بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده فیزیک

چگالش کائونی در ستاره‌های نوترونی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد فیزیک هسته‌ای

داوود رفیعی

استاد راهنما

دکتر سید ظفرالله کلانتری

۱۳۹۳

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده فیزیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته فیزیک هسته‌ای آقای داوود رفیعی

تحت عنــوان

چگالش کائونی در ستاره‌های نوترونی

در تاریخ ۱۳۹۳/۶/۲۹ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر سید ظفرالله کلانتری
۲- استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر اکبر پروازیان
۳- استاد داور	دکتر محمد حسن علامت ساز
۴- استاد داور	دکتر مریم حسنوند
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر مجتبی اعلایی

تشکر و قدردانی

از *خداوند بخشنده و مهربان* بابت لطف و یاری‌اش در همه‌ی لحظات زندگی از جمله تهیه‌ی این پایان‌نامه

از *پدر و مادرم* به خاطر حمایت بی‌دریغشان در طول این مسیر

از استاد راهنمای گرانقدرم دکتر *سید ظفرالله کلانتری* بابت راهنمایی، گشاده‌رویی و مهربانی‌شان

از دکتر *پروازیان* استاد مشاور پایان‌نامه جهت بازخوانی و ویرایش رساله

از دکتر *محمد حسن علامت ساز* و سر کار خانم دکتر *مریم حسنوند* که داوری پایان‌نامه را بر عهده گرفتند

از *جناب آقای دکتر مشفق* و سر کار خانم *گودرزی* به خاطر راهنمایی‌های مؤثرشان

از دوستان عزیزم آقایان *امین رحمتی* و *سروش شاکری* که هر کدام به نحوی در پیمودن این مسیر نقش بسیار مؤثری داشتند

و همچنین از جناب *آقای دکتر جیمز لتیمر* و جناب *آقای دکتر یورگن شفنر* که با صبوری پاسخگوی سؤالات بودند و اطلاعات مورد نیاز را در اختیارم گذاشتند

کمال تشکر را داشته باشم.

داوود رفیعی

مهر ۱۳۹۳

کلیه حقوق مادی مرتبت بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به خداوند متعال که هرچه دارم از اوست...

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ۱

فصل اول : مقدمه

فصل دوم: تحول ستارگان از تولد تا مرگ

۲-۱ تولد ستارگان..... ۶

۲-۲ دوران کهولت ستارگان..... ۱۸

۲-۳ تحول ستاره‌های کم جرم..... ۲۴

۲-۴ مرگ ستارگان سنگین وزن..... ۳۰

فصل سوم: ستاره‌های نوترونی

۳-۱ از پیش‌بینی تا کشف..... ۴۰

۳-۲ ساختار ستاره‌ی نوترونی ۵۳

۳-۳ معادله‌ی حالت..... ۶۳

۳-۴ معادلات TOV و به دست آوردن ماکزیمم جرم ستاره‌ی نوترونی ۷۱

۳-۵ نتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری جرم ستاره‌های نوترونی..... ۷۶

فصل چهارم: چگالش کائونی و رسم نمودار جرم برحسب شعاع ستاره‌ی نوترونی

۴-۱ بی‌بعد کردن پارامترهای معادلات TOV..... ۸۵

۴-۲ الگوریتم کلی حل معادلات TOV و رسم نمودار جرم برحسب شعاع ستاره‌ی نوترونی .. ۸۹

۴-۳ معادله حالت‌های اولیه..... ۹۱

۴-۴ معادله حالت‌های پیشرفته ۹۸

۴-۵ چگالش کائونی..... ۱۰۴

۴-۵-۱ شکل‌گیری کائون و چگالش بوز- اینشتین کائونی..... ۱۰۴

۴-۵-۲ تأثیرات متقابل چگالش کائونی و ستاره‌ی نوترونی ۱۱۱

۴-۵-۳ معادله‌ی حالت و نمودار جرم بر حسب شعاع (M-R) برای چگالش کائونی..... ۱۱۴

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱ نتایج..... ۱۱۸

۵-۲ نتیجه‌گیری (مقایسه‌ی ماکزیمم جرم‌های مربوط به معادله حالت‌های مختلف)..... ۱۱۹
۵-۳ پیشنهادات..... ۱۲۲
پیوست‌ها..... ۱۲۴
پیوست۱: درون‌یابی..... ۱۲۴
پیوست۲:روش رانگ-کوتای مرتبه چهار..... ۱۲۶
پیوست۳: معادله‌ی حالت *GS1*..... ۱۲۷
مراجع..... ۱۳۶

چکیده:

تجلی‌گاه ماده در چگالی فراهسته‌ای ستاره‌های نوترونی هستند. بر این اساس تحول ستارگان را از تولد تا مرگ بررسی کرده‌ایم تا مشخص کنیم تحت چه شرایط و اتفاقاتی ستاره‌های نوترونی شکل می‌گیرند. بعد از آن کلیه‌ی مطالب مرتبط با ستاره‌های نوترونی را از پیش‌بینی و کشف تا ویژگی‌های فیزیکی و محاسبات نظری، بیان کرده‌ایم و همچنین در زمینه‌ی ساختارهایی که می‌توانند درون هسته‌ی این ستاره‌ها شکل بگیرند اطلاعاتی ارائه داده‌ایم. از جمله ساختارهایی که می‌توانند در ماده با چگالی فراهسته‌ای تشکیل شوند عبارتند از ماده‌ی بتای پایدار، ماده‌ی هایپرونی، چگالش پایونی، چگالش کائونی و ماده‌ی کوارکی شامل کوارک‌های آزاد (s,d,u).

