۱ فراهم می‌کند [۱۳ و ۱۴].

در این مقاله، دو سری شبیه‌سازی انجام می‌دهیم که برخی ویژگی‌ها در همه شبیه‌سازی‌ها مشترک و برخی متفاوت هستند. در همه مدل‌ها، خوشه‌ای با جرم اولیه $M_{cl} = 1000 M_{\odot}$ ، رخ‌نما چگالی پلامر و تابع جرم اولیه بنادای کروپا [۷]۲۰۰۱ در بازه جرمی $0.8 \leq M / M_{\odot} \leq 150$ تابع جرم بنادای یک رابطه توانی به صورت $\xi(m) = \frac{dN(m)}{dm} \propto m^{-\alpha}$ است که با دو مقدار α تعریف می‌شود. مقدار α برای ستاره‌هایی که در بازه جرمی $0.8 \leq M / M_{\odot} \leq 0.5$ قرار دارند، $\alpha = 1.3 \pm 0.3$ است و برای ستاره‌های سنگین‌تر، $M / M_{\odot} > 0.5$ ، مقدار شیب $\alpha = 2.3 \pm 0.5$ است [۷] و [۱۵]؛ که این مقدار توسط سالپیتر نیز محاسبه شده بود [۱۶]. فلزیت کل خوشه برابر با فلزیت خورشید

۱. Post-Newtonian

۲. <https://github.com/ahwkupper/mcluster.git>

۳. Retention fraction

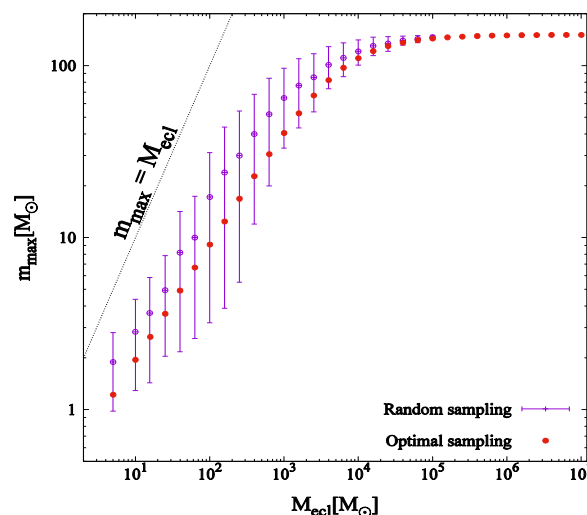
۴. Kick velocity

حسب جرم آن، خوشه‌هایی با جرم‌های مختلف را یک بار با روش نمونه‌گیری بهینه و ۳۰۰ بار با روش تصادفی بازسازی کرده‌ایم.

شکل ۱ نمودار جرم سنگین‌ترین ستاره خوشه (mmax) بر حسب جرم کل خوشه (Mecl) برای خوشه‌هایی در بازه جرمی $5 \leq M/M_{\odot} \leq 10^7$ را نشان می‌دهد.

در شکل ۱ نقاط قرمز رنگ مربوط به مدل‌های بهینه هستند و دایره‌های بنفش رنگ میانگین جرم سنگین‌ترین ستاره بر حسب جرم کل خوشه را برای مدل‌های تصادفی نشان می‌دهند و خطاها انحراف معیار را مشخص می‌کنند. همانطور که می‌بینیم با سنگین‌تر شدن خوشه، خطا کمتر می‌شود و مقدار میانگین به مقدار بهینه نزدیک‌تر می‌شود. در واقع، روش نمونه‌گیری در تعیین جرم ستاره‌های سنگین در خوشه‌های کم‌جرم‌تر که غالباً خوشه‌های باز هستند اهمیت بیشتری دارد و در خوشه‌های سنگین و خوشه‌های کروی هر دو روش نمونه‌گیری تقریباً جرم بیشینه یکسانی تولید می‌کنند.

همچنین جرم سنگین‌ترین ستاره خوشه (mmax) بر حسب مجموع جرم ستاره‌های OB (جرم‌هایی بزرگ‌تر از $8M_{\odot}$ ، MOB) برای خوشه‌هایی با جرم‌های $M = 10^2 M_{\odot}$ ، $M = 10^4 M_{\odot}$ و $M = 10^6 M_{\odot}$ در مدل‌های بهینه و تصادفی با هم مقایسه شده است. در شکل ۲ نقاط قرمز رنگ مربوط به مدل با روش نمونه‌گیری بهینه و نقاط بنفش رنگ مربوط به مدل‌های ساخته شده با روش نمونه‌گیری تصادفی هستند. ردیف بالا مربوط به خوشه‌هایی با جرم اولیه $M = 10^3 M_{\odot}$ و است. ردیف وسط mmax بر حسب MOB برای خوشه‌هایی با جرم $M = 10^4 M_{\odot}$ و ردیف پایین برای خوشه‌هایی با جرم $M = 10^6 M_{\odot}$ را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، مجموع جرم ستاره‌های OB برای خوشه‌های سبک یعنی $1000M_{\odot}$ ، در مدل‌های تصادفی بسیار متفاوت است. ما در شبیه‌سازی‌ها دو مدل با بیشترین و کمترین جرم ستاره‌های OB را در



شکل ۱. نمودار جرم سنگین‌ترین ستاره (mmax) تشکیل شده در خوشه‌هایی با جرم‌های مختلف (Mecl). نقاط قرمز رنگ مربوط به مدل‌های بهینه هستند و دایره‌های بنفش رنگ مقدار میانگین برای ۳۰۰ مدل تصادفی را نشان می‌دهند. خطاها انحراف معیار را نشان می‌دهند.

رابطه شعاع نیمه جرم با جرم خوشه با معادله زیر نشان داده می‌شود [۱۹]:

$$r_h = 0.1 (M_{ecl} / M_{\odot})^{1/3}, \quad (2)$$

این مقدار برای خوشه‌ای با جرم اولیه $M = 1000 M_{\odot}$ برابر با $r_h = 0.25 pc$ به دست می‌آید. در این حالت نیز، خوشه‌ای با روش نمونه‌گیری بهینه و ۳۰۰ خوشه با روش نمونه‌گیری تصادفی می‌سازیم و تحول خوشه‌ها را با فرض‌های $\eta = 1$ و $\eta = 0$ بررسی می‌کنیم. در این شبیه‌سازی‌ها، جمعیت دوتایی‌های اولیه خوشه صفر در نظر گرفته شده است. در تمامی شبیه‌سازی‌ها، خوشه در فاصله ۸/۵ کیلو پارسکی از مرکز کهکشان راه شیری (مدل الن سنتیلن) و در مدار دایره‌ای متحول می‌شود.

