

## مدلی برای تحول ستاره‌های سنگین‌تر از خورشید

محسن شادمهری و جمشید قنبری

گروه فیزیک دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت ۱۵ آذر ۷۵

تاریخ دریافت نسخه نهایی ۱۵ آذر ۷۵

### چکیده

در این مقاله مدلی برای تحول ستاره‌های سنگین‌تر از خورشید ارائه می‌کنیم. حل معادله‌های حاصل با استفاده از روش شوارتسشیلد صورت می‌گیرد. به کمک این مدل توانسته‌ایم بر روی نمودار هر تسپرنگ - راسل، وضعیت ستاره‌هایی با  $2/5$ ،  $5$ ، و  $10$  جرم خورشیدی را مشخص کنیم. هر چند در این مدل از دوران ستاره، میدانهای مغناطیسی و تلاطم صرف‌نظر شده است، بر اساس نتایجی که به دست آورده‌ایم می‌توان به دیدگاهی کلی درباره آنچه در اعماق این گونه ستاره‌ها رخ می‌دهد، دست یافت.

### ۱. مقدمه

درک نحوه شکل‌گیری ستاره‌ها و تحول آنها یکی از آرزوهای اخترشناسان است. در این زمینه، مخصوصاً در چند دهه اخیر، پیشرفت‌های زیادی صورت گرفته است. افرادی مثل چاندراسکار [۱]، شوارتسشیلد [۲]، منزل و همکاران [۳] و هایاشی و همکاران [۴] نقشی بنیادی در نظریه ساختار و تحول ستاره‌ها داشته‌اند. به دنبال کارهای پیشگامانه چنین افرادی نظریه ساختار و تحول ستاره‌ها بوجود آمده و پیشرفت کرده است؛ با این حال، هنوز هم پرسشهای بی‌پاسخ بسیاری وجود دارد [۵، ۶، ۷].

برای حل دستگاه معادله‌های موجود در نظریه تحول ستاره‌ها، دو روش وجود دارد. یکی از این روشها در سالهای ۱۹۵۹ و ۱۹۶۴ توسط هنی و همکارانش، ارائه شد که امروزه از آن بسیار استفاده می‌شود [۸، ۹]. شوارتسشیلد درباره روش دیگری که بسیار جالب و هوشمندانه است به تفصیل بحث کرده است [۲]. این روش که هنوز هم مورد استفاده دارد [۱۰]، روشی است که از آن سود جستیم.

در این مقاله ساختار و تحول ستاره‌های رشته اصلی را، که سنگین‌تر از خورشید هستند، مطالعه می‌کنیم. تحول چنین ستاره‌هایی را فقط تا پایان مرحله هیدروژن‌سوزی - در قسمت

مرکزی ستاره - دنبال می‌کنیم. نتایجی که به دست آورده‌ایم با آنچه که دیگران [۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴] به دست آورده‌اند کاملاً توافق دارد. در بخش ۲ با بیان فرضهای بنیادی، معادله‌های حاکم بر ساختار درونی ستاره‌ها را مرور می‌کنیم. در بخش ۳، روش عمومی حل این معادله‌ها را شرح می‌دهیم؛ سپس مدل ستاره‌های سنگین‌تر از خورشید را می‌سازیم و بر این اساس، تحول این ستاره‌ها را تا پایان مرحله هیدروژن‌سوزی دنبال می‌کنیم. در پایان نیز به جمع‌بندی می‌پردازیم و به کارهایی که در ادامه این کار می‌توان انجام داد اشاره خواهیم کرد.

### ۲. معادلات اساسی، فرضهای بنیادین

دست‌کم چهار ویژگی هر ستاره را با رصد می‌توان تعیین کرد: (۱) جرم، (۲) درخشندگی، (۳) دمای سطحی، (۴) ترکیبات لایه‌های خارجی ستاره. دمای سطحی و درخشندگی ستاره، وضعیت آن را بر روی نمودار  $H-R$  تعیین می‌کند. اما آیا با داشتن دو تا از این کمیتها، می‌توان به طور نظری ساختار درونی ستاره را طوری تعیین کرد که دو کمیت دیگر به درستی پیش‌بینی شوند؟ در واقع با داشتن جرم و فراوانی عناصر، می‌توان دما و درخشندگی ستاره را در هر لحظه - به طور نظری - تعیین کرد؛ در این صورت

هیدروژن و هلیوم هستند. فعلاً به شکل صریح آن کاری نداریم ولی می‌دانیم که تابعی است معلوم [۲، ۱۵]. در این صورت داریم

$$\frac{dL(r)}{dr} = \varepsilon \rho^2 \pi r^2. \quad (۳)$$

در صورتی که تحول سریع باشد، باید تابش ناشی از انقباض گرانشی را نیز در نظر گرفت. در این صورت معادله ۳ به صورت زیر در می‌آید [۲]

$$\frac{dL(r)}{dr} = \varepsilon \pi r^2 \rho \left[ \varepsilon - 1.5 \rho^{2/3} \frac{d}{dt} (P \rho^{-5/3}) \right]. \quad (۴)$$

برای پیش رشته اصلی از این رابطه استفاده می‌کنیم، زیرا تابش فقط ناشی از انقباض گرانشی است.