همچنین در مورد تولید کائون در محیط نوکلئونی و ویژگی‌های درون محیطی کائون از جمله جرم مؤثر و انرژی و نهایتاً پدیده‌ی چگالش بوز- اینشتینِ کائونی توضیحات کاملی ارائه داده‌ایم. سرانجام به‌عنوان اصلی‌ترین کار محاسباتی این پایان‌نامه برای معادله حالت‌هایی که برای ساختار چگالش کائونی و سایر ساختارهای پیشنهادی برای ماده در چگالی فراهسته‌ای در اختیار داشتیم با استفاده از الگوریتمی که بر مبنای بی‌بعد کردن پارامترهای فیزیکی معادله‌ی حالت و معادلات TOV است، نمودار جرم بر حسب شعاع ستاره‌ی نوترونی را رسم کرده‌ایم و ماکزیمم جرم مربوط به هر معادله‌ی حالت را به دست آورده‌ایم. برای نمونه ما توانستیم برای معادله حالت‌های $GS1$ و $GS2$ که مربوط به ساختار چگالش کائونی هستند به ترتیب ماکزیمم جرم $1/375\,M_\odot$ و $1/665\,M_\odot$ (جرم خورشید $\equiv M_\odot$) را به دست آوریم. در پایان نیز با مقایسه‌ی این نتایج با ماکزیمم جرم‌هایی که برای سایر ساختارها و معادله حالت‌ها به دست آوردیم مفاهیم فیزیکی و اثرات درون محیطی مربوط به هر ساختار و دلیل تفاوت ماکزیمم جرم‌های به دست آمده را بیان کرده‌ایم.

لازم به ذکر است که برنامه‌ی محاسباتیِ تهیه شده در این رساله به گونه‌ای است که برای هر ساختار و هر معادله‌ی حالتی که در اختیار قرار گیرد قابل استفاده است.

کلمات کلیدی: چگالی فراهسته‌ای، ستاره‌ی نوترونی، معادلات TOV، چگالش کائونی

فصل اول
مقدمه

یکی از موضوعات پویا و چالش برانگیز در فیزیک هسته‌ای نظری، بررسی ویژگی‌های ماده در چگالی فراهسته‌ای است. چگال‌ترین محیطی که به صورت پایدار در اختیار داریم درون هسته‌هاست که به طور متوسط دارای چگالی $۲/۸\times۱۰^{۱۴}\ g/cm^{۳}$ می‌باشد، حال چنانچه محیطی داشته باشیم که چگالی آن از این مقدار بیشتر باشد به طوری که حتی ۱۰ تا ۲۰ برابر چگال‌تر باشد، به آن چگالی فراهسته‌ای می‌گوییم.

بحث و بررسی در مورد چنین شرایط خاص فیزیکی از زمانی آغاز شد که اخترفیزیکدانان وجود اجرامی به نام ستاره‌های نوترونی[1] را به‌عنوان لاشه‌ی باقی مانده از مرگ ستارگان سنگین وزن مطرح کردند. آن‌ها بر اساس بررسی تحولات دوران مرگ ستاره‌های خیلی سنگین‌تر از خورشید انتظار داشتند که در درون ستاره‌های نوترونی بخصوص نواحی مرکزی‌شان، چگالی بسیار بالا باشد و محیط با چگالیِ فراهسته‌ای شکل بگیرد. سپس این مسئله مطرح شد که در چنین ستاره‌هایی بخصوص در ناحیه‌ی هسته که بخش اعظمی از جرم و شعاع آن‌ها را شامل می‌شود چه ساختاری وجود دارد. به عبارت دیگر در هسته‌ی آن‌ها که چگالیِ فراهسته‌ای داریم ماده چه ویژگی و ساختاری خواهد داشت. به این ترتیب بسیاری از فیزیک‌دانان از حدود سال‌های ۱۹۳۴ به بعد که هنوز ستاره‌های نوترونی کشف نشده بودند و به آن‌ها صرفاً به عنوان یک کار نظری نگاه می‌شد، تلاش کردند تا بتوانند ساختار چنین محیطی را تشخیص دهند و به این صورت به شناخت بهتری از ستاره‌های نوترونی و ماده در چگالی فراهسته‌ای دست یابند.

---

[1]- *Neutron star*

از آن زمان تاکنون با پیشرفت‌های مهمی که در زمینه‌های رصد ستاره‌های نوترونی، آزمایش‌های زمینی همچون آزمایش‌های برخورد یون‌های سنگین[۱] و رهیافت‌های نظری در فیزیک هسته‌ای و ذرات بنیادی ایجاد شده، نتایج بسیار جالبی به دست آمده است.