۳. نتایج

۳.۱. بیشینه جرم ستاره‌ای و جرم ستاره‌های OB

یکی از مهم‌ترین شاخصه‌های خوشه‌های ستاره‌ای، تعداد ستاره‌های سنگین تشکیل شده در آنها و به خصوص جرم سنگین‌ترین ستاره تشکیل شده در هر خوشه است. برای بررسی بیشینه جرم ستاره‌ای شکل گرفته در خوشه بر

مدل‌های بهینه و OB-min تفاوت چندانی نسبت به یکدیگر نشان نمی‌دهند. در حالی که عمر خوشه OB-max در حدود ۵۳۰ میلیون سال است، عمر مدل‌های بهینه و OB-min، تقریباً ۱/۵ میلیارد سال تخمین زده می‌شود.

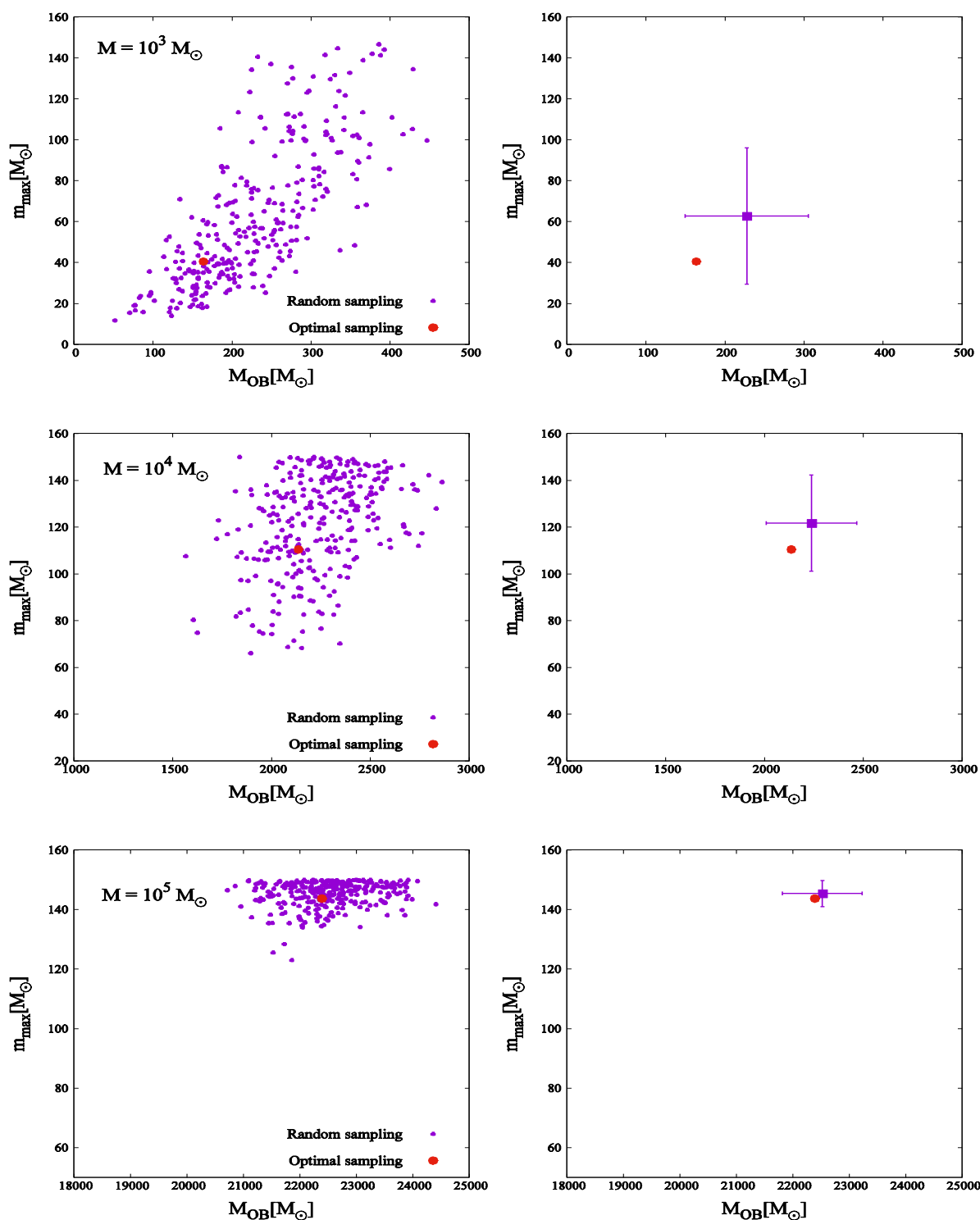
برای آن که تأثیر انتخاب شعاع اولیه واقعی‌تر را بر تحول خوشه‌های جوان بررسی کنیم، یک سری جدید از خوشه‌ها را در نظر می‌گیریم که شعاع اولیه آنها بر اساس رابطه مارکس-کروپا انتخاب شده است. جرم MOB در مدل OB-max برابر با $M_{OB} = 446/5 M_{\odot}$ است که حدود ۴۵ درصد جرم کل خوشه را شامل می‌شود و در مدل OB-min برابر با $M_{OB} = 517 M_{\odot}$ و حدود ۵ درصد جرم کل است. شکل ۴ تحول خوشه‌هایی با شعاع اولیه انتخاب شده بر اساس رابطه مارکس-کروپا را نشان می‌دهد (با فرض $\eta = 1$). در این مدل‌ها سرعت کاهش جرم نسبت به مدل‌هایی با شعاع نیمه جرم ۲ پارسک بیشتر است. همچنین در این مدل‌ها شعاع نیمه جرم سریع‌تر رشد می‌کند. از آنجا که زمان واهلش (tr)، رابطه مستقیم با شعاع نیمه جرم دارد، خوشه‌های با شعاع کوچک‌تر سریع‌تر منبسط می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود، برای مدل‌های OB-min و بهینه که شعاع اولیه آنها از رابطه مارکس-کروپا به دست آمده است خوشه‌ها سریع‌تر متحول می‌شوند، جرم از دست می‌دهند و منبسط می‌شوند، به طوری که شعاع نهایی در ۷۰۰ میلیون سال فرق چندانی با خوشه‌هایی که شعاع اولیه آنها ۲ پارسک در نظر گرفته شده ندارند. در واقع، این خوشه‌ها چنان سریع رشد می‌کنند که در همان ۱۰۰ میلیون سال اول تحول شعاع آنها به ۲ پارسک می‌رسد. همچنین به نظر می‌رسد این خوشه‌ها سریع‌تر از خوشه‌هایی با شعاع اولیه ۲ پارسک منحل شوند.