#### د - نحوه انتقال انرژی

انتقال انرژی به سه صورت ممکن است صورت گیرد: (۱) همرفت، (۲) تابش، و (۳) رسانایی. در مراحل پایانی تحول ستاره‌ها، انتقال انرژی به صورت رسانایی است. اما در مراحل اولیه تحول، انتقال انرژی از طریق همرفت و تابش است. حال داریم [۲، ۱۵]

$$\frac{dT}{dr} = - \frac{3}{4} \frac{\chi \rho}{ac T^3} \frac{L(r)}{4 \pi r^2}, \quad (\text{تابش}) \quad (۵)$$

$$\frac{dT}{dr} = \left( 1 - \frac{1}{\gamma} \right) \frac{T}{P} \frac{dP}{dr}. \quad (\text{همرفت}) \quad (۶)$$

در معادله ۵،  $\chi = \chi(\rho, T, X, Y)$ ، کدوری و  $\gamma$  ضریب اتمیست گاز است. معادله ۵ برای انتقال انرژی از طریق تابش و معادله ۶ برای انتقال انرژی از طریق همرفت به کار می‌رود. حال از کجا بفهمیم که از کدام یک از رابطه‌های بالا باید استفاده کرد؟ می‌توان ثابت کرد [۲] که اگر نامساوی

$$- \left( 1 - \frac{1}{\gamma} \right) \frac{T}{P} \frac{dP}{dr} > - \frac{dT}{dr} \quad (۷)$$

در هر لایه برقرار باشد، انتقال انرژی از طریق تابش است؛ در غیر این صورت باید از معادله مربوط به انتقال انرژی از طریق همرفت استفاده کرد.

#### ۳. روش عمومی حل معادلات

با حل معادله‌های بالا و با توجه به رابطه‌های مشخصه گاز

$$P = P(\rho, T, X, Y) \quad (۱۰.۸)$$

مسیر تحولی ستاره مشخص می‌شود. مدلی که در این جا ارائه می‌شود، اساساً از چهار معادله دیفرانسیل تشکیل شده است که براساس فرضیهایی به دست آمده‌اند. این معادلات و فرضیهایی بنیادین را مرور می‌کنیم.

#### الف - شرط تعادل هیدرواستاتیکی

فرض می‌کنیم ستاره تقارن کروی دارد، یعنی همه کمیتها فقط به  $r$ ، فاصله از مرکز ستاره، بستگی دارند. همچنین از حرکت دورانی، تپش، نیروهای کشندی - و در نتیجه میدانهای مغناطیسی - صرفنظر می‌شود. در این صورت برای پوسته‌ای کروی به ضخامت  $dr$  و فاصله  $r$  از مرکز ستاره، باید نیروی ناشی از فشار رو به خارج با جاذبه گرانشی به سمت داخل برابر باشد. می‌توان نشان داد که این شرط تعادلی به معادله

$$\frac{dP}{dr} = - \rho \frac{GM}{r^2} \quad (۱)$$

منجر می‌شود [۱، ۲، ۱۵]. در این معادله  $P$  فشار،  $M$  جرم کره‌ای به شعاع  $r$ ، و  $\rho$  چگالی است.

#### ب - پایستگی جرم

از کاهش جرم در اثر باد ستاره‌ای و یا سایر فرآیندها صرفنظر می‌شود. البته در مراحل اولیه تحول ستاره‌ها این فرض درست است، ولی در مراحل پایانی، شرط پایستگی جرم دیگر برقرار نیست. در واقع نحوه کاهش جرم ستاره در مراحل پایانی تحول، مسأله پیچیده‌ای است که امروزه افراد بسیاری مشغول بررسی آن هستند [۱۶، ۱۷]. حال پوسته‌ای کروی به شعاع  $r$  داخل ستاره در نظر بگیرید؛ پایستگی جرم به این معادله می‌انجامد

$$\frac{dM}{dr} = 4 \pi r^2 \rho. \quad (۲)$$

#### ج - تعادل تابشی

فرض کنیم  $L(r)$  شار انرژی گسیلی از کره‌ای به شعاع  $r$  داخل ستاره باشد. در این صورت تغییر شار گسیلی در دو طرف پوسته کروی داخل ستاره، در اثر فرآیندهای هسته‌ای و انقباض گرانشی خواهد بود. کمیت

$$\varepsilon = \varepsilon(\rho, T, X, Y)$$

را به عنوان انرژی هسته‌ای تولید شده در واحد زمان به ازاء واحد جرم معرفی می‌کنیم، که در آن  $X$  و  $Y$  به ترتیب کسر جرمی

$$\frac{dq}{dx} = l \frac{p}{t} x^{\gamma}, \quad (13)$$

$$\frac{dt}{dx} = -Cjl \frac{P^{\gamma}}{t^{\lambda \delta} x^{\gamma}}, \quad \frac{dt}{dx} = \frac{\gamma t}{\delta P} \frac{dp}{dx}, \quad (14)$$

$$\frac{df}{dx} = Dilp^{\gamma} r^{\nu} - \gamma x^{\gamma}; \quad (15)$$

که در این رابطه‌ها  $C$  و  $D$  ثابت‌هایی هستند که به جرم، تابندگی و شعاع ستاره بستگی دارند.  $i, j, l$  و  $\lambda$  در حالتی که ستاره تازه متولد شده است، برابر با یک هستند در غیر این صورت آنها با تغییرات کسر جرمی عناصر تغییر می‌کنند [۲].