فیزیکدانان معتقدند بر خلاف درون هسته‌ها که نوکلئون‌ها را جدا در نظر می‌گیریم به‌طوری که حتی بین آن‌ها فضای خالی وجود دارد اما در ستاره‌های نوترونی به دلیل چگالی فوق‌العاده بالا، نوکلئون‌ها می‌توانند ساختارهای داخلی همدیگر را حس کنند و می‌توانند برهم‌کنش‌های تماسی یعنی برهم‌کنش قوی داشته باشند که حتی کوارک‌های سازنده‌ی آن‌ها نیز دخیل باشند. در واقع نوکلئون‌ها و همچنین لپتون ها مانند الکترون با توجه به اینکه فرمیون هستند، در این چگالی‌های زیاد انرژی فرمی بسیار بالایی خواهند داشت پس می‌توانند واکنش‌های متنوعی را ایجاد کنند و هادرون‌های دیگری غیر از نوترون، پروتون و الکترون وارد محیط شوند. پس انتظار داریم در چگالی فراهسته‌ای ذرات جدیدی وارد سیستم شوند که نهایتاً به شکل گرفتن ساختارهایی که به ساختارهای شگفت[۲] معروف هستند، منجر می‌شوند. از جمله‌ی این ساختارها می‌توانیم به هایپرونی[۳] شدن محیط یعنی ایجاد شدن هایپرون‌هایی مانند Σ^- و Λ اشاره کنیم. ساختار دیگری که در این پایان‌نامه هم مورد توجه قرار دارد چگالش کائونی[۴] است که اولین بار در سال۱۹۸۶مطرح شد و منظور از آن، به وجود آمدن ذرات کائون در محیط با چگالی ۳ الی ۴ برابر چگالی هسته‌ای است که با توجه با خاصیت بوزونی این ذرات می‌تواند منجر به یک چگالش بوز- اینشتین[۵] کائونی شود. گذار فاز به به ماده‌ی کوارکیِ آزاد[۶] که سبب تشکیل ساختاری شامل کوارک‌های آزاد (u,d,s)در چگال‌ترین قسمت‌های ستاره‌ی نوترونی می‌شود نیز از جمله ساختارهایی است که برای ماده در چگالی فراهسته‌ای پیشنهاد شده[۱و۲]. نکته‌ی مشترک در همه‌ی این ساختارها وارد شدن کوارک شگفت در محیط است که علت نام‌گذاری این ساختارها با نام ساختارهای شگفت نیز به همین دلیل می‌باشد. علاوه بر کارهای علمی متنوعی که در زمینه‌ی احتمال و نحوه‌ی تشکیل شدن هر کدام از این ساختارها در چگالی‌های فراهسته‌ای انجام شده و در حال انجام نیز هست، قدم بسیار مهم بعدی که در درک و شناخت بهتر این ساختارها بسیار مؤثر است به دست آوردن معادله‌ی حالت[۷] مربوط به هر کدام از آن‌هاست. منظور از معادله‌ی حالت به دست آوردن رابطه‌ای برای فشار و چگالی انرژی محیط با یک ساختار مشخص و به ازای چگالی‌های مختلف است یعنی اینکه بفهمیم برای سیستمی که مثلاً دارای ساختار چگالش کائونی است، فشار و چگالی انرژی به ازای چگالی‌های مختلف محیط چه مقادیری دارند. ویژگی‌های هر ساختار توسط معادله‌ی حالت آن بیان می‌شود و چنانچه بخواهیم هرگونه تحلیل و محاسبه‌ای روی آن ساختار مورد نظر انجام دهیم

1- *Heavy ion collision*
2- *Exotic structures*
3- *Hyperon*
4- *Kaon condensation*
5- *Bose-Einstein condensation*
6- *Deconfined quark matter*
7- *Equation of state*

باید از معادله‌ی حالت آن استفاده کنیم پس به عبارتی می‌توانیم بگوییم که هر ساختار با معادله‌ی حالتش معرفی می‌شود و هر چه بتوانیم معادله‌ی حالت صحیح‌تر و واقعی‌تری به دست آوریم به درک بهتری از آن شرایط فیزیکیِ خاص می‌رسیم.

می‌دانیم که همه‌ی نتایج نظری در فیزیک می‌بایستی با تجربه سازگار باشند یا به عبارت دیگر با تجربه تأیید شوند پس برای بررسی ساختارهای فرض شده در چگالی‌های فراهسته‌ای و معادله‌ی حالت آن‌ها نیازمند آزمایشگاهی هستیم که چنین محیطی را به صورت پایدار در اختیار ما قرار دهد. با توجه به اینکه همچنان ایجاد چنین شرایطی حداقل به صورت پایدار در روی زمین امکان پذیر نیست پس به سراغ ستاره‌های نوترونی می‌رویم چرا که تنها مکانی در عالم که ماده در چگالی فراهسته‌ای به صورت طبیعی و پایدار وجود دارد، درون هسته‌ی ستاره‌های نوترونی است و ما می‌توانیم از آن‌ها به عنوان آزمایشگاه ماده در چنین شرایط ویژه‌ای استفاده کنیم.