نظر می‌گیریم و این مدل‌ها را به ترتیب OB-max و OB-min می‌نامیم. شکل ۲ نشان می‌دهد که هر چه خوشه سنگین‌تر می‌شود، پراکندگی در جرم سنگین‌ترین ستاره و مجموع جرم ستاره‌های OB کمتر می‌شود. در واقع هر چه خوشه سنگین‌تر باشد، اثر نمونه‌گیری تصادفی در تعیین جرم ستاره‌های سنگین کمتر است و دو روش نمونه‌گیری تصادفی و بهینه تقریباً mmax و MOB یکسانی را برای خوشه تولید می‌کنند.

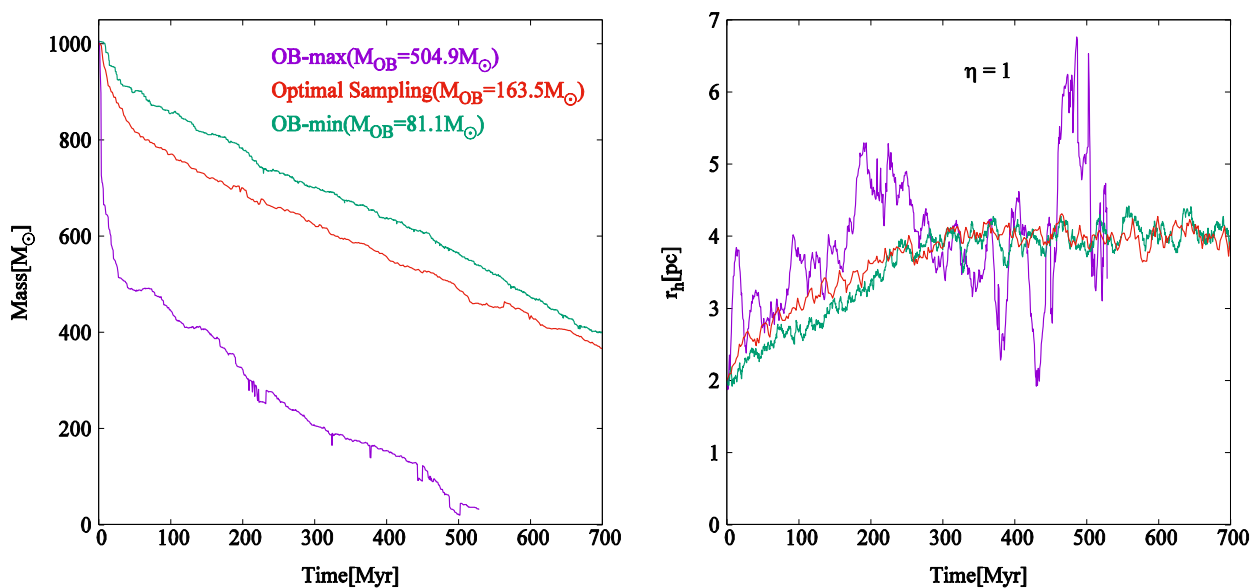
۲.۳. تحول جرم و شعاع

شکل ۳ تحول جرم و شعاع نیمه جرم را برای سه مدل بهینه، OB-min و OB-max برای خوشه‌هایی با شعاع اولیه ۲ پارسک نشان می‌دهد. ابتدا کسر نگهداری بقایای ستاره‌ای در شبیه‌سازی‌ها برابر با ۱ است. در نمونه ۳۰۰ تایی تصادفی، بیشترین جرم ستاره‌های OB، $M_{OB} = 504/9 M_{\odot}$ و کمترین جرم $M_{OB} = 81/1 M_{\odot}$ است. بنابراین در مدل OB-max، جرم MOB حدود ۵۰ درصد و در مدل OB-min این جرم حدود ۸ درصد از جرم کل خوشه را شامل می‌شود. جرم ستاره‌های OB در مدل بهینه $M_{OB} = 163/5 M_{\odot}$ است که حدود ۱۶ درصد جرم کل خوشه است.

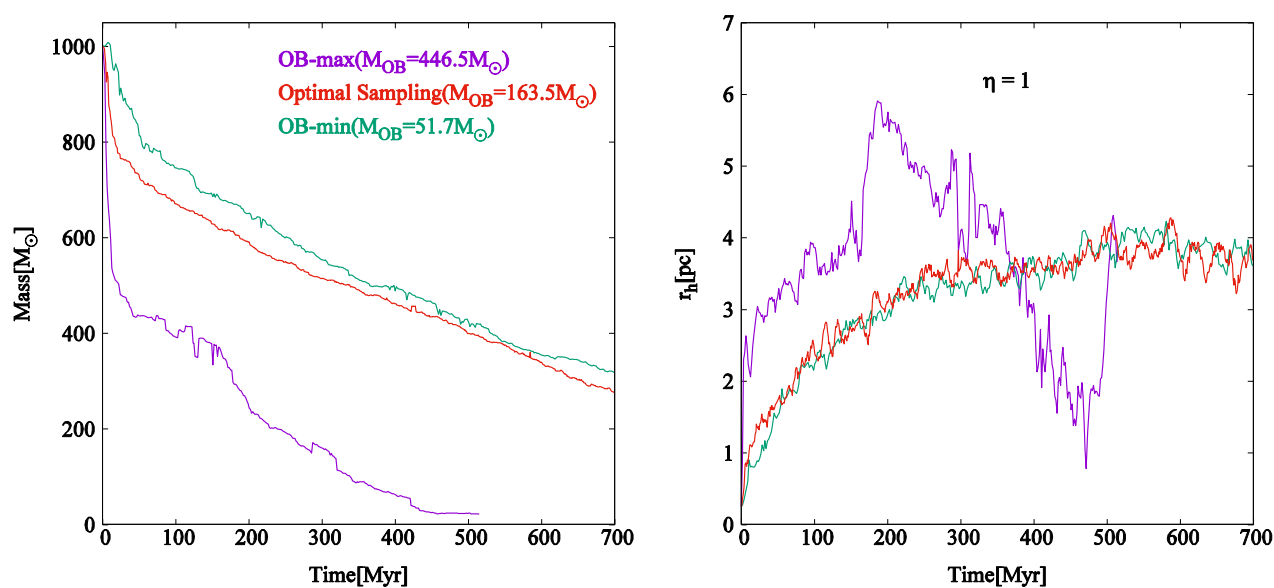
نتایج نشان می‌دهد که بیشترین اثر تحولی در مدل OB-max است. در واقع، در این مدل تحول سریع ستاره‌های سنگین باعث کاهش سریع جرم در اثر بادهای ستاره‌ای و انفجارهای ابرنواختری می‌شود. این کاهش سریع پتانسیل به نوبه خود باعث افزایش سریع شعاع خوشه می‌شود و تبخیر ستاره‌ها را تسریع می‌کند. همچنین در شکل ۳ می‌بینیم که مدل OB-max در زمان $t \approx 530 Myr$ منحل می‌شود. اما دو خوشه مربوط به مدل‌های بهینه و OB-min در زمان ۷۰۰ میلیون حدود $400 M_{\odot}$ جرم دارند و در حال تحولند. شعاع و جرم