حال ببینیم، با این تبدیلات، شرایط مرزی به چه صورتی در می‌آیند. در معادلات معمولی شرایط مرزی به این صورت است:

$$r=R \Rightarrow T=0, \quad P=0, \quad L(r)=L, \quad M(r)=M; \quad (16)$$

که  $R$  و  $L$  نامعلوم هستند؛ یعنی از ۵ متغیر فقط ۳ متغیر معلوم است. اما با تبدیلات انجام شده شرایط مرزی چنین می‌شود:

$$x=1 \Rightarrow q=1, \quad f=1, \quad t=0, \quad p=0, \quad C. \quad (17)$$

اگر در معادلات دقت کنیم می‌بینیم که در این صورت برای حل معادلات پوسته فقط  $C$  نامعلوم است. یعنی در این حالت برخلاف حالت قبل فقط یک متغیر اختیاری داریم. در واقع به ازاء هر مقدار  $C$  یک خانواده جواب داریم که با توجه به جواب هسته ستاره - حل معادلات از مرکز به سطح - می‌توانیم خانواده جواب مناسب را مشخص کنیم.

برای حل از مرکز به سطح در معادلات تبدیل یافته، دوباره تبدیلات زیر را اعمال می‌کنیم:

$$q=q^* q_0, \quad f=f^* f_0, \quad x=x^* x_0, \quad p=p^* p_0, \quad t=t^* t_0. \quad (18)$$

بدین ترتیب متغیرهای بدون \* را طوری به متغیرهای \* دار تبدیل می‌کنیم که شکل ظاهری معادلات به دست آمده شبیه معادلات پوسته باشد، بعلاوه همه ثابتها - یعنی  $C$  و  $D$  - حذف می‌شوند [۲]. اما شرایط مرزی: شرایط مرزی در مرکز برای معادلات تغییر

$$\chi = \chi(\rho, T, X, Y) \quad (20.8)$$

$$\varepsilon = \varepsilon(\rho, T, X, Y) \quad (30.8)$$

و شرایط مرزی

$$r=0 \Rightarrow M(r)=0, \quad L(r)=0; \quad (10.9)$$

$$r=R \Rightarrow T(r)=0, \quad P(r)=0, \quad (20.9)$$

می‌توان به اطلاعات مورد نظر درباره ساختار درونی ستاره دست یافت. ولی معادلات ساختار را نمی‌توان یکطرفه حل کرد. در واقع به علت واگرا شدن جوابها، باید معادلات را همزمان از سطح به مرکز و از مرکز به سطح حل کنیم و محلی را داخل ستاره پیدا کنیم که در آنجا

$$T_{if} = T_{ef}, \quad P_{if} = P_{ef}, \quad T_{if} = T_{ef}, \quad M_{if} = M_{ef}, \quad L_{if} = L_{ef}. \quad (10)$$

زیرنویسهای  $if$  و  $ef$ ، به ترتیب، به جواب معادلات از مرکز به سطح و از سطح به مرکز را نشان می‌دهند. و از آنجایی که یافتن محلی داخل ستاره که در آن این ۵ متغیر یکی شوند کار بسیار دشواری است؛ روش زیر را به کار می‌بریم [۲، ۱۱]. ابتدا تبدیلات زیر را انجام می‌دهیم تا متغیرها به متغیرهای بدون بُعد تبدیل شوند

$$M(r) = qM, \quad L(r) = fL, \quad r = xR, \quad P = p \frac{GM^{\gamma}}{4\pi R^{\gamma}}, \quad T = t\mu_s \frac{HGM}{kR}. \quad (11)$$

در این تبدیلات  $M, R, L$  و به ترتیب شعاع، جرم و تابندگی ستاره‌اند. همچنین  $H$  جرم هیدروژن،  $\mu_s$  وزن مولکولی، و  $k$  ثابت استفان - بولتزمن است. البته این تغییر متغیرها مزیت دیگری هم دارند که در ادامه به آن اشاره خواهیم کرد.

می‌توان فرض کرد که محیط داخل ستاره گاز کامل است؛ در این صورت قانون گازهای ایده‌آل را بکار می‌بریم - البته در حالت کلی باید فشار تابشی را نیز در نظر گرفت. فشار تابشی در مراحل پیشرفته‌تر تحول اهمیت می‌یابد. همچنین خواهیم دید هر چه جرم ستاره بیشتر باشد، فشار تابشی بیشتر خواهد بود. با انجام تبدیلات ۱۱، معادلات بنیادی بدینگونه می‌شوند [۲]

$$\frac{dp}{dx} = -l \frac{P}{t} \frac{q}{x^{\gamma}}, \quad (12)$$

نیافته چنین است:

$$r = 0 \Rightarrow T = T_c, P = P_c, M(r) = 0, L(r) = 0,$$

(۱۹)