حال این سؤال مطرح می‌شود که چگونه می‌توانیم میان معادله‌ی حالتی که صرفاً یک کار نظری در فیزیک هسته‌ای و ذرات بنیادی است و ستاره‌های نوترونی ارتباط برقرار کنیم، در واقع ما باید با استفاده از معادله حالتی که در اختیار داریم، پارامتر فیزیکی‌ای از ستاره‌ی نوترونی را به دست آوریم. برای این کار به سراغ معادلات TOV می‌رویم.

$$\frac{dP(r)}{dr}=-\frac{GM(r)\varepsilon(r)}{c^2r^2}\left[1+\frac{P(r)}{\varepsilon(r)}\right]\left[1+\frac{4\pi r^3P(r)}{M(r)c^2}\right]\left[1-\frac{2GM(r)}{c^2r}\right]^{-1} \qquad (۱-۱)$$

$$\frac{dM(r)}{dr}=\frac{4\pi r^2\varepsilon(r)}{c^2} \qquad (۱-۲)$$

این دو معادله برای بررسی ساختار ستاره‌ی نوترونی و براساس نسبیت عام توسط سه دانشمند به نام‌های ریچارد تولمن[۱]، روبرت اوپنهایمر[۲] و جورج ولکوف[۳] در سال ۱۹۳۹ به دست آمده‌اند که در آن‌ها (P) فشار، (M) جرم، (ε) چگالی انرژی، (r) شعاع، (G) ثابت گرانش نیوتنی و (c) سرعت نور می‌باشد[۳ و۴ و۵]. این معادلات تغییرات فشار و جرم ستاره‌ی نوترونی را بر اساس شعاع نشان می‌دهند و با استفاده از آن‌ها می‌توانیم میان معادله‌ی حالت و ستاره‌ی نوترونی ارتباط برقرار می‌کنیم [۱و۲و۴و۵]. در واقع ما با کمک این دو معادله که از اخترفیزیک به دست آمده‌اند و معادله‌ی حالتی که از فیزیک هسته‌ای به دست آمده، می‌توانیم پارامتر فیزیکی‌ای به نام ماکزیمم جرم[۴] ستاره‌ی نوترونی متناظر با آن ساختار فرض شده و معادله‌ی حالت استفاده شده را به دست آوریم. به عبارت دیگر با حل هم زمان معادله‌ی حالت و معادلات TOV می‌توانیم بفهمیم که مثلاً اگر در هسته‌ی ستاره‌ی نوترونی که چگالی فراهسته‌ای است، ساختار چگالش کائونی شکل بگیرد، ماکزیمم جرم چنین ستاره‌ی نوترونی‌ای چقدر است. حال که

---

[1]- *Richard Tolman*
[2]- *Robert Oppenheimer*
[3]- *George Volkoff*
[4]- *Maximum mass*

توانستیم از معادله‌ی حالت مورد نظرمان یک پارامتر فیزیکی یعنی ماکزیمم جرم متناظر با آن را به دست آوریم به سراغ نتایج رصدی از اندازه‌گیری جرم ستاره‌های نوترونی می‌رویم. در واقع ما ماکزیمم جرمی که برای ستاره‌ی نوترونی با ساختار و معادله‌ی حالت مشخصی به دست آوردیم را با جرم‌های اندازه‌گیری شده از ستاره‌های نوترونی مقایسه می‌کنیم تا به دقت و صحت ساختار فرض شده و معادله‌ی حالت مربوط به آن پی ببریم.

بر این اساس در این پایان‌نامه با توجه به اینکه تجلی‌گاه ماده در چگالی فراهسته‌ای ستاره‌های نوترونی هستند ابتدا در فصل دوم تحول ستارگان را از تولد تا مرگ بررسی می‌کنیم و با بیان مفاهیمی از جمله ایجاد تعادل هیدروستاتیکی[1] در درون ستاره و تغییراتی که در ساختار ستاره‌ها در طول زندگی‌شان ایجاد می‌شود نشان می‌دهیم که چه اتفاقاتی رخ می‌دهد که نهایتاً ستاره‌ی نوترونی با چنین چگالی‌های بالایی به وجود می‌آیند.