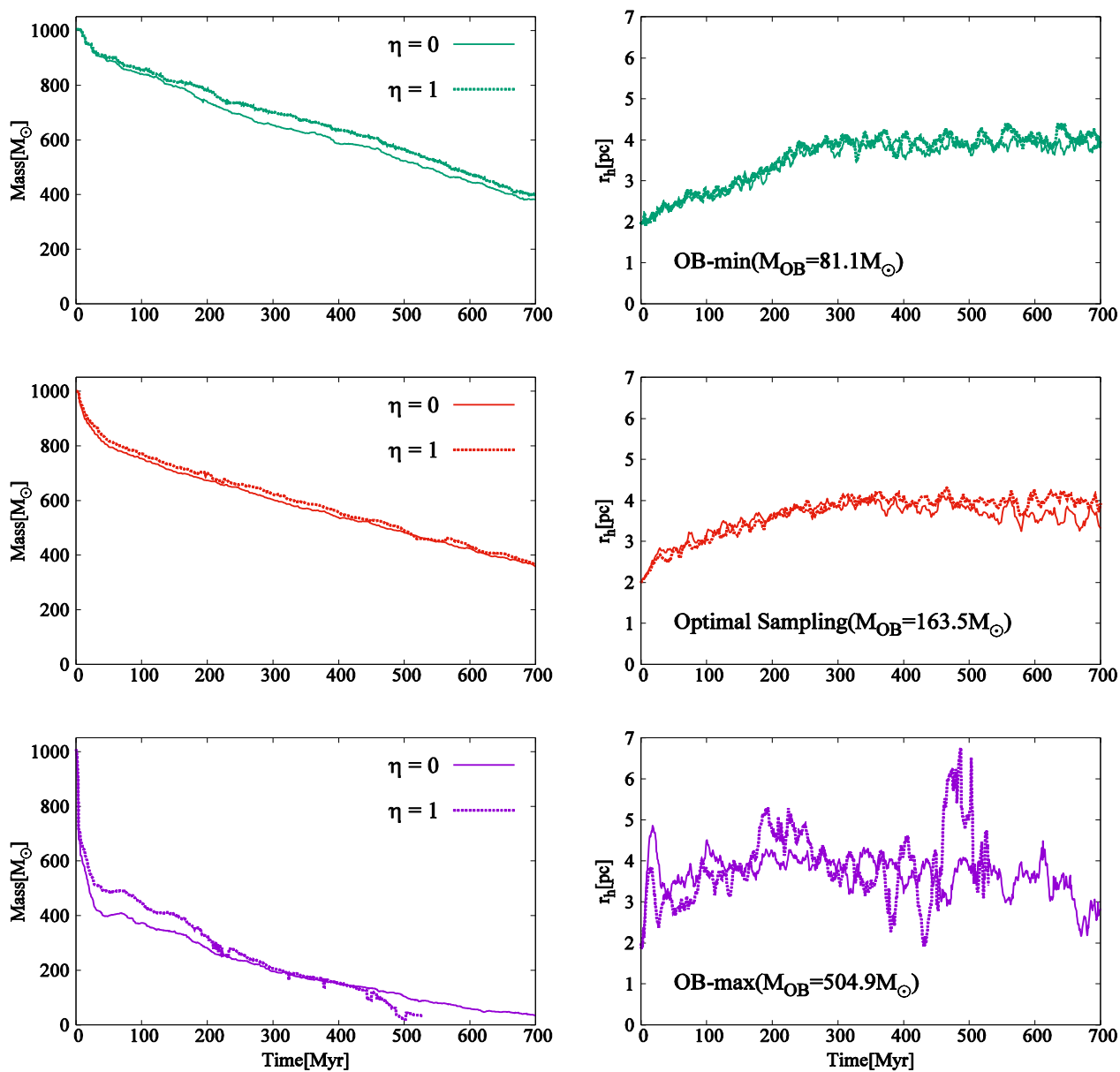
شکل ۲. سمت چپ: جرم سنگین‌ترین ستاره تشکیل شده در خوشه (m_{\max}) بر حسب جرم جمعیت ستاره‌های OB در خوشه (M_{OB}). نقاط بنفش رنگ مربوط به روش نمونه‌گیری تصادفی و نقاط قرمز رنگ مربوط به روش نمونه‌گیری بهینه‌اند. سمت راست: نقطه بنفش رنگ m_{\max} بر حسب متوسط M_{OB} را برای ۳۰۰ مدل تصادفی نشان می‌دهد. خطاها انحراف معیار را نشان می‌دهند. ردیف بالا، وسط و پایین به ترتیب، نتایج شبیه‌سازی برای خوشه‌هایی به جرم $10^3 M_{\odot}$ ، $10^4 M_{\odot}$ و $10^5 M_{\odot}$ را نشان می‌دهد.



