

شبیه‌سازی اثر همرفت پرتابی در تحول ستاره‌های پر جرم

فاطمه صفایی^۱، حسین حقی^۲، بهروز شکری^۲

^۱ دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

^۲ دانشگاه تحصیلات تکمیلی در علوم پایه زنجان

چکیده:

از موضوعات مهم در بررسی تحول و ساختار ستاره‌ای، چگونگی انتقال انرژی تولید شده در فرایندهای هسته‌ای می‌باشد. یکی از مکانیزم‌های انتقال انرژی در ستارگان همرفت است. همرفت در ناحیه‌هایی اتفاق می‌افتد که شیب دمایی از یک مقدار بحرانی بیشتر باشد. اما در مواردی می‌توان حباب‌های گاز همرفتی را خارج از این نواحی مشاهده کرد که در چنین مواقعی گفته می‌شود "همرفت پرتابی"^۱ رخ داده است. همرفت پرتابی بر نمودار HR ستاره، مدت زمان فاز هیدروژن‌سوزی (رشته‌ی اصلی)، هلیوم‌سوزی، طول عمر ستاره و ... تاثیرگذار است. در این پژوهش، با استفاده از کد تحول ستاره‌ای MESA^۲ که یکی از پیشرفته‌ترین ابزارهای شبیه‌سازی ستاره‌ای است، تاثیرات همرفت پرتابی در تحول ستاره‌ها را در بازه‌ی جرمی ۲ تا ۱۵ جرم خورشیدی (M_{\odot}) مطالعه کرده‌ایم. نشان می‌دهیم که در اثر همرفت پرتابی محل خروج از رشته‌ی اصلی، شعاع ستاره، دمای سطحی و درخشندگی در فازهای مختلف، مدت زمان عمر ستاره در رشته‌ی اصلی و دیگر فازهای تحولی، بازه‌ی دمایی حلقه‌ی آبی (Blue loop) و جرم هسته‌ی مرکزی تغییر می‌کند.

شدت همرفت پرتابی با استفاده از پارامتر آزاد α_{ov} نشان داده می‌شود که عبارت است از $\alpha_{ov} = \frac{d_{ov}}{H_p}$. در این رابطه d_{ov}

فاصله‌ای است که در آن همرفت پرتابی اتفاق می‌افتد و H_p ارتفاع مقیاس فشار^۳ است. وسعت ناحیه‌ی همرفت پرتابی توسط گرادیان کدریت، وزن ملکولی، نرخ تولید انرژی، شار مکانیکی و گرمایی که به وسیله‌ی سیال حمل می‌شود، تعیین می‌گردد [۱]. با پیشرفت‌های محاسباتی امکان مدل‌سازی ستاره‌ای نیز فراهم شده است. یکی از قوی‌ترین کدهای مورد استفاده‌ی اخترفیزیکدانان جهت شبیه‌سازی و حل معادلات حاکم بر تحول ستاره‌ای، کد شبیه‌سازی MESA است [۲].

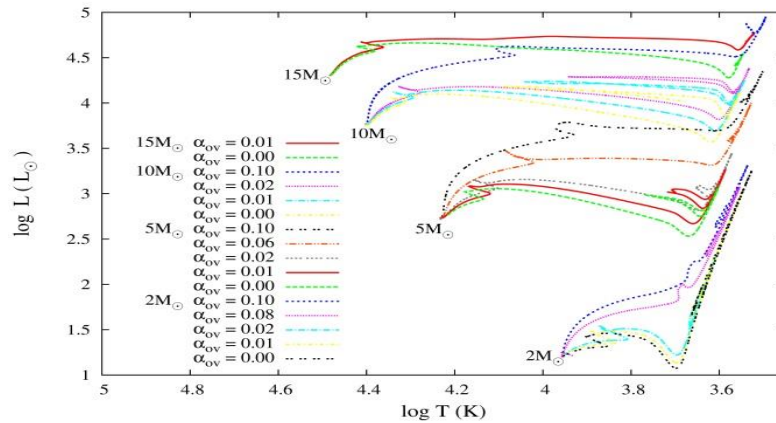
در این مقاله با استفاده از کد تحول ستاره‌ای MESA تاثیرات همرفت پرتابی بر تحول ستاره‌هایی در بازه‌ی جرمی ۲ تا $15M_{\odot}$ از ابتدای رشته‌ی اصلی (ZAMS) تا پایان هلیوم‌سوزی (جایی‌که درصد فراوانی هلیوم در هسته به 10^{-4} می‌رسد) شبیه‌سازی شده است. مقدار اولیه‌ی فراوانی هیدروژن ۰/۷۰ و فلزیت مدل، فلزیت خورشید است. در مدل‌های شبیه‌سازی شده دوران نداریم و آلفای طول اختلاط^۴، ۱/۶ انتخاب شده است.

