

## تحول فراوانی عناصر در ستاره‌های سنگین چرخان با استفاده از شبیه‌سازی MESA

سارا یوسفی‌زاده<sup>۱</sup>، حسین حقی<sup>۱</sup>، حامد قاسمی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه، زنجان، ایران.

<sup>۲</sup> دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

### چکیده

در این مقاله با استفاده از کد شبیه‌سازی ستاره‌ای MESA که یکی از پیشرفته‌ترین ابزارهای محاسباتی در زمینه تحول ستاره‌ای است، به بررسی اثر چرخش بر روی تحول ستاره‌های سنگین با در نظر گرفتن ناپایداری‌های مختلف ناشی از چرخش می‌پردازیم. مسیر تحولی یک ستاره چرخان با جرم  $M = 15M_{\odot}$  را به عنوان نمونه بدست آورده و با حالت بدون چرخش مقایسه می‌کنیم. همچنین تحول فراوانی عناصر را در نواحی مرکزی و سطحی ستاره بدست می‌آوریم. نتایج ما در توافقی با مطالعات نظری در زمینه ستاره‌های چرخان بوده و نشان می‌دهد که دوران منجر به افزایش درخشندگی و دمای سطحی ستاره می‌شود. همچنین در اثر چرخش، آمیختگی شیمیایی عناصر سرعت بیشتری گرفته که آن را به صورت تغییر شدید در فراوانی عناصر در سطح ستاره می‌توان مشاهده کرد؛ بنابراین تغییر مشاهده شده در فراوانی عناصر در سطح ستاره می‌تواند نشانه‌ای از چرخش ستاره باشد. در مطالعات بعدی اثر چرخش در ستاره‌های با جرم‌های مختلف را بررسی خواهیم کرد.

در تحول ستاره‌ای و ساختار درونی ستاره، چرخش ستاره نقش قابل توجهی را ایفا می‌کند. برای ستاره‌ها این چرخش باعث ایجاد پخش‌دگی در قطبین می‌شود که تغییراتی در درخشندگی سطحی و دمای سطحی ستاره به وجود می‌آورد. برای ستاره‌هایی که در قطب‌ها دچار پخش‌دگی می‌شوند، شعاع در عرض‌های جغرافیایی بالاتر کوچک‌تر است. نسبت سرعت چرخش در استوا به سرعت بحرانی را با پارامتر  $\Omega$  به صورت زیر تعریف می‌کنیم [۱]:

$$\Omega = \frac{V_{equator}}{V_{critical}} \quad V_{critical} = \sqrt{\frac{GM}{R_{equator}}} \quad (1)$$

در حضور چرخش آمیختگی ترکیبات شیمیایی درونی و سطحی ستاره تسریع می‌شوند. کد MESA این اختلاط را از روی معادلات پخشی مطابق فرمول‌های زیر لحاظ می‌کند:

$$\left(\frac{\partial X_n}{\partial t}\right)_m = \left(\frac{\partial}{\partial m}\right)_t \left[ (4\pi r^2 \rho)^2 D \left(\frac{\partial X_n}{\partial m}\right)_t \right] + \left(\frac{dX_n}{dt}\right)_{nuc}. \text{ Diffusive mixing.} \quad (1)$$

$$D = D_{conv} + D_{sem} + f_{rot} \times (D_{DSI} + D_{SHI} + D_{SSI} + D_{ES} + D_{GSF}) \quad (2)$$