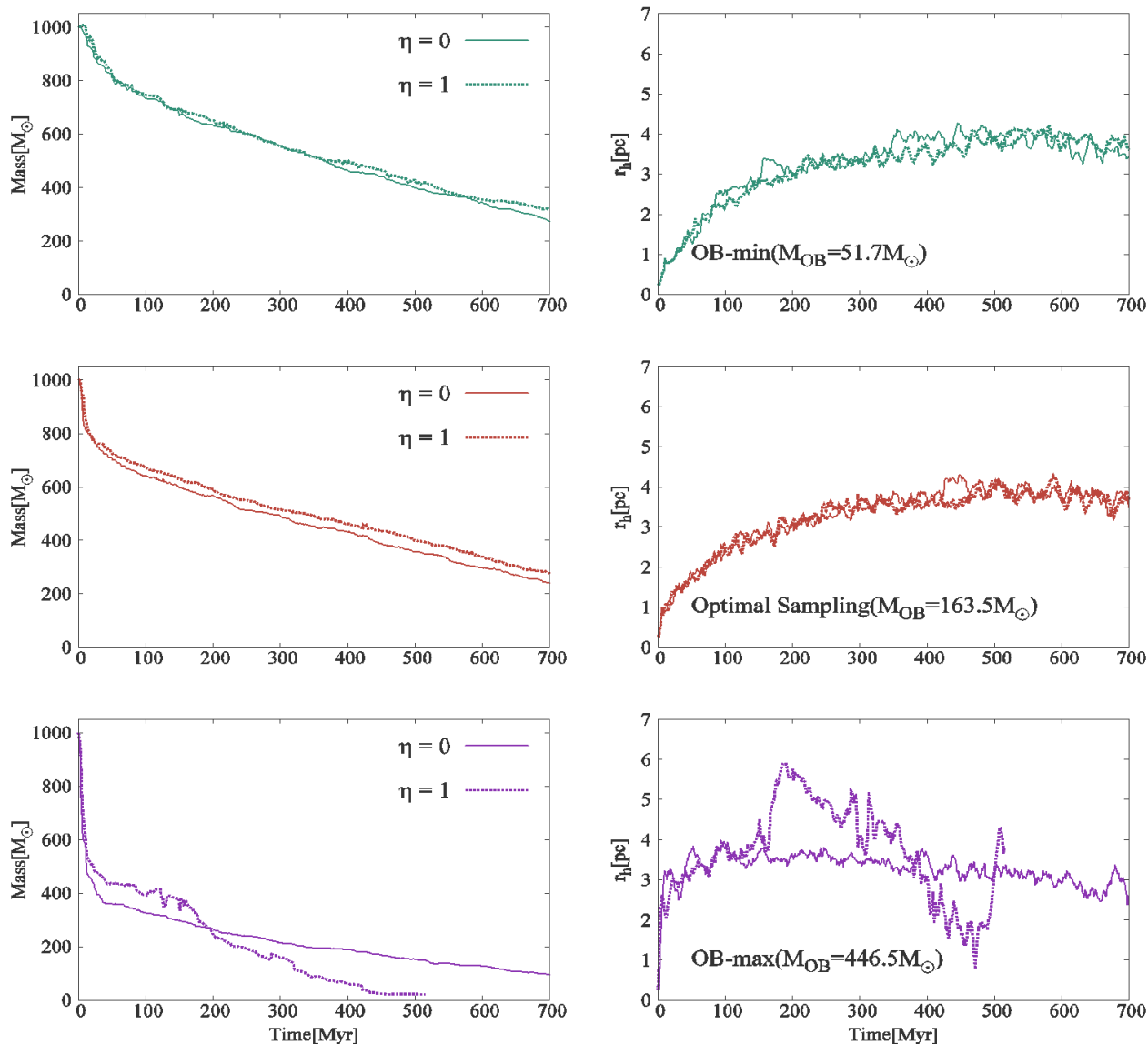
شکل ۳. مقایسه تحول جرم (سمت چپ) و شعاع نیمه جرم (سمت راست) در مدل‌های بهینه، OB-max و OB-min. در تمامی مدل‌ها شعاع نیمه جرم اولیه ۲ پارسک و پارامتر $\eta = 1$ است.



شکل ۴. مقایسه تحول جرم (سمت چپ) و شعاع نیمه جرم (سمت راست) در مدل‌های بهینه، OB-max و OB-min. در تمامی مدل‌ها شعاع نیمه جرم اولیه ۰/۲۵ پارسک و پارامتر $\eta = 1$ است.



شکل ۵. مقایسه اثر پارامتر η تحول جرم و شعاع نیمه جرم خوشه در مدل‌هایی با شعاع نیمه جرم اولیه ۲ پارسک. ردیف‌های اول، دوم و سوم به ترتیب مربوط به مدل OB-min، مدل بهینه و مدل OB-max هستند. خط توپر $\eta = 0$ و خط چین $\eta = 1$ را نشان می‌دهد.



شکل ۶. مقایسه اثر پارامتر η تحول جرم و شعاع نیمه جرم خوشه در مدل‌هایی با شعاع نیمه جرم اولیه ۰.۲۵ پارسک. ردیف‌های اول، دوم و سوم به ترتیب مربوط به مدل OB-min، مدل بهینه و مدل OB-max هستند. خط توپر $\eta = 0$ و خط چین $\eta = 1$ را نشان می‌دهد.

به منظور بررسی اثر بقایای ستاره‌ای در تحول شعاع و جرم این خوشه‌ها، مدل‌های ساخته شده با OB-min، OB-max و مدل بهینه را با در نظر گرفتن $\eta = 0$ دوباره بررسی می‌کنیم. در شکل ۵ تحول جرم و شعاع نیمه جرم برای هر سه خوشه با شعاع اولیه ۲ پارسک، به ازای $\eta = 1$ و $\eta = 0$ با هم مقایسه شده‌اند. همانطور که در شکل ۵ دیده می‌شود نتایج در حالت بهینه و OB-min تفاوت چندانی ندارند، که این به علت کم بودن تعداد بقایای ستاره‌ای است.

۳.۳. تأثیر بقایای ستاره‌ای بر تحول خوشه

فرض $\eta = 1$ مبنی بر این که ۱۰۰ درصد سیاه‌چاله‌ها و ستاره‌های نوترونی پس از انفجار ابرنواختری در خوشه باقی مانده‌اند، نمی‌تواند فرض چندان صحیحی باشد. در خوشه‌های سنگین، تعدادی از سیاه‌چاله‌ها و ستاره‌های نوترونی در اثر انفجار ابرنواختری از خوشه خارج می‌شوند [۲۰]. پتانسیل ناشی از خوشه‌های سبک ($\sim 1000 M_{\odot}$) چندان قوی نیست که بتواند این ستاره‌ها را پس از انفجار ابرنواختری در خوشه حفظ کند [۴].

جدول ۱. جزئیات شبیه‌سازی‌ها برای تمام مدل‌ها با تعداد ستاره‌های OB. شعاع نیمه‌جرم اولیه و کسر ابقای مختلف. ستون اول، شماره مدل را مشخص می‌کند. ستون دوم، شعاع نیمه‌جرم اولیه (بر حسب pc)، ستون سوم، جرم اولیه خوشه (بر حسب M_{\odot})، ستون چهارم روش نمونه‌گیری، ستون پنجم، مقدار پارامتر η ، ستون ششم، شعاع نیمه‌جرم نهایی در زمان $t = 700 \text{ Myr}$ (بر حسب pc)، ستون هفتم، جرم نهایی خوشه در زمان $t = 700 \text{ Myr}$ (بر حسب M_{\odot}) و ستون آخر طول عمر خوشه (بر حسب Gyr) را مشخص می‌کند.