که در اینجا  $T_c$  و  $P_c$  نامعلوم هستند. ولی با انجام تبدیلات این شرایط مرزی به صورت زیر در می آیند

$$x^* = 0 \Rightarrow q^* = 0, f^* = 0, t^* = 1, p^* = p_c^*,$$

(۲۰)

و در اینجا فقط فشار در مرکز،  $p_c^*$  نامعلوم است. یعنی می توان به آن مقادیر متفاوت داد و دسته جوابهای مختلف به دست آورد. می توانیم معادلات پوسته و معادلات مرکز را به ازای مقادیر اختیاری ثابتها حل کنیم تا سرانجام نقطه انطباق جوابها به دست آید. اما این کار بسیار دشوار است. از این رو کمیتهای  $U$  و  $V$  را طوری تعریف می کنیم که وقتی نمودار  $U - V$  متناظر با جواب پوسته و جواب مرکز را رسم می کنیم، نقطه برخورد آنها همان محل انطباق باشد. با معلوم شدن نقطه انطباق،  $D$  به دست می آید.  $C$  را نیز از قبل داشتیم؛ در این صورت دو رابطه بین  $L$  و  $R$  داریم که از آنجا درخشندگی و شعاع ستاره به دست می آید. برای اطلاعات بیشتر درباره این روش، مرجع ۲ را ببینید.

تا اینجا آنچه گفتیم مقدمات لازم برای ساخت مدل و حل آن بود. حال دقیقاً به ساخت مدل برای ستاره های سنگین تر از خورشید می پردازیم و نتایج محاسبات کامپیوتری را ارائه می دهیم.

#### ۴. ساخت مدل برای ستاره های سنگین تر از خورشید

برای مطالعه تحول ستاره ها آنها را به دو دسته سنگین تر از خورشید و سبک تر از خورشید تقسیم می کنیم. این تقسیم بندی دو دلیل دارد: (۱) در ستاره های بالای رشته اصلی (سنگین تر از خورشید)، فرآیند چرخه کربن انرژی ستاره را تأمین می کند؛ این در حالی است که در ستاره های پایین رشته اصلی (سبک تر از خورشید)، واکنش پروتون - پروتون انرژی ستاره را تأمین می کند. (۲) پوسته ستاره های بالای رشته اصلی کاملاً تابشی است، اما ستاره های پایین رشته اصلی دارای پوسته ای همرفتی هستند.

گام نخست برای ساخت مدل انتخاب رابطه های مشخصه گاز است. سؤالی که به ذهن می رسد این است که چگونه روابط مشخصه گاز را، از بین روابط موجود انتخاب کنیم. در واقع انتخاب شکل مناسب این روابط به دما و چگالی ستاره بستگی دارد. از این

رو ابتدا دما و چگالی ستاره مورد نظر را به طور تقریبی تخمین می زنیم؛ سپس بر این اساس با انتخاب رابطه های مناسب، مدل را حل می کنیم. اگر دما و چگالی به دست آمده از مدل با مقادیری که حدس زده بودیم سازگار باشد، روابط را درست انتخاب کرده ایم. برای ستاره های بالای رشته اصلی روابطی که انتخاب کرده ایم کاملاً رضایت بخش به نظر می رسد.

برای توصیف گازهای درون ستاره معادله گازهای کامل همراه با فشار تابشی مناسب است. کمیت  $\beta$  را به عنوان نسبت فشار گاز به فشار کل تعریف می کنیم. فرض می کنیم کدوری ناشی از فرآیندهای مقید - آزاد و پراکندگی است. بعلاوه برای نوع فرآیندی که انرژی ستاره را تأمین می کند، فرآیند چرخه کربن را انتخاب می کنیم [۱۱، ۲].

حال می توانیم معادلات پوسته و مرکز را با همان روشی که گفتیم حل کنیم. ابتدا معادلات هسته را حل می کنیم؛ سپس معادلات پوسته را نیز با یک  $C$  دلخواه حل می کنیم. با رسم نمودارهای  $UV$  مرکز و پوسته سعی می کنیم نقطه انطباق را به دست آوریم. اگر شرایط انطباق برآورده نشد مقدار  $C$  را دوباره تغییر می دهیم تا در نهایت شرایط انطباق برآورده شود. با معلوم شدن محل انطباق جوابها، ثابت  $D$  به دست می آید. و از این جا با داشتن  $C$ ، درخشندگی و شعاع ستاره مشخص می شود.