سپس در فصل سوم کلیه‌ی مطالب مرتبط با ستاره‌های نوترونی از جمله پیش‌بینی، کشف، ویژگی‌های آن‌ها و همچنین کارهای محاسباتی و نظری‌ای که در زمینه‌ی آن‌ها انجام می‌شود را به‌طور مفصل بیان می‌کنیم. در فصل چهارم نیز نحوه‌ی تشکیل و ویژگی‌های ساختار چگالش کائونی را به‌طور کامل بررسی می‌کنیم. سپس با استفاده از معادله حالت‌هایی که برای این ساختار و سایر ساختارهای پیشنهادی برای ماده در چگالی فراهسته‌ای در اختیار داریم و معادلات TOV، ماکزیمم جرم متناظر با هر ساختار و معادله‌ی حالت استفاده شده را به روش رانگ-کوتای مرتبه چهار و با برنامه‌ی محاسباتی‌ای که در $Matlab$ نوشته‌ایم، به دست می‌آوریم. لازم به ذکر است برنامه‌ی تهیه شده در این رساله برای هر معادله‌ی حالتی و هر ساختاری قابل استفاده می باشد، که این ویژگیِ مفید آن را کاربردی‌تر ساخته است. در فصل پایانی نیز با مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از هر معادله‌ی حالت، مفاهیم فیزیکی مرتبط با آن‌ها را بیان می‌کنیم و در مورد چالش‌های جدیدی که در این زمینه‌ی علمی ایجاد شده اطلاعاتی ارائه می‌دهیم.

[1]- *Hydrostatic equilibrium*

فصل دوم
تحول ستارگان از تولد تا مرگ

در این فصل تحول ستارگان را از تولد تا مرگ بررسی خواهیم کرد. در بخش اول در مورد شکل‌گیری ستاره‌ها و ایجاد تعادل هیدروستاتیکی در درون آن‌ها صحبت می‌کنیم. در بخش بعدی دوران کهولت ستارگان و به وجود آمدن غول‌های قرمز را تحلیل خواهیم کرد و سپس مرگ ستارگان را بررسی می‌کنیم. مرگ ستاره‌ها به دو بخش مجزا، یکی ستارگان سبک وزن و دیگری ستارگان سنگین وزن تقسیم می‌شود، که درباره‌ی هرکدام از آن‌ها به ترتیب در زمینه‌ی کوتوله‌های سفید، ستاره‌های نوترونی و فشار تبهگنی موجود در درون آن‌ها اطلاعاتی ارائه خواهیم داد.

۲-۱. تولد ستارگان

ابرهای گاز و غباری که آن‌ها را سحابی[1] می‌نامیم محل و منشأ تولد ستاره‌ها هستند. در واقع جایی که ما جوان‌ترین گروه‌های ستارگان را پیدا می‌کنیم، می‌توانیم ابرهای عظیمی از گاز و غبار نیز پیدا کنیم. این ابرها تفاوت زیادی با ستاره‌ها دارند، در واقع میلیون‌ها بار بزرگ‌تر و دارای جرمی بسیار بیشتر از یک ستاره‌ی منفرد هستند و لازم به ذکر است که بخش اعظمی از گاز درون آن‌ها نیز هیدروژن می‌باشد. شکل‌های (۲-۱) و(۲-۲) دو نمونه از آن‌ها را نشان می‌دهند.

[1]- *Nebula*

شکل (۲-۱). سحابی جبار، *M42*. یک نمونه از مکان‌های فعال تشکیل ستارگان در کهکشان راه شیری.

شکل (۲-۲).*NGC3603* ابر بزرگ گازی که محل شکل‌گیری ستارگان است.

همچنین گاز درون این ابرها حدوداً $۱۰^{۲۰}$ مرتبه چگالی کمتری از یک ستاره و دمایی در حدود چند کلوین دارد. به‌عنوان نمونه‌ای دیگر از این ابرها می‌توان به بازوهای مارپیچی کهکشان‌های مارپیچی[1] اشاره کرد که برخلاف آنچه در وهله‌ی اول به تصور می‌آید از ستاره ساخته نشده‌اند بلکه نقاط درخشانی که به نظر ستاره می‌رسند در واقع ابرهای عظیمی از گازهای تابنده یا همان سحابی‌ها هستند که نمونه‌ای از آن‌ها را در شکل (۲-۳) مشاهده می‌کنید.

شکل (۲-۳). کهکشان مارپیچی، *M83*، بسیاری از کهکشان‌ها شکل چرخ و فلک یا مارپیچ دارند. تقریباً هر جسم ستاره مانندی که بتوان در این شکل مشاهده کرد در واقع توده‌ی درخشان و عظیمی از گاز است. این ابرها که سحابی خوانده می‌شوند، مشخص کننده‌ی بازوهای مارپیچی کهکشان هستند.