مدل	$r_{h,i}$ (pc)	M_i (M_{\odot})	روش نمونه‌گیری	η	$r_{h,f}(t = 700 \text{ Myr})$ (pc)	$M_f(t = 700 \text{ Myr})$ (M_{\odot})	طول عمر (Gyr)
۱	۲	10^3	بهینه	۱	۳/۷	۳۶۳/۵	۱/۴
۲	۲	10^3	تصادفی، OB-min	۱	۴/۰	۴۰۰/۲	۱/۶
۳	۲	10^3	تصادفی، OB-max	۱	-	-	۰/۵
۴	۰/۲۵	10^3	بهینه	۱	۳/۷	۲۷۵/۴	۱/۳
۵	۰/۲۵	10^3	تصادفی، OB-min	۱	۳/۶	۳۱۷/۵	۱/۷
۶	۰/۲۵	10^3	تصادفی، OB-max	۱	-	-	۰/۵
۷	۲	10^3	بهینه	۰	۳/۳	۳۵۸/۳	۱/۵
۸	۲	10^3	تصادفی، OB-min	۰	۳/۹	۳۸۰/۶	۱/۶
۹	۲	10^3	تصادفی، OB-max	۰	۲/۹	۳۲/۸	۰/۸
۱۰	۰/۲۵	10^3	بهینه	۰	۳/۵	۲۳۹/۰	۱/۳
۱۱	۰/۲۵	10^3	تصادفی، OB-min	۰	۳/۴	۲۷۴/۵	۱/۶
۱۲	۰/۲۵	10^3	تصادفی، OB-max	۰	۲/۵	۹۵/۷	۱/۲

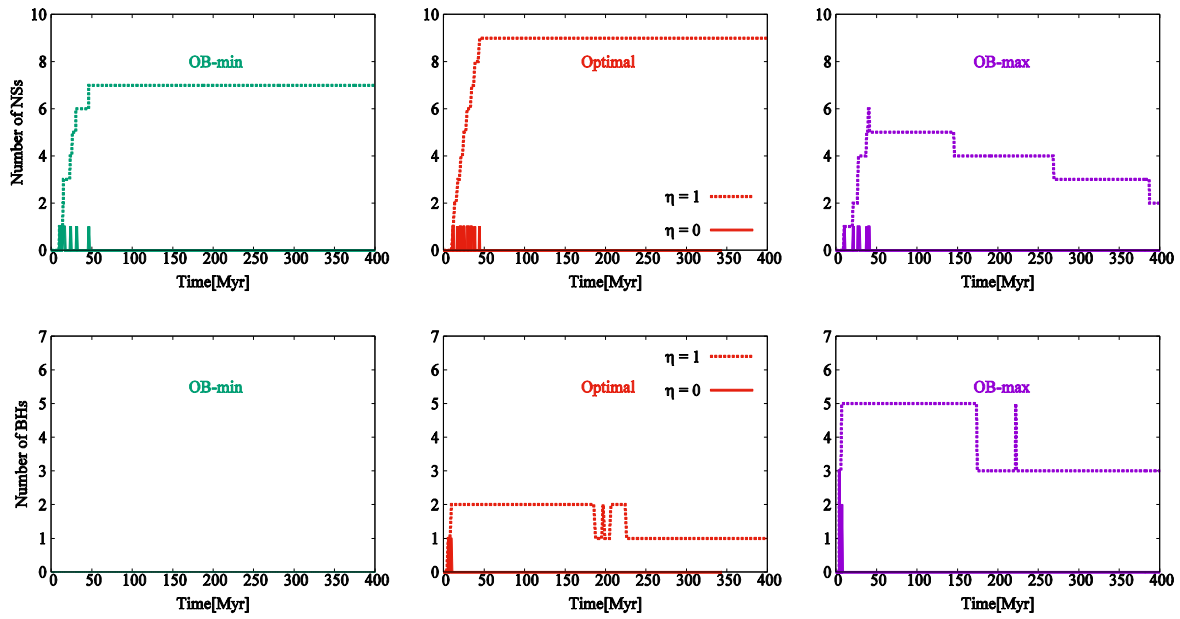
$\eta = 1$ اختلاف کمتری را نشان می‌دهند. نتایج مربوط به شبیه‌سازی‌ها با $\eta = 1$ و $\eta = 0$ در جدول ۱ آمده است.

۴. اثر روش نمونه‌گیری بر تعداد سیاه‌چاله‌ها و ستاره‌های نوترونی

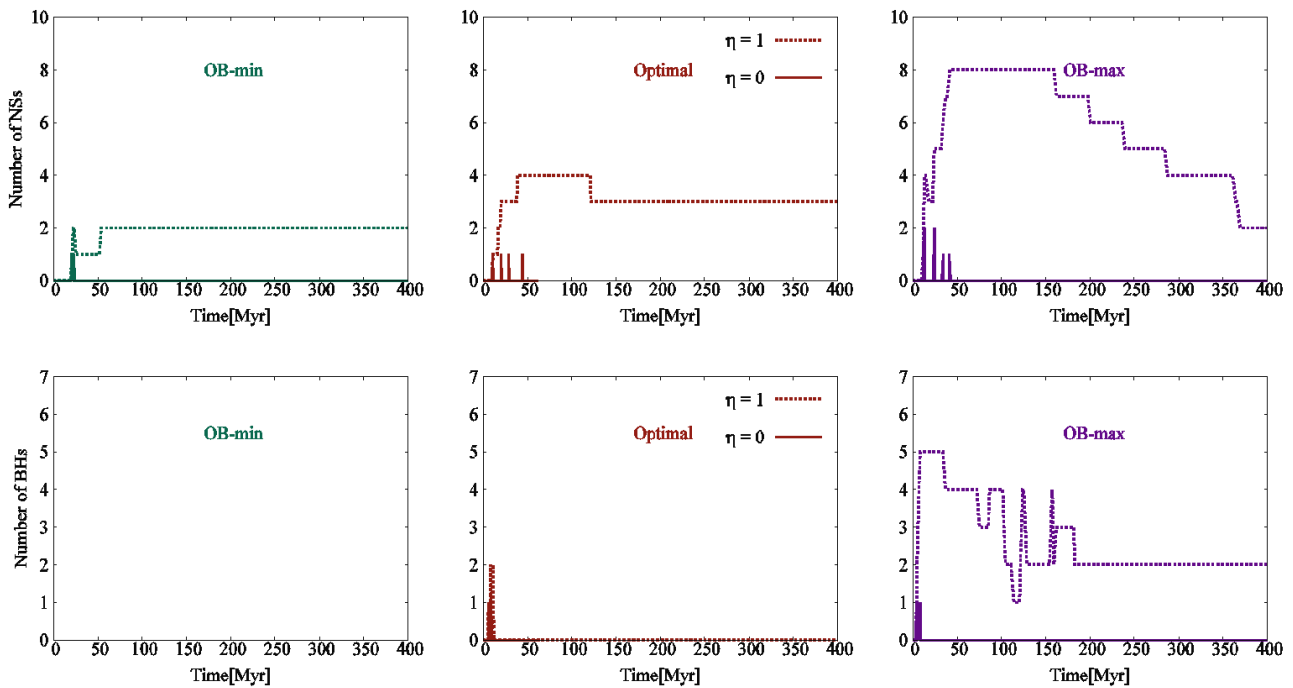
بقایای ستاره‌ای مربوط به ستاره‌های سنگین که شامل سیاه‌چاله‌ها و ستاره‌های نوترونی می‌شوند، اگر چه تأثیر چندانی در درخشندگی سامانه‌های ستاره‌ای ندارند ولی نقش مهمی در جرم و دینامیک این سامانه‌ها بازی می‌کنند. این که چه درصدی از این بقایای ستاره‌ای در خوشه‌های ستاره‌ای باقی می‌مانند و چه درصدی به بیرون پرتاب می‌شوند هنوز موضوعی مورد بحث است و بستگی شدیدی به سرعت لگدزنی که در پدیده انفجار ابرنواختری به بقایای ستاره‌ای وارد می‌شود دارد. البته باید توجه داشت که در هر صورت، بخشی از این بقایای