ما این محاسبات را برای سه ستاره به جرمهای  $5/2$ ،  $5$  و  $10$  جرم خورشیدی انجام دادیم. در هر سه مورد کسر جرمی عناصر را به صورت زیر انتخاب کردیم [۲]:

$$X = 0.90, \quad Y = 0.09, \quad Z = 0.01 \quad (\mu = 0.534)$$

(۲۱)

مثلاً برای ستاره ای با  $10$  جرم خورشیدی به ازای  $\log C = -6.579$ ، نقطه انطباق مناسب را به دست آوردیم (شکل ۱). پس از مشخص شدن نقطه انطباق درخشندگی و شعاع ستاره به دست می آید. همچنین نمودارهای چگالی و دما برحسب فاصله از مرکز ستاره به آسانی به دست می آیند (شکل های ۲ و ۳). همان طور که در نمودارها دیده می شود، آنها کاملاً یکنواخت هستند و هیچ ناپیوستگی ندارند. در واقع هر نمودار براساس حل دو مجموعه معادله رسم شده است. پیوستگی آنها نشان می دهد که انطباق به خوبی صورت گرفته است. همچنین اگر به یاد داشته باشیم، در ابتدا فرض کردیم که ستاره تقارن کروی دارد - یعنی همه کمیتها فقط به فاصله از مرکز ستاره بستگی دارند. این موضوع به خوبی از نمودارها مشهود است. خلاصه ای از نتایج محاسبات در

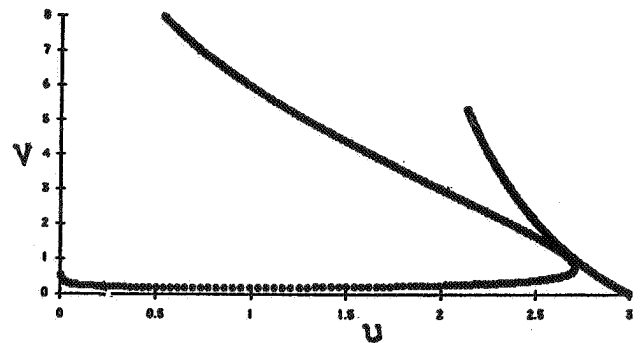
جدول ۱. نتایج محاسبات بر طبق این مدل، برای سه ستاره با جرمهای ۲٫۵، ۵ و ۱۰ جرم خورشیدی هنگامی که روی رشته اصلی قرار دارند.

$M$	$10 M$	$5 M$	$2.5 M$
$\log C$	-۶٫۵۷۹	-۶٫۱۴	-۵٫۷۹۳
$U_f$	۲٫۰۳۳	۲٫۳۲۲	۲٫۵۲۹
$U_f^*$	۲٫۰۴۴	۲٫۳۳۲	۲٫۵۳۹
$V_f$	۳٫۱۰۰	۲٫۰۶۳	۱٫۳۸۳
$V_f^*$	۳٫۰۶۸	۲٫۰۳۳	۱٫۳۵۷
$x_f$	۰٫۳	۰٫۲۲۰	۰٫۱۵۷
$q_f$	۰٫۴۳۰	۰٫۲۷۷	۰٫۱۶۸
$P_f$	۱۴٫۰۴	۳۶٫۹۰۷	۸۴٫۴۳۸
$t_f$	۰٫۴۶۱	۰٫۶۱۰	۰٫۷۷۴
$\beta_f$	۰٫۹۷۵	۰٫۹۹۳	۰٫۹۹۸
$x_f^*$	۱٫۸۳۲	۱٫۵۲۰	۱٫۲۵۵
$t_f^*$	۰٫۵۵۸	۰٫۶۷۴	۰٫۷۶۶
$P_f^*$	۰٫۲۳۳	۰٫۳۷۲	۰٫۵۱۳
$\log D$	۱٫۲۹۲	۰٫۵۳۳	-۰٫۷۷۰
$\log L/L$	۳٫۴۸۶	۲٫۴۷۳	۱٫۳۳۶
$\log R/R$	۰٫۵۵۰	۰٫۳۶۰	۰٫۱۸۲
$\log T_e$	۴٫۳۵۶	۴٫۱۹۰	۴٫۰۰
$SpT$	$B_1$	$B_5$	$A_2$

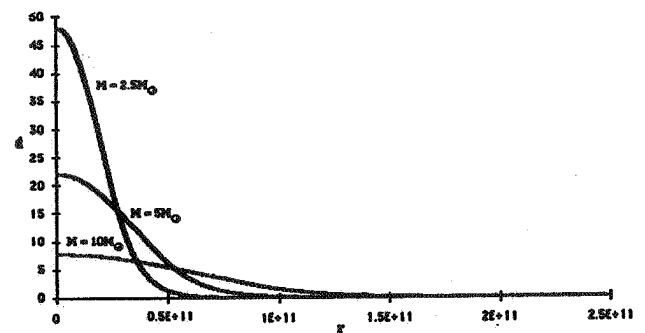
تابشی اهمیت بیشتری می‌یابد. ستاره‌های  $AR$  - راعی،  $U$  - افعی و  $CW$  - قیفاوس به ترتیب با ۲٫۵، ۵ و ۱۰ جرم خورشیدی از رده طیفی  $A_2$ ،  $B_5$ ،  $B_1$  هستند. اگر این رده‌های طیفی را با نتایجی که از این مدل به دست آورده‌ایم مقایسه کنیم، توافق بسیار خوبی مشاهده می‌کنیم. حال ببینیم نحوه تحول این ستاره‌ها چگونه است.

با استفاده از روش بخش ۳ می‌توانیم تحول ستاره‌های سنگین تر از خورشید را بررسی کنیم. در واقع باید روابط مشخصه گاز را دقیقاً تعیین کنیم و بعد همه محاسبات را تکرار کنیم. اما اگر فقط از این روش استفاده کنیم به نتیجه درستی نخواهیم رسید. ببینیم چرا این گونه است.