^۱ Convective overshooting

^۲ Modules for Experiments in Stellar Astrophysics

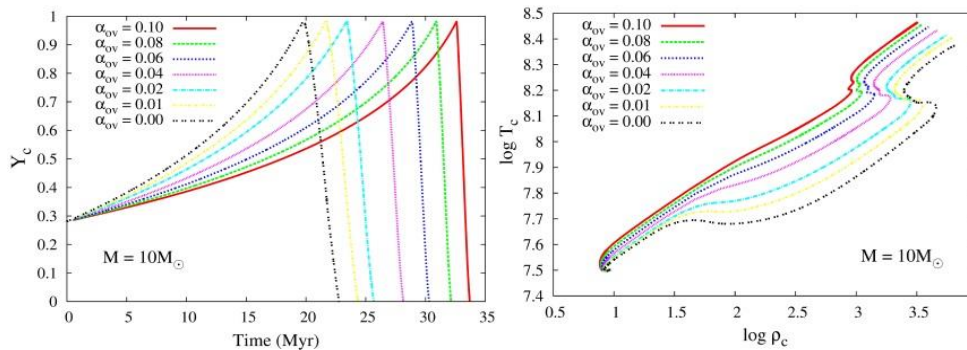
^۳ Pressure scale height

^۴ mixing_length_alpha



شکل ۱- مسیر تحول ستاره برای جرم‌های ۰.۲، ۵، ۱۰ و $15M_{\odot}$ در محدوده‌ی $\alpha_{ov} = 0 - 0.1$. افزایش α_{ov} ، مسیر تحول ستاره و نقطه‌ی خروج از رشته‌ی اصلی را به سمت دمای سطحی کمتر و درخشندگی‌های بالاتر جابه‌جا می‌کند. همرفت پرتابی موجب کاهش اندازه‌ی حلقه‌ی آبی شده و حتی در α_{ov} های بالا، سبب از بین رفتن آن می‌شود.

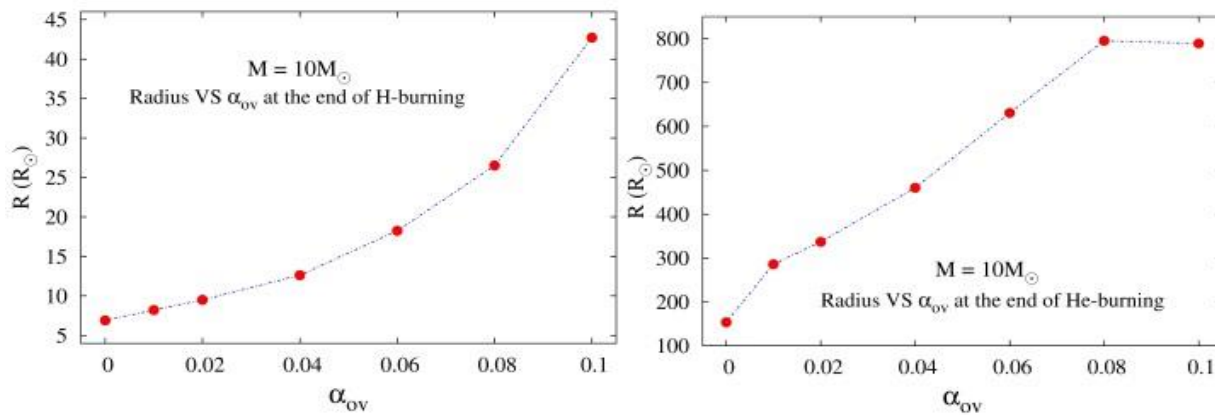
شکل ۱ نمودار HR را برای α_{ov} های مختلف نشان می‌دهد. افزایش α_{ov} ، مسیر تحول ستاره و نقطه‌ی خروج از رشته‌ی اصلی را در نمودار HR، به سمت دمای سطحی کمتر و درخشندگی‌های بالاتر جابه‌جا می‌کند. همچنین مشاهده می‌شود که میزان افزایش درخشندگی در رشته‌ی اصلی با α_{ov} رابطه‌ی مستقیمی دارد، این درحالی است که در شکاف هرتز اسپرنگ، این ارتباط معکوس است. به بیان دیگر میزان کاهش درخشندگی در شکاف هرتز اسپرنگ، با افزایش α_{ov} کاهش می‌یابد، به گونه‌ای که در α_{ov} های بیشتر، این کاهش صفر می‌گردد و حتی درخشندگی ستاره افزایش می‌یابد. اگرچه تاثیر همرفت پرتابی بر شاخه‌ی غول‌ها قابل صرف‌نظر است اما در حلقه‌ی آبی به شدت تاثیرگذار است. همرفت پرتابی به واسطه‌ی افزایش جرم هسته (شکل ۲ را ببینید)، پتانسیل هسته را افزایش می‌دهد؛ بنابراین موجب کاهش اندازه‌ی حلقه و حتی در α_{ov} های بالا، از بین رفتن آن می‌شود [۳].