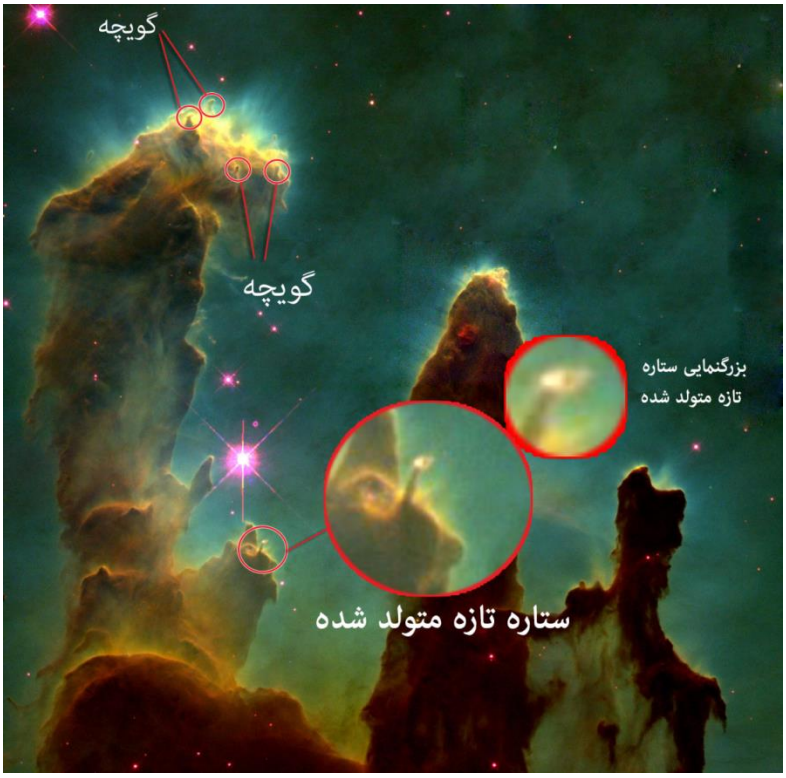
مشکل اصلی در بحث شکل‌گیری ستارگان این است که چگونه این ابرهای بزرگ گاز و غبار با چگالی پایین و دمای کم، کوچک می‌شوند و به چگالی‌های بالا و دمای زیاد می‌رسند و نهایتاً به ستاره تبدیل می‌شوند، کلید فهم این موضوع گرانش است.

گرانش می‌تواند به بخش‌های کوچکی از این ابرها نیرو وارد کند و آن‌ها را تا چگالی‌های بالا و دمای بالا منقبض کند. به این ناحیه‌ها که توسط گرانش ایجاد می‌شوند، هسته‌های چگال[2] یا گویچه[3] می‌گوییم. به عبارت دیگر در این سحابی‌ها مناطقی وجود دارند که اندکی گاز و غبار اضافی گرد آمده است یعنی گاز و غبار آن بیش از مناطق اطراف است. با توجه به اینکه ماده‌ی موجود در این گویچه‌ها اندکی بیشتر از محیط اطراف آن‌هاست پس میدان گرانش قوی‌تری نسبت به میدان گرانشی متوسط اطراف خود دارند. یک ابر بزرگ مولکولی ممکن است شامل

---

[1]- *Spiral galaxies*
[2]- *Dense cores*
[3]- *Globules*

تعداد زیادی از این هسته‌های چگال باشد بنابراین می‌تواند باعث تولید خوشه‌های ستاره‌ای با صدها ستاره شود، شکل (۲-۴) به‌خوبی نمونه‌ای از ساختارهای ذکر شده را نشان می‌دهد [۶ و۷].



شکل (۲-۴). سحابی عقاب، $M16$. در این سحابی چندین گویچه و یک ستاره تازه متولد شده به‌خوبی مشخص است و هرکدام از این ستون‌های گاز و غبار چندین سال نوری ارتفاع دارند.

