

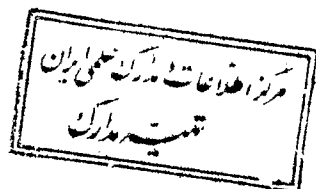
۱۳۷۸ / ۲ / ۳۰



دانشگاه فردوسی مشهد

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک

گرایش اختر فیزیک



عنوان:

ناپایداری گرمايي در محیط میان ستاره‌ها

استاد راهنما:

دکتر جمشید قنبری

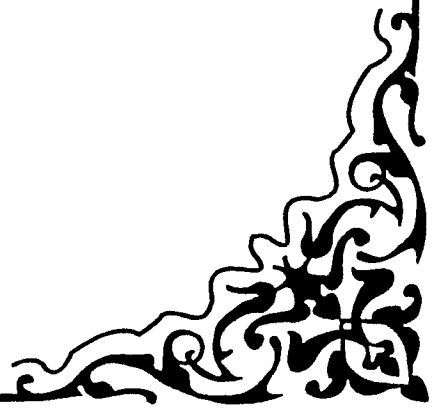
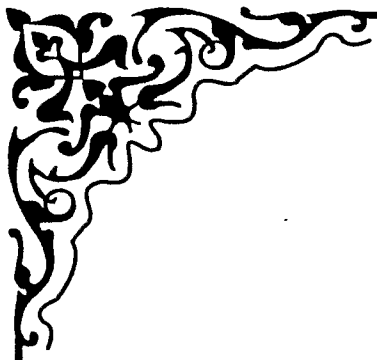
پژوهش و نگارش:

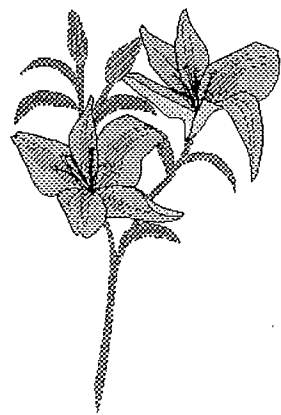
محسن شادمهری

تابستان ۱۳۷۶

2453/2

الحمد لله
الذي هدانا لهذا
الذي كنا لنهتدي لولا
أن هدانا الله





تشکر و قدردانی

به مصداق حدیث «من لم یشکر المخلوق لم یشکر

المخالق» لازم می‌دانم از زحمات بی‌دریغ استاد محترم

جناب آقای دکتر جمشید قنبری که در این پژوهش با

راهنمایی‌های خود مرا یاری نمودند تقدیر و سپاسگزاری

نمایم.



فهرست مطالب

فصل اول:

- مقدمه‌ای بر محیط‌های میان‌ستاره‌ای و ابرهای مولکولی ۱
- ۱-۱ آشنایی با محیط میان‌ستاره‌ای ۲
- ۲-۱ انواع ناپایداری‌ها؛ و ناپایداری گرمایی ۷

فصل دوم:

- بررسی جوابهای حالت مانا ۱۶
- ۱-۲ جوابهای حالت مانا در یک بعد ۱۷
- ۲-۲ جوابهای حالت مانا در ابعاد بالاتر ۲۶
- ۳-۲ جوابهای حالت مانا در ابرهای مولکولی ۳۱

فصل سوم:

- ناپایداری گرمایی در برخی حالت‌های ساده ۴۰
- ۱-۲ ناپایداری گرمایی وقتی رسانش کم است ۴۲
- ۲-۲ نقش عوامل گرمایش - سرمایش وابسته به زمان یا مکان ۴۶
- ۳-۲ ناپایداری گرمایی وقتی تابع سرد شونده خطی است ۵۰

فصل چهارم:

- امواج گرمایی ۵۲
- ۱-۴ امواج گرمایی وقتی ضریب رسانش گرمایی متناسب با دما است ۵۳
- ۲-۴ امواج گرمایی در سرعت‌های زیاد و کم ۵۶
- ۳-۴ امواج رونده گرمایی در حالت کلی ۵۹

فصل پنجم:

- نتیجه‌گیری ۶۲
- مراجع

ضمیمه:

- شکله‌ها و نمودارها ۷۶

فصل اول

مقدمه‌ای بر محیط‌های میان ستاره‌ای

و

ابرهای مولکولی

۱-۱ آشنایی با محیط میان ستاره‌ای

پیش از آن که وارد بحث اصلی شویم لازم است به اختصار ویژگی‌های محیط‌های میان ستاره‌ای و ابرهای مولکولی را بررسی کنیم. بر این اساس، بهتر روشن می‌شود که چه مسأله‌ای را می‌خواهیم حل کنیم. برای آن که مطالب ارائه شده در این فصل - و فصل‌های بعد - مستند باشند، مراجع را به دقت آورده‌ایم. در حقیقت محیط میان ستاره‌ای (ISM مخفف *the InterStellar Medium*) بستر شکل‌گیری ستاره‌ها و سیارات است؛ و در مقیاس بزرگتر محیط میان کهکشانی وجود دارد که از آن کهکشانی‌ها به وجود می‌آیند (و می‌آیند؟). از زمانی که اخترشناسان به حضور محیط میان ستاره‌ای پی بردند ۶۰ سال می‌گذرد [۱].