اما در مدل OB-max که تعداد بقایای ستاره‌ای بیشتر است، تعیین درصد خروج باقی‌مانده‌ها از خوشه (η) نقش مهمی در تحول خوشه بازی می‌کند. در حالی که خوشه OB-max با $\eta = 1$ پس از حدود ۵۳۰ میلیون سال منحل می‌شود، اتخاذ $\eta = 0$ انحلال خوشه را به تعویق می‌اندازد و عمر این خوشه حدود ۸۰۰ میلیون سال تخمین زده می‌شود.

برای خوشه‌هایی که شعاع اولیه با مدل مارکس-کروپا محاسبه می‌شود نتایج را برای مدل‌هایی با $\eta = 1$ و $\eta = 0$ به نیز دست آوردیم. در شکل ۶ نتایج با هم مقایسه شده‌اند. این خوشه‌ها شعاع اولیه کوچک‌تری دارند و سریع‌تر متحول می‌شوند. همچنین واضح است که اختلاف مشاهده شده در تحول خوشه‌های OB-min و بهینه با OB-max بسیار کاهش یافته است؛ به طوری که شعاع، جرم نهایی و طول عمر این خوشه‌ها نسبت به حالت



شکل ۷. تعداد ستاره‌های نوترونی (ردیف بالا) و سیاه‌چاله‌ها (ردیف پایین) در ۴۰۰ میلیون سال اول تحول خوشه در مدل‌هایی با شعاع نیمه‌جرم اولیه ۲ پارسک. برای مدل‌های بهینه، OB-min و OB-max. خط توپر $\eta = 0$ و خط چین $\eta = 1$ را نشان می‌دهد.



شکل ۸. تعداد ستاره‌های نوترونی (ردیف بالا) و سیاه‌چاله‌ها (ردیف پایین) در ۴۰۰ میلیون سال اول تحول خوشه در مدل‌هایی با شعاع نیمه‌جرم اولیه ۰.۲۵ پارسک. برای مدل‌های بهینه، OB-min و OB-max. خط توپر $\eta = 0$ و خط چین $\eta = 1$ را نشان می‌دهد.

شرایط اولیه شکل‌گیری متفاوت (بهینه، OB-min و OB-max) و شعاع نیمه‌جرم اولیه ۲ و ۰.۲۵ پارسک را برای مطالعه در نظر می‌گیریم.

ستاره‌ای در دراز مدت و در اثر تحول دینامیکی از خوشه خارج می‌شوند. در اینجا سیاه‌چاله‌های باقی‌مانده در خوشه‌های کم‌جرم را بررسی می‌کنیم. خوشه‌هایی با

است. انرژی آزاد شده در اثر تشکیل این دوتایی‌ها و برهم‌کنش آنها با ستاره‌های دیگر، موجب انبساط خوشه و خروج ستاره‌ها می‌شود. همچنین تشکیل این دوتایی‌ها از منظر تابش امواج گرانشی نیز اهمیت دارد. نتایج شبیه‌سازی‌های ما نشان می‌دهد که در دو مدل ۳ و ۶ در جدول ۱، با روش نمونه‌گیری تصادفی (OB-max)، در حالی که $\eta = 1$ و شعاع نیمه‌جرم به ترتیب ۲ و ۰/۲۵ پارسک است، دوتایی‌های سیاه‌چاله-سیاه‌چاله در خوشه تشکیل می‌شوند. در مدل ۳ در دو برهه زمانی این دوتایی‌ها تشکیل می‌شوند. اولین دوتایی سیاه‌چاله-سیاه‌چاله در زمان $t = 230 \text{ Myr}$ تشکیل می‌شود. این دوتایی در زمان $t = 440 \text{ Myr}$ منحل می‌شود و یکی از اعضای این سامانه با سیاه‌چاله دیگری در زمان $t = 450 \text{ Myr}$ تشکیل دوتایی سیاه‌چاله-سیاه‌چاله می‌دهد و این دوتایی تا پایان زمان تحول در خوشه باقی می‌ماند. در مدل ۶ نیز شاهد تشکیل دو سامانه دوتایی سیاه‌چاله-سیاه‌چاله در دو بازه زمانی متفاوت هستیم. اولین دوتایی در زمان $t = 100 \text{ Myr}$ تشکیل و در زمان $t = 120 \text{ Myr}$ منحل می‌شود و دومین دوتایی سیاه‌چاله-سیاه‌چاله در زمان $t = 130 \text{ Myr}$ تشکیل و در $t = 160 \text{ Myr}$ منحل می‌شود. تشکیل این دوتایی‌های سیاه‌چاله-سیاه‌چاله می‌تواند از عوامل مهم در تسریع انحلال خوشه در مدل‌های ۳ و ۶ باشد.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، به بررسی اثر ستاره‌های سنگین بر تحول خوشه‌های باز و جوان پرداختیم. به این منظور، در تعیین تابع جرم اولیه خوشه از دو روش نمونه‌گیری بهینه و نمونه‌گیری تصادفی استفاده کردیم. همچنین اثر نگهداری بقایای ستاره‌ای (ستاره‌های نوترونی و سیاه‌چاله‌ها) در خوشه را در دو حالتی که این بقایا بلافاصله از خوشه خارج می‌شوند و حالتی که تا مدت‌زمانی در خوشه باقی