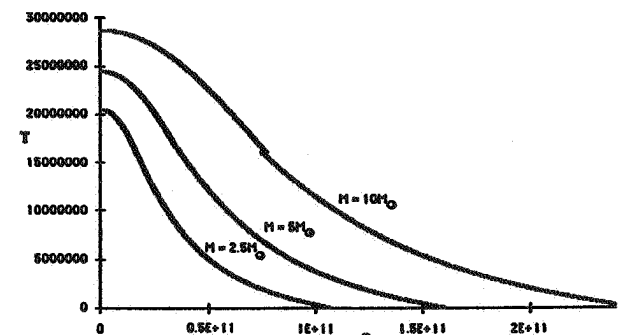
در واقع هر چه از عمر ستاره بگذرد، جرم موجود در هسته ستاره کمتر می‌شود. در نتیجه یک ناحیه میانی بین هسته و پوسته بوجود می‌آید. لایه‌های این ناحیه که در ابتدا در هسته قرار داشتند بتدریج در خارج آن قرار می‌گیرند. کسر جرمی عناصر هر لایه همان



شکل ۱. نمودار UV برای ستاره‌ای با ۱۰ جرم خورشیدی.



شکل ۲. نمودار چگالی بر حسب فاصله از مرکز ستاره برای سه ستاره با جرمهای ۲٫۵، ۵، ۱۰ جرم خورشیدی.



شکل ۳. نمودار دما بر حسب فاصله از مرکز ستاره برای سه ستاره با جرمهای ۲٫۵، ۵، ۱۰ جرم خورشیدی.

جدول ۱ آمده است.

شکل ۲ نمودار چگالی بر حسب فاصله از مرکز ستاره را برای هر یک از ستاره‌های مورد نظر نشان می‌دهد. نکته جالب اینجاست که هر چه جرم ستاره بیشتر باشد، چگالی مرکز آن کمتر است. مثلاً ستاره‌ای با ۲٫۵ جرم خورشیدی، چگالی مرکزی‌اش حدود ۵۰ گرم بر سانتیمتر مکعب است؛ در حالی که چگالی قسمت مرکزی ستاره‌ای با ۱۰ جرم خورشیدی حدود ۸ گرم بر سانتیمتر مکعب است. همچنین اگر در جدول ۱ به نسبت فشار گاز به فشار کل ( $\beta$ ) نگاه کنیم متوجه می‌شویم که هر چه جرم ستاره بیشتر باشد، فشار

جدول ۲. نتایج محاسبات بر طبق این مدل، برای ستاره‌ای با ۵ جرم خورشیدی تا پایان مرحله هیدروژن‌سوزی.

$M =$	$5 M_{\odot}$	$1 M_{\odot}$	$3 M_{\odot}$
$\log C$	-۵/۹۰	-۶/۰۰	-۵/۸۱۵
$p$	۴۱۶	۱۷۷/۳	۸۴۸
$t$	۱/۵۶	۱/۱۳۳	۲/۰۰
$x_i$	۰/۰۹۵	۰/۱۴۶	۰/۰۶۵
$q_i$	۰/۰۹۵	۰/۱۵۴	۰/۰۶۳
$m$	۰/۷۰۰۱	۰/۸۰۰۳	۰/۶۶۸۴
$n + 1$	۲/۵۰	۲/۵۰	۲/۵۰
$X_i$	۰/۳۰	۰/۶۲۹	۰/۰۸۴
$\beta_i$	۰/۹۸۶	۰/۹۹۰	۰/۹۸۱
$\log(L/L_{\odot})$	۲/۵۶۴	۲/۵۵	۲/۶۰
$\log(R/R_{\odot})$	۰/۵۴۴	۰/۴۳۵	۰/۶۱۲
$\tau (10^6 \text{ yrs})$	۱۰۰	۷۷/۶	۱۵۸

هیدروژن قسمت مرکزی ستاره‌ای با ۱۰ جرم خورشیدی بعد از ۳۲ میلیون سال تقریباً هیدروژن قسمت مرکزی به پایان می‌رسد؛ این در حالی است که ستاره‌ای با ۲/۵ جرم خورشیدی پس از ۹۰۰ میلیون سال به پایان می‌رسد. شکل ۵ برای ستاره‌ای با ۵ جرم خورشیدی، نحوه تغییرات چگالی را در سه وضعیت تحولی نشان می‌دهد.

اما برای مطالعه تحول ستاره‌ها از مرحله هیدروژن‌سوزی به بعد باید فرآیند هلیوم‌سوزی را در نظر گرفت. بدیهی است که محاسبات پیچیده‌تر می‌شود و ما این مرحله تحولی را بررسی نکردیم. در این وضعیت ستاره لایه‌لایه است؛ در قسمت مرکزی اش فرآیند هلیوم‌سوزی رخ می‌دهد و در لایه‌های اطراف آن هیدروژن وجود دارد. برای کارهایی که در این زمینه انجام شده است مرجعهای ۱۲، ۱۳، ۱۴ را ببینید.