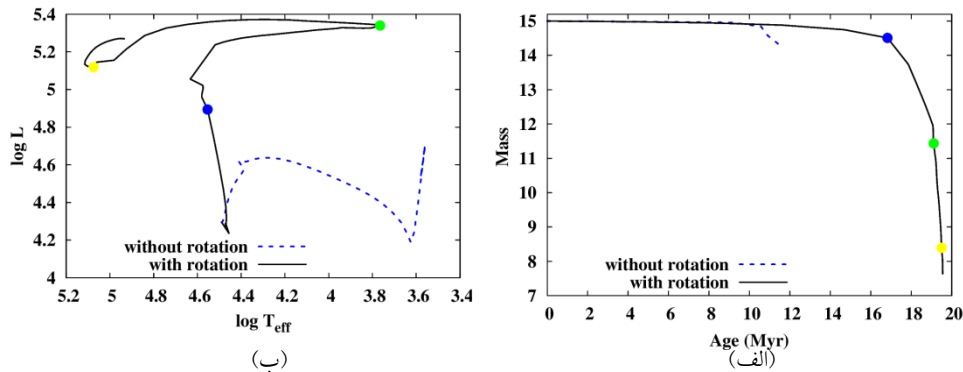
در اینجا ضریب  $f_{rot}$  پارامتر آزادی است که شدت آمیختگی را تعیین می‌کند و در مدل ما مقدار آن  $f_{rot} = 0.033$  در نظر گرفته شده و بقیه جمله‌ها در این مدل مقادیر  $D_{GSF} = 1.16$  و  $D_{ES} = 1.16$  و  $D_{SSI} = 1.16$  و  $D_{SHI} = 0.0$  و  $D_{DSI} = 1.0$  را دارند، که به ترتیب ضرایب پخشی ناشی از ناپایداری‌های گلدریچ-شوبرت-فریک، ادینگتون-سویت، ناپایداری برشی غیر وابسته، سولبرگ-هولند و ناپایداری برشی دینامیکی می‌باشد که در معادله بالا جایگذاری شده‌اند.

کد شبیه‌سازی MESA (Modules for Experiments in Stellar Astrophysics) [۲] امروزه در بین متخصصین تحول ستاره‌ای به دلیل لحاظ کردن بسیاری از پیچیدگی‌ها مورد استقبال قرار گرفته‌است. در این مقاله به کمک این کد مسیر تحولی ستاره‌ای با جرم  $M = 15M_{\odot}$  به عنوان نمونه‌ای از ستاره‌های سنگین و فراوانی عناصر خورشیدی ( $Z=0.02$  و  $Y=0.18$ ) را در دو حالت با در نظر گرفتن چرخش و بدون در نظر گرفتن چرخش به دست آوردیم. در هر دو حالت تحول را تا زمانی که درصد جرمی عنصر  $^{20}\text{Ne}$  در مرکز ستاره به مقدار  $0.3$  برسد، دنبال می‌کنیم. در مورد ستاره‌ی چرخان با کمک کنترل‌های کد MESA وقتی ستاره وارد شاخه اصلی می‌شود، چرخشی یکنواخت با  $\Omega = 0.5$  در ستاره ایجاد می‌کنیم. جدول معادلات حالت ماده در این کد از مدل به روزرسانی شده‌ی OPAL (Rogers & Nayfonov 2002) در سال ۲۰۰۵ و HELM (Timmes & Swesty 2000) و SCVH (Saumon et.al 1995) استفاده شده‌است. کدریت این مدل از جدول

کدریت gs98 (Grevesse & Sauval 1998, GS98) انتخاب شده است، زنجیره‌ی واکنش‌های هسته‌ای از زنجیره‌ی هسته‌ای approx21 است که در آن مشخصات واکنش‌های هسته‌ای ۲۱ ایزوتوپ مشخص شده است [۲]. نواحی همرفتی بر اساس معیار لدو (Ledoux) [۲] تعیین می‌شود همچنین از شبه‌همرفت و جهش همرفتی در این مدل صرف نظر شده و مقدار پارامتر طول آمیختگی برای نواحی همرفتی  $\alpha = 2$  می‌باشد. در فازهای RGB و AGB هدر رفت جرم در نظر گرفته شده. و در اینجا از مدل اتمسفر ساده در عمق اپتیکی  $\tau = 2/3$  که همان فوتوسفر است استفاده کرده‌ایم.