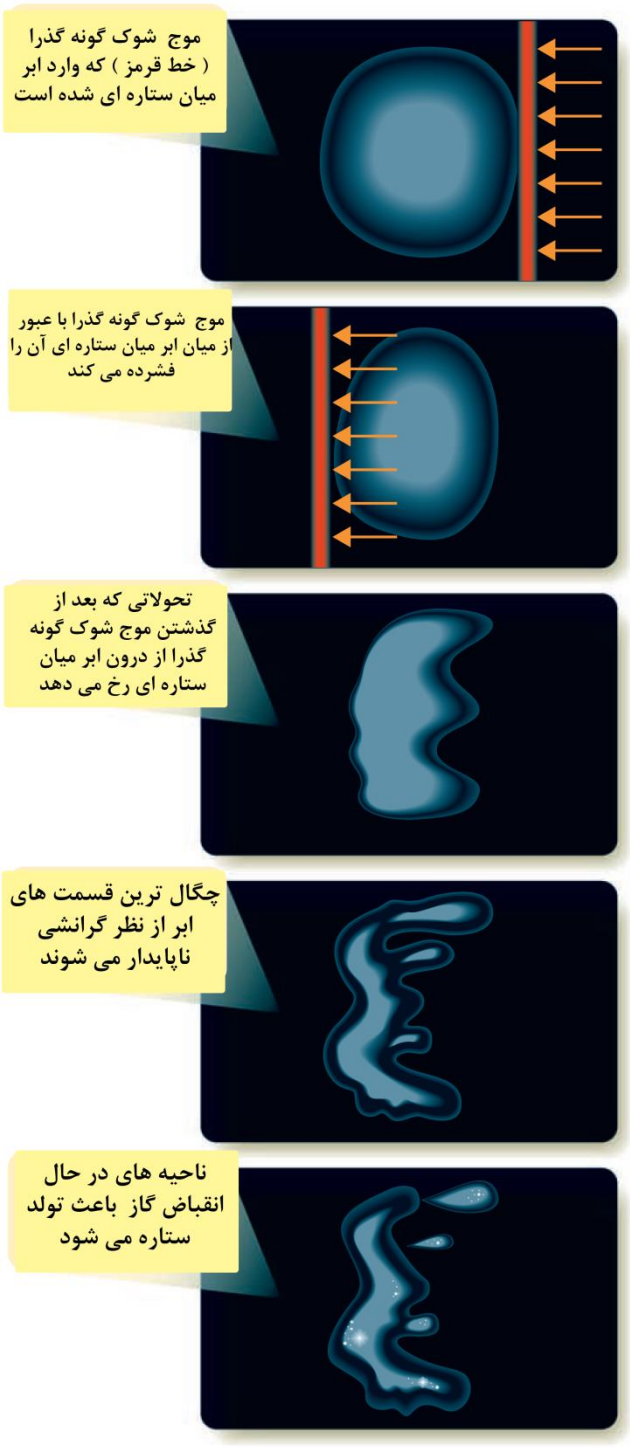
هم تئوری و هم مشاهده پیشنهاد می‌کنند که ابرهای عظیم مولکولی نمی‌توانند این گویچه‌ها را به صورت خود به خود تشکیل دهند، زیرا حداقل سه عامل از انقباض این ابرها جلوگیری می‌کند و گرانش برای تشکیل ستاره باید ابتدا بر این عوامل غلبه کند. اولی گرماست که به عنوان حرکت مولکول‌ها و اتم‌ها تعبیر می‌شود. حتی در دمای ۱۰ کلوین مولکول‌های هیدروژن می‌توانند با سرعت $۰/۳۵ km/s$ حرکت کنند و همین حرکت گرمایی چنانچه گرانش مورد نظر برای نگه داشتن ابر ضعیف باشد می‌تواند باعث جدا شدن و تکه‌تکه شدن ابر شود. دومی میدان مغناطیسی میان ستاره‌ای است که گرانش برای انقباض ابر باید برآن غلبه کند. می‌دانیم اتم‌ها و مولکول‌های خنثی در برابر میدان مغناطیسی بی‌تأثیر هستند اما یون‌ها که بار الکتریکی دارند نمی‌توانند آزادانه در میدان مغناطیسی حرکت کنند.
اگرچه گاز درون ابر مولکولی عمدتاً خنثی است اما مقداری یون نیز وجود دارد، بنابراین میدان مغناطیسی می‌تواند بر گاز نیرو وارد کند. میدان مغناطیسی که در کل کهکشان وجود دارد روی هم رفته حدود $۱۰^{-۴}$ مرتبه‌ی بزرگی میدان مغناطیسی روی زمین است اما می‌تواند مانند یک چشمه‌ی درونی عمل کند و جلوی انقباض گاز درون ابر را بگیرد.

عامل سوم چرخش است، هر چیزی درون کیهان تا حدودی می‌چرخد، وقتی ابر شروع به انقباض می‌کند برای ثابت نگه‌داشتن تکانه‌ی زاویه‌ای‌اش با سرعت بیشتر و بیشتری می‌چرخد دقیقاً مانند اسکی باز روی یخ که وقتی بازوهای خود را به درون جمع می‌کند سریع‌تر می‌چرخد. این چرخش می‌تواند به قدری سریع شود که جلوی انقباض بیشتر ابر را بگیرد. افزایش چرخش ابرهای در حال انقباض می‌تواند گاهی باعث تکه‌تکه شدن آن‌ها به دو ابر و بنابراین باعث تشکیل یک سیستم ستارگان دوتایی شود. در بعضی شرایط ممکن است ابر چندین بار تکه‌تکه شود و باعث تولید سیستم‌های چندتاییِ ستاره‌ای یا حتی خوشه‌های ستاره‌ای[1] شود [۶].

با در نظر گرفتن این سه عامل جلوگیری کننده به نظر عجیب می‌آید که هر ابر عظیم مولکولی می‌تواند شروع به تولید هسته‌های چگال که نهایتاً منجر به تشکیل ستاره می‌شود، کند. هم تئوری و هم مشاهده پیشنهاد می‌کند که یک موج شوک گونه‌ی[2] گذرا می‌تواند ابر را فشرده کند و فرآیند تشکیل ستاره را به جریان اندازد. در حین چنین اتفاقاتی قسمت‌های محدودی از این ابر بزرگ می‌توانند به حد چگالی‌های بالایی فشرده شوند که این عوامل جلوگیری کننده در مقابل گرانش، بی‌تأثیر باشند و شکل‌گیری ستاره شروع شود. حداقل چهار فرآیند می‌توانند موج شوک گونه‌ای را که تشکیل ستاره را به جریان می‌اندازد تولید کنند. (۱) انفجارات ابرنواختری[3] که می‌توانند موج شوک گونه‌ی قوی‌ای تولید کنند و به سرعت وارد فضای میان ستاره‌ای شوند. (۲) حرارت و جرقه‌های گرماییِ ستاره‌های گرم که می‌تواند گازهای اطراف آن‌ها را یونیزه کند و آن‌ها را دور کند تا موج شوک گونه‌ای تولید کنند و به سمت مواد میان ستاره‌ای چگال‌تر و سردتر هل داده شوند. (۳) برخورد ابرهای مولکولی، یک برخورد میان چنین ابرهایی می‌تواند قسمت‌هایی از این ابرها را فشرده کند و جریان تشکیل ستاره را به راه اندازد. (۴) راه مفید چهارم حالت مارپیچی بودن کهکشان راه شیری است، یک تئوری پیشنهاد می‌کند که بازوهای مارپیچی به‌صورت امواج شوک گونه‌ای هستند که اطراف کهکشان مانند عقربه‌های ساعت حرکت می‌کنند زمانی که یک ابر از میان بازوهای مارپیچی عبور می‌کند ابر می‌تواند متراکم شود و فرآیند تشکیل ستاره آغاز شود، مراحل ذکر شده در شکل (۲-۵) نشان داده شده است [۶].