کلیه محاسبات را به کمک کامپیوترهای آپل انجام دادیم. برنامه‌ها را نیز به زبان C نوشتیم که می‌توانیم در اختیار علاقمندان قرار دهیم.

### ۵. نتیجه‌گیری

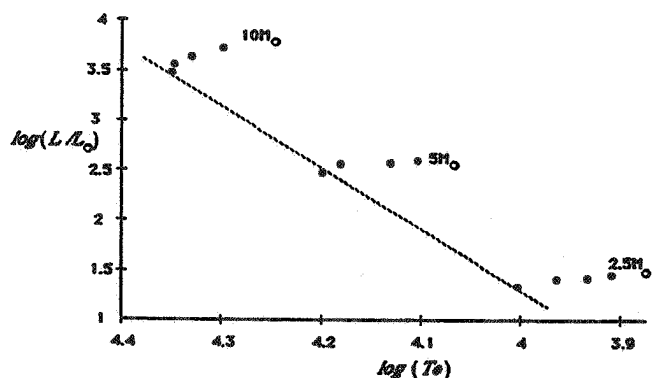
به نظر می‌رسد بررسی تحول ستاره‌ها کار ساده‌ای نیست. در مدلی که ارائه شد - با این که فرضهای ساده‌کننده بسیاری را در نظر گرفتیم - محاسبات طولانی و وقت‌گیر است. با این حال دیدگاهی کلی از آنچه در اعماق ستاره‌ها رخ می‌دهد، حاصل می‌شود. در ادامه این کار می‌توان در ساختن مدل، هر یک از فرضهای ساده‌کننده را

مقداری است که آن لایه در لحظه جدایی از هسته ستاره داشته است. پس از جدایی از هسته ترکیبات این لایه‌ها تغییر نمی‌کند، زیرا فرآیند گداخت هسته‌ای که کسر جرمی عناصر را تغییر می‌دهد فقط در هسته اتفاق می‌افتد. از این رو لایه‌های بیرونی تر ناحیه میانی در مقایسه با لایه‌های درونی‌تر، هیدروژن بیشتری دارند - زیرا مدت زمان کمتری در هسته بوده‌اند. بنابراین ترکیبات ناحیه میانی تابع پیوسته‌ای از فاصله از مرکز ستاره است که از لایه بیرونی کم هیدروژن هسته، آغاز می‌شود و به لایه پُر هیدروژن پوسته پایان می‌یابد.

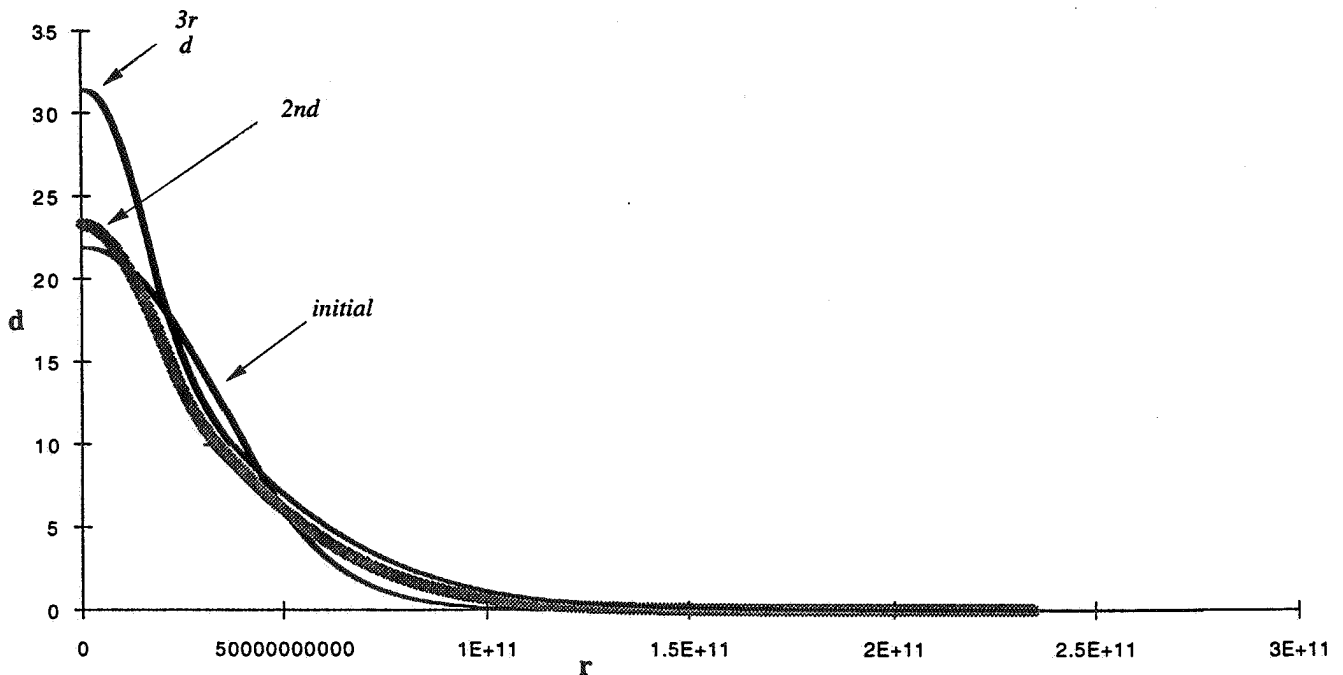
برای بررسی تحول ستاره‌ها، طبیعی‌ترین راهی که به نظر می‌رسد چنین است: بازه زمانی مشخصی را انتخاب کنیم و حساب کنیم بعد از این مدت در اثر فرآیند گداخت، کسر جرمی عناصر چقدر تغییر کرده است. سپس محاسبات قسمت قبل را با این کسرهای جرمی «جدید» انجام دهیم. با این کار می‌توانیم پس از بازه زمانی انتخاب شده به همه اطلاعات مورد نظر درباره تحول ستاره - بویژه نحوه تغییر دما و تابندگی - دست یابیم.