شکل ۲- سمت چپ: درصد فراوانی هلیوم مرکزی بر حسب زمان برای ستاره‌ی $10M_{\odot}$ در α_{ov} های مختلف. تغییرات درصد فراوانی هلیوم در رشته‌ی اصلی و مدت زمان فاز هلیوم‌سوزی با افزایش α_{ov} کاهش یافته و ستاره مدت زمان بیشتری را در فاز رشته‌ی اصلی می‌ماند. سمت راست: ارتباط بین دما و چگالی هسته‌ی ستاره در α_{ov} های مختلف برای ستاره‌ی $10M_{\odot}$. افزایش α_{ov} ، مسیر نمودار را به سمت دماهای بالاتر و چگالی‌های کمتر جابه‌جا می‌کند.

شکل ۲ نمودار سمت چپ، درصد فراوانی هلیوم مرکزی بر حسب زمان را برای ستاره‌ی $10M_{\odot}$ با α_{ov} های مختلف نشان می‌دهد. این نمودار، تاثیر همرفت پرتابی را بر طول عمر ستاره، مدت زمان فازهای رشته‌ی اصلی و هلیوم‌سوزی بازگو می‌کند. تغییرات درصد فراوانی هلیوم در فاز رشته‌ی اصلی، با افزایش α_{ov} کاهش می‌یابد که این امر ناشی از تزریق پیوسته‌ی

هیدروژن از لایه‌های بالاتر به هسته‌ی مرکزی توسط همرفت پرتابی است. در نتیجه‌ی تزریق سوخت هیدروژنی به هسته، ستاره مدت زمان بیشتری را در فاز رشته‌ی اصلی می‌ماند. بر این اساس پتانسیل و جرم هسته‌ی مرکزی در پایان هیدروژن سوزی با افزایش α_{ov} بیشتر می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود مدت زمان فاز هلیوم سوزی به ازای α_{ov} های بزرگتر، کاهش می‌یابد. شکل ۲ نمودار سمت راست، ارتباط بین دما و چگالی در α_{ov} های مختلف را برای ستاره‌ی $10M_{\odot}$ بیان می‌کند. افزایش α_{ov} منجر به جابه‌جایی مسیر نمودار به سمت دماهای بالاتر و چگالی‌های کمتر در هسته می‌شود. این رفتاری است که برای ستاره‌هایی با شرایط اولیه‌ی کاملاً یکسان در جرم‌های متفاوت دیده شده است. از آنجایی که واکنش آلفای سه‌گانه به شدت به دمای هسته وابسته است، افزایش دمای ناشی از افزایش α_{ov} ، نرخ واکنش هلیوم سوزی را بیشتر می‌کند. این امر تاییدی بر کوتاه شدن فاز هلیوم سوزی است.



شکل ۳- شعاع ستاره به‌عنوان تابعی از α_{ov} در پایان دو فاز رشته‌اصلی (سمت چپ) و هلیوم سوزی (سمت راست) برای مدل $10M_{\odot}$. با افزایش α_{ov} ساختار ستاره در پایان این دو فاز گسترده‌تر می‌شود.

در شکل ۳، تغییرات شعاع را بر حسب α_{ov} ، در پایان دو فاز رشته‌ی اصلی و هلیوم سوزی، برای ستاره‌ی $10M_{\odot}$ بررسی می‌کنیم و به مقایسه‌ی شعاع ستاره در پایان این دو فاز می‌پردازیم. مشاهده می‌شود ساختار ستاره در مقادیر بالاتر α_{ov} گسترش می‌یابد. میزان تغییرات شعاع در پایان رشته‌ی اصلی، به‌ازای α_{ov} های بزرگتر شدت می‌گیرد. در این فاز برای $\alpha_{ov}=0$ شعاع ستاره $8R_{\odot}$ است و در $\alpha_{ov}=0.1$ ، به $43R_{\odot}$ می‌رسد. در پایان هلیوم سوزی، به‌ازای $\alpha_{ov}=0$ شعاع این مدل حدود $150R_{\odot}$ می‌باشد. در $\alpha_{ov}=0.1$ ، ستاره به‌طور قابل ملاحظه‌ای متورم شده و تا ۶ برابر مدل بدون همرفت پرتابی، گسترده می‌شود.

مرجع‌ها

۱. Narasimha, D., Roxburgh, I. W., ASP conference series, Vol.42, 1993

۲. Paxton, B., et. al., ApJS, 192,3, 2011

۳. Maeder, André. *Physics, formation and evolution of rotating stars*. Berlin: Springer, 2009