---

[1]- *Star clusters*
[2]- *Shock wave*
[3]- *Supernova explosions*



شکل (۲-۵). یک موج شوک گونه‌ی گذرا (خط قرمز) می‌تواند ابر میان ستاره‌ای را فشرده و تکه‌تکه کند و باعث شود بعضی از قسمت‌های آن به چگالی‌هایی که برای شروع شکل‌گیری ستاره لازم است، برسند (شکل‌های پایینی). اتفاقاتی که در این شکل‌ها خلاصه شده است حدود ۶ میلیون سال طول می‌کشد [۶].

پس وقتی با توجه به توضیحات فوق یک هسته‌ی چگال یا گویچه درون یک ابر مولکولی شکل گرفت به دلیل اینکه ماده‌ی موجود در آن بیش از محیط اطراف است، میدان گرانشی قوی‌تری نسبت به اطراف خود دارد و به دلیل این زیادیِ گرانی مقداری از غبار و گاز موجود در سحابی را به‌طرف خود جذب می‌کند. با جذب گاز و غبار، جرم و گرانیِ آن افزوده می‌شود و این به نوبه‌ی خود امکان می‌دهد که گاز و غبار بیشتری از مناطق اطراف جذب کند. هر قدر این گویچه بزرگ‌تر می‌شود، بیشتر جذب می‌کند و هر قدر بیشتر جذب می‌کند، بزرگ‌تر می‌شود. یک هسته چگال کوچک از طریق این روند خود حرکتی که تجمع گرانشی[1] خوانده می‌شود می‌تواند به جسم نسبتاً بزرگی که چندین برابر جرم خورشید ماده‌ی ستاره‌ای دارد مبدل شود. ظن دانشمندان بر این است که این اجسام که گویچه نامیدیم مرحله‌ی بدوی ستارگان هستند. یافتن گویچه‌ها بسیار دشوار است. آن‌ها بسیار کوچک‌تر، تاریک‌تر و چگال‌تر از سحابی‌هایی هستند که از آن‌ها شکل گرفته‌اند. قطر کوچک‌ترین گویچه‌ها می‌تواند تقریباً صد برابر بزرگ‌تر از منظومه شمسی باشد. در گویچه‌ها به دلیل اینکه تریلیون‌ها تریلیون تن گاز از همه طرف به سمت داخل فشار وارد می‌کند، موجبات ناپایداری گویچه فراهم می‌شود، در نتیجه‌ی عدم تحمل وزن لایه‌های گاز که روی هم قرار دارند، فشرده شدن گویچه آغاز می‌شود و هیچ چیز برای نگه داشتن گازها وجود ندارد پس گویچه با سرعت نسبتاً زیادی منقبض می‌شود. در واقع گاز از همه سمت به طرف مرکز هجوم می‌آورد لیکن به زودی فشار و چگالی در مرکز گویچه بسیار زیاد می‌شود. انقباض هسته‌ی گویچه هنگامی متوقف می‌شود که فشار داخلی گاز برای تحمل وزن مواد روی آن کافی باشد، این نکته تعادل هیدروستاتیکی[2] نامیده می‌شود. محاسبات نشان می‌دهد که مرکز چنین جسمی می‌تواند حتی در حالی که لایه‌های خارجی هنوز با سرعت نسبتاً زیاد در حال سقوط به سمت داخل‌اند، به تعادل هیدروستاتیکی دست یابد. خلق یک هسته‌ی نسبتاً پایدار خبر از تولد یک پیش ستاره[3] می‌دهد. همزمان که ابر منقبض می‌شود با توجه به اینکه گاز و غبار موجود در ابر دارای مقداری چرخش هستند به دلیل پایستگی تکانه‌ی زاویه‌ای، چرخش ذرات موجود در آن بیشتر و بیشتر می‌شود تا اینکه نهایتاً یک ناحیه با چگالی بالا و در حال چرخش به صورت پیش ستاره در مرکز و یک ناحیه با چگالی پایین به صورت حلقه یا پوش چرخان در اطراف پیش ستاره تولید می‌شود [۶ و۷].

---

[1]- *Gravitational accretion*
[2]- *Hydrostatic equilibrium*
[3]- *Proto-star*