شکل ۷ تعداد سیاه‌چاله‌ها و ستاره‌های نوترونی در ۴۰۰ میلیون سال اول تحول را برای هر سه مدل بهینه، OB-min و OB-max برای خوشه‌هایی با شعاع نیمه‌جرم اولیه ۲ پارسک و به ازای $\eta = 1$ و $\eta = 0$ ، نشان می‌دهد. در مدل OB-min هیچ سیاه‌چاله‌ای تولید نمی‌شود و ۷ ستاره نوترونی تشکیل می‌شود و در مدل OB-max، ۵ سیاه‌چاله و ۶ ستاره نوترونی و در مدل بهینه ۲ سیاه‌چاله و ۹ ستاره نوترونی تشکیل می‌شود. در مدل‌هایی که $\eta = 0$ است، بقایای ستاره‌ای در زمان کوتاهی (سیاه‌چاله‌ها کمتر از ۲۰ میلیون سال و ستاره‌های نوترونی کمتر از ۵۰ میلیون سال) از خوشه خارج می‌شوند. در حالتی که $\eta = 1$ است، همه باقی‌مانده‌ها برای مدت طولانی‌تری در خوشه باقی می‌مانند؛ تا این‌که در اثر تحول دینامیکی از خوشه خارج شوند.

در شکل ۸ تعداد سیاه‌چاله‌ها در سه مدل بهینه، OB-min و OB-max برای خوشه‌هایی که شعاع اولیه آنها با رابطه مارکس-کروپا محاسبه شده ($r_h = 0.25 \text{ pc}$)، نشان داده شده‌اند. در مدل OB-min هیچ سیاه‌چاله‌ای تولید نمی‌شود و ۴ ستاره نوترونی تشکیل می‌شود و در مدل OB-max، ۵ سیاه‌چاله و ۱۱ ستاره نوترونی تشکیل می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود برای خوشه‌هایی با شعاع نیمه‌جرم اولیه ۰/۲۵ پارسک، حتی با فرض $\eta = 1$ ، همه سیاه‌چاله‌های تشکیل شده در مدل بهینه در کمتر از ۲۰ میلیون سال و در اثر تحول دینامیکی از خوشه خارج شده‌اند. همچنین تعداد ستاره‌های نوترونی کمتری در خوشه باقی می‌مانند و بیشتر آنها مدت کوتاهی پس از تشکیل از خوشه خارج شده‌اند. در این مدل‌ها که شعاع نیمه‌جرم کوچک‌تری دارند، رابطه مستقیم زمان واهلش با شعاع نیمه‌جرم خوشه باعث تسریع خروج بقایای ستاره‌ای در اثر تحول دینامیکی می‌شود.

یکی از عوامل اثرگذار در تسریع تحول خوشه‌های ستاره‌ای، تشکیل دوتایی‌های سیاه‌چاله-سیاه‌چاله در خوشه

به عنوان مثال تعیین درصد سیاه‌چاله‌ها و ستاره‌های نوترونی که پس از انفجار ابرنواختری در خوشه باقی می‌مانند تأثیر مهمی در روند تحولی خوشه بازی می‌کنند. در خوشه‌های کم‌جرم (از مرتبه $10^4 M_{\odot}$) انتظار داریم که همه این بقایای ستاره‌ای از خوشه فرار کنند و یا تعداد کمی از آنها در خوشه حفظ شوند. نتایج شبیه‌سازی‌های ما همچنین نشان می‌دهد که انتخاب مقادیر کمتر 17 برای درصدی از بقایای ستاره‌ای که در خوشه حفظ می‌شوند، روند انحلال خوشه‌های با ستاره‌های سنگین زیاد (OB-max) را کندتر کرده و روند تحولی خوشه‌ها را به خوشه‌های مدل‌سازی شده با روش بهینه نزدیک‌تر می‌کند.

می‌مانند، بررسی کردیم. نتایج ما نشان می‌دهد که در شبیه‌سازی خوشه‌های کم‌جرم، تحول دینامیکی خوشه به روش نمونه‌گیری وابسته است. در روش نمونه‌گیری تصادفی، تعداد و جرم ستاره‌های سنگین در خوشه به صورت تصادفی تغییر می‌کند. نشان دادیم که دو خوشه باز و هم‌جرم که شعاع نیمه‌جرم یکسانی نیز دارند، اما تعداد ستاره‌های سنگین در آنها متفاوت است، مسیر تحولی متفاوتی را طی می‌کنند. خوشه‌ای که ستاره‌های سنگین بیشتری دارد، با سرعت بیشتری جرم از دست می‌دهد و سریع‌تر منحل می‌شود. البته سرعت تبخیر و انحلال خوشه علاوه بر ستاره‌های سنگین به عوامل دیگری نیز می‌تواند بستگی داشته باشد.

مراجع

1. A E Piskunov, N V Kharchenko, S Röser, E Schilbach, and A D Scholz, *A&A* **445** (2006) 545.
2. M G H Krause, al., *Space Sci Rev.* **216** (2020) 64.
3. M Stoop and et al., *arXiv:220708452* (2022).
4. L Wang, T Jerabkova, *A&A* **655** (2021) 71.
5. S Banerjee, *MNRAS* **467** (2017) 524.
6. P Kroupa, *Science* **295** (2002) 82.
7. P Kroupa, *MNRAS* **322** (2001) 231.
8. C Weidner and P Kroupa, *MNRAS* **365** (2006) 1333
9. P Kroupa, C Weidner, J Pflamm-Altenburg, I Thies, J Dabringhausen, M Marks, and T Maschberger, *pss5.book* (2015) 115.
10. L Wang, P Kroupa, and T Jerabkova, *MNRAS* **484** (2019) 1843.
11. P Kroupa, T Jerabkova, F Dinnbier, G Beccari, and Z Yan, *A&A* **612** (2018) 74.
12. G Beccari and et al., *A&A* **604** (2017) 22.
13. S J Aarseth, *Gravitational N-Body Simulations, Cambridge Univ. Press* (2003).
14. S J Aarseth, *MNRAS* **422** (2012) 841.
15. P Kroupa, *The Cambridge N-Body Lectures, Lecture Notes in Physics* **760** (2008) 181.
16. E E Salpeter, *ApJ* **121** (1955) 161.
17. A H W Kupper, T Maschberger, P Kroupa, and H Baumgardt, *MNRAS* **417** (2011) 2300.
18. V Pavlík, T Jerabkova, P Kroupa, and H Baumgardt, *A&A* **617** (2018) 69.
19. M Marks, P Kroupa, *A&A* **543** (2012) 8.
20. J Strader, L Chomiuk, T J Maccarone, J C A Miller-Jones, and A C Seth, *Nature* **490** (2012) 71.