اما بجای روش بالا از روش دیگری که تقریباً عکس روش بالاست استفاده می‌کنیم. مزیت این روش در این است که از نظر محاسبات کامپیوتری راحتتر است. در این روش به جای انتخاب بازه زمانی مشخص، برای پارامتر C مقادیر مختلفی را برمی‌گزینیم و مدل را حل می‌کنیم؛ و بعد محاسبه می‌کنیم که این مقادیر مختلف متناظر با چه بازه‌های زمانی هستند. این محاسبات را تا جایی ادامه می‌دهیم که هیدروژن قسمت مرکزی به پایان برسد. برای اطلاعات بیشتر درباره این روش مرجعهای ۲ و ۱۱ را ببینید.

ما برای سه ستاره با جرمهای ۲/۵، ۵ و ۱۰ جرم خورشیدی، نحوه ترک رشته اصلی را مطالعه کردیم (شکل ۴). جدول ۲ خلاصه‌ای از نتایج به دست آمده را برای تحول ستاره‌ای با ۵ جرم خورشیدی نشان می‌دهد. محاسبات ما نشان می‌دهد هر چه جرم ستاره بیشتر باشد، سریعتر سیر تحولش را طی می‌کند. مثلاً،



شکل ۴. وضعیت ستاره‌های با ۲/۵، ۵ و ۱۰ جرم خورشیدی بر روی نمودار H-R.



شکل ۵. نحوه تغییرات چگالی ستاره‌ای با ۵ جرم خورشیدی در سه وضعیت تحولی.

مسئله دیگری که امروزه مطرح است تولید نوترینو در فرآیندهای هسته‌ای ستاره‌هاست. آیا نوترینوها در کاهش جرم ستاره‌ها نقش دارند؟ در این صورت چه تأثیری بر روی تحول ستاره خواهند گذاشت؟ بررسی نقش نوترینوها در مدلی که ارائه کردیم ممکن است جالب باشد.

در نظر نگرفت. اخیراً چنین مطالعاتی انجام گرفته شده است، اما هنوز نتیجه قطعی در دست نیست [۵، ۶، ۷]. همچنین می‌توان در این مدل نقش میدانهای مغناطیسی را مطالعه کرد. با توجه به اینکه ستاره محیطی است یونیده، به نظر می‌رسد میدانهای مغناطیسی نقشی اساسی در تحول ستاره‌ها داشته باشند.

## مراجع

- Chandrasekhar, S. 1939, *An Introduction to the Study of Stellar Structure* (Chicago: University Chicago Press).
- Schwarzschild, M. 1958, *Structure and Evolution of the Stars* (New York: Dover).
- Menzel, D., Bhatnagar, P.L. & Sen, H.K. 1963, *Stellar Interiors* (London: Chapman & Hall).
- Hayashi, C., Hoshi, R., & Sagimoto, D. 1962, *Progr. Theoret. Phys. Suppl.*, 22, 1.
- Maeder, A., Meynet, G. 1987, *Astronomy and Astrophysics* 182, 243.
- Roxburgh, I. W. 1989, *Astronomy and Astrophysics*, 211, 361.
- Zhan, J. P. 1991, *Astronomy and Astrophysics*, 252, 179.
- Heney, L. G., Wilets, L., Bohm, K. H., Lelevier, R. & Levee, R. D. 1959, *Astrophysical Journal*, 129, 628.
- Heney, L. G., Forbes, J. E., and Gould, N. L. 1964, *Astrophysical Journal*, 139, 306.
- Yahil, A., Van den horn, L. 1985, *Astrophysical Journal*, 296, 554.
- Kushwaha, R. S. 1957, *Astrophysical Journal*, 125, 242.
- Iben, I, Jr. 1965a, *Astrophysical Journal*, 141, 993.
- ..... 1965b, *Astrophysical Journal*, 142, 1447.
- ..... 1966, *Astrophysical Journal*, 143, 483.
- Novotny, E. 1973, *Introduction to Stellar Atmospheres and Interiors* (New York: Oxford University Press).
- Leitherer, C., Lamers, H. G. 1994, *Space Science Reviews*, 66, 163.
- Bianchi, L., Hutchings, J. 1994, *Space Science Reviews*, 66, 183.