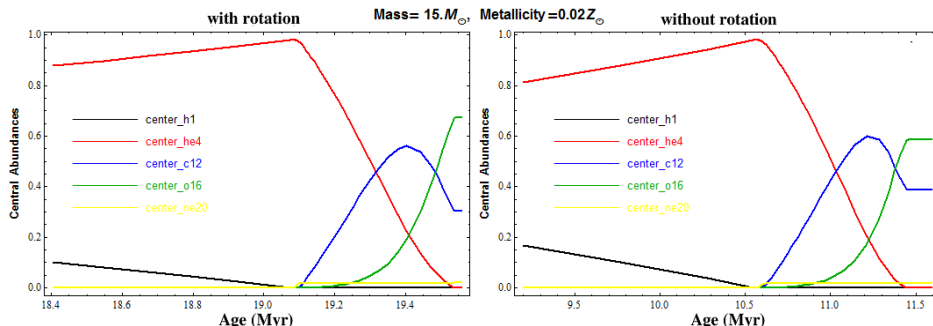
شکل ۱ نمودار تحول زمانی جرم و مسیر تحولی ستاره را در نمودار HR در دو حالت چرخان و غیر چرخان نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در ابتدای رشته اصلی کاهش میدان گرانشی ناشی از پخش‌شدگی ستاره در سطح آن و افزایش شعاع ستاره باعث کاهش دمای موثر و درخشندگی می‌شود پس از آن اثر آمیختگی شیمیایی ناشی از چرخش بر آن غلبه داشته و شعاع ستاره کاهش یافته و در نتیجه دمای موثر و درخشندگی افزایش می‌یابد.

شکل ۱ نشان می‌دهد که ستاره چرخان تحول کندتری دارد و مدت زمان بیشتری طول می‌کشد تا درصد جرمی عنصر  $^{20}\text{Ne}$  در مرکز ستاره به مقدار  $0.3\%$  برسد. همچنین از روی این نمودار می‌توان مشاهده کرد که ستاره چرخان در مسیر تحولی‌اش از طریق بادهای ستاره‌ای جرم بیشتری از دست می‌دهد؛ به طوری که در حضور چرخش جرم ستاره تا  $8M_{\odot}$  کاهش پیدا می‌کند اما در نبود چرخش جرم باقیمانده در حدود  $14M_{\odot}$  می‌باشد.



شکل ۱: الف) نمودار تحول زمانی جرم برای ستاره‌ای با جرم  $M = 15M_{\odot}$  و  $\Omega = 0.5$  (خط) و همان ستاره در حالت غیر چرخان (خط چین) در نمونه چرخان، ستاره جرم بیشتری را به دلیل بادهای ستاره‌ای از دست می‌دهد و تحول زمانی آن در حدود ۸ مگا سال طولانی‌تر است. ب) نمودار HR برای دو ستاره. همانطور که مشخص است برای ستاره‌ی چرخان درخشندگی به سرعت افزایش می‌یابد. نقطه‌ها: انتهای هیدروژن سوزی (آبی)، شروع هلیوم سوزی (سبز)، انتهای هلیوم سوزی (زرد) در مرکز را نشان می‌دهند.

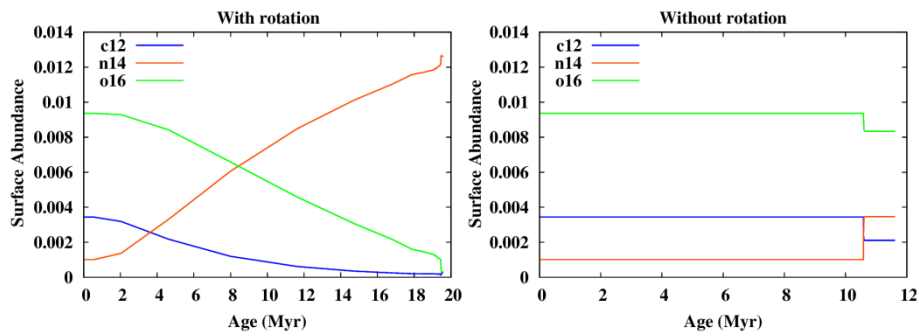
شکل ۲ منحنی تغییرات فراوانی عناصر در  $2\text{Myr}$  پایانی عمر ستاره نمونه ما را نشان می‌دهد. این نمودار نیز کند بودن روند تحولی ستاره چرخان را تایید می‌کند.



شکل ۲: نمودار فراوانی عناصر در مرکز بر حسب سن ستاره برای دو حالت غیر چرخان و چرخان. همانطور که مشخص است روند تحولی در ستاره چرخان طولانی‌تر است.

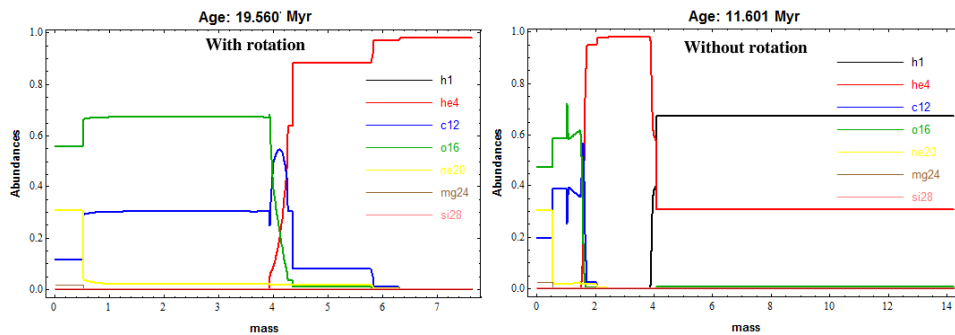
شکل ۳ نمودار فراوانی عناصر روی سطح ستاره چرخان و غیر چرخان را نشان می‌دهد. مدت زمان هیدروژن سوزی در حالت چرخان حدودا  $19\text{Myr}$  و در حالت غیر چرخان  $10\text{Myr}$  است که به دلیل افزایش H در هسته از طریق آمیختگی

ناشی از دوران است. شکل ۴ نمودار فراوانی عناصر از مرکز تا سطح ستاره، زمانی که مقدار  $^{20}\text{Ne}$  به  $0.3$  می‌رسد را نشان می‌دهد. واضح است که درصد فراوانی عناصر مختلف در دو نمونه (چرخان و غیرچرخان) متفاوت است.



شکل ۳: فراوانی عناصر روی سطح برای ستاره چرخان و غیر چرخان بر حسب سن ستاره. تغییرات فراوانی عناصر در این دو نمونه به دلیل اختلالاتی ایجاد شده توسط چرخش می‌باشد در این دو نمودار به دلیل نشان دادن جزئیات مربوط به عناصر سنگین‌تر منحنی تغییرات فراوانی H و He را رسم نکردیم.

درصد فراوانی عناصر سنگین‌تر در لایه‌های نزدیک به سطح در ستاره‌ی در حال چرخش بیشتر است.



شکل ۴: نمودار فراوانی عناصر در پوسته‌های جرمی از مرکز تا سطح ستاره چرخان و غیر چرخان. در انتهای مرحله مورد بررسی ما فراوانی عنصر  $^{20}\text{Ne}$  در هر دو نمونه به مقدار  $0.3$  رسیده است و در ستاره غیرچرخان هیدروژن را در لایه‌های بیرونی‌تر داریم اما در ستاره چرخان هیدروژن در ستاره مشاهده نمی‌شود.

## نتیجه‌گیری

با استفاده از کد شبیه‌سازی MESA نشان دادیم که چرخش باعث تغییر رنگ سطحی ستاره می‌شود؛ و کاهش جرم ناشی از باد ستاره‌ای در اثر چرخش بیشتر خواهد شد و ستاره‌های چرخان مسیرهای تحولی متفاوتی را (نسبت به نمونه‌های غیرچرخان) در نمودار HR دنبال می‌کنند. چرخش باعث آمیختگی شدید مواد درون ستاره می‌شود که باعث تغییر فراوانی عناصر در سطح ستاره است. همچنین در اثر کاهش میدان گرانشی ناشی از یخ‌شدگی ستاره، طول عمر ستاره کاهش و در اثر آمیختگی ناشی از چرخش طول عمر ستاره افزایش می‌یابد.

## مرجع‌ها

1. De Boer, K. S., Seggewiss, K. (2008). *Stars and Stellar Evolution*, EDP Sciences, 2008.
2. Paxton, B., Bildsten, L., Dotter, A., Herwig, F., Lesaffre, P., & Timmes, F. (2011). Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA). *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 192(1), 3.
3. Meynet, G., & Maeder, A. (1997). Stellar evolution with rotation. I. The computational method and the inhibiting effect of the mu-gradient. *Astronomy and Astrophysics*, 321, 465-476.
4. Maeder, A. (2009). *Physics, formation and evolution of rotating stars*. Berlin: Springer.