برای شناخت این محیط‌ها تا پیش از دهه ۱۹۷۰ میلادی، کار نظری چندانی انجام نشد. این موضوع بویژه ناشی از فقدان داده‌های رصدی بود. اما امروزه باسپیل عظیم اطلاعات رصدی در این زمینه مواجه هستیم. دریافته‌ایم که این محیط‌ها دارای ساختارها و ویژگی‌های جالب و شگفت‌انگیزند. بعلاوه انواع مختلف پدیده‌های فیزیکی در آنها رخ می‌دهد. بدین ترتیب تصویری که امروزه از محیط‌های میان ستاره‌ای داریم نسبتاً پیچیده است. این پیچیدگی عمدتاً ناشی از فرایندهای مختلفی است که به طور همزمان در این محیط‌ها رخ می‌دهند. در نتیجه، بیشتر این محیط‌ها دارای ساختارهایی آشوبی هستند که متاثر از جبهه‌های ضربه‌ای، تلاطم،

نیروهای گرانشی و الکترومغناطیسی و ... هستند.

مشاهدات نشان می‌دهد که بیشتر جرم محیط‌های میان ستاره‌ای به صورت ابرهای غولی هستند که جرم آنها بین 10^5 تا 10^7 جرم خورشیدی است. اغلب در این ابرها یک یا چند خوشه ستاره‌ای و اجتماع‌های OB شکل می‌گیرند. (برای یک بحث مروری مرجع‌های ۲ و ۳ را ببینید). البته این ابرها بیشتر در بازوهای مارپیچی کهکشان یافت می‌شوند [۴] و تا یک کیلوپارسک داخل هاله‌ی کهکشانی گسترش دارند. مثلاً شکل ۱-۱ خوشه‌های ستاره‌ای، ابرهای HI ، و ابرهای CO را در بازوی مارپیچی $M31$ نشان می‌دهد [۵].

در سایر کهکشانها نیز چنین مشاهداتی انجام شده است، و در برخی موارد کل محیط میان ستاره‌ای مورد نظر، کاملاً مولکولی است. بعلاوه بین مکان ابرهای مولکولی چگال و امواج ضربه‌ای از یک سو، و از سوی دیگر بازوهای مارپیچی ارتباطی مشاهده شده است [۶].

همان‌طور که گفتیم ابرهای CO و HI غول در بازوهای مارپیچی کهکشانها - از جمله راه کاشکشان - یافت می‌شوند. مطالعه نحوه توزیع فضایی آنها، اطلاعات با ارزشی درباره ساختار کهکشان، در اختیار اخترشناسان قرار می‌دهد. (برای مثال مرجع ۷ را ببینید). این ابرهای HI غول، بزرگترین ابرهای راه کاشکشان محسوب می‌شوند. جرم هر یک از آنها تقریباً 10^7 جرم خورشیدی است؛ و با چگالی 10 ذره

بر سانتی متر مکعب، شعاع برخی از آنها به ۱۰۰ پارسک می‌رسد. مهمترین ویژگی بزرگترین ابرهای HI و CO این است که در ناحیه‌های بین بازوها قرار ندارند. این بدان معناست که آنها داخل بازوها شکل می‌گیرند، و بعد پراکنده می‌شوند. هنوز بدرستی علت این موضوع روشن نیست.

حال ببینیم در گازهای میان ستاره‌ای سرد چه ساختاری وجود دارد. در قسمت‌های با چگالی بالا اغلب آنها، توده‌ها و رشته‌ها به چشم می‌خورند؛ حال آن که در ناحیه‌های کم چگال، حفره‌ها و تونلهایی حضور دارند. حتی در مقیاسهای کهکشانی نیز چنین ساختاری مشهود است. بنابراین، علاوه بر ابرهای غول بازوهای مارپیچی - که درباره آنها بحث کردیم - حفره‌های غول نیز وجود دارند. مدتهاست که چنین محیط‌هایی در ابر ماژلانی بزرگ [۸] و کهکشان خودمان [۹] مطالعه می‌شوند. البته در سایر کهکشانها نیز این حفره‌های غول مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

مثلاً قطر متوسط حفره‌ای در کهکشان M۳۱ حدود ۲۰۰ پارسک است که معادل جرم گمشده‌ای به اندازه $۱۰^۵$ جرم خورشیدی است؛ انرژی لازم برای ایجاد چنین حفره‌ای $۱۰^{۵۰}$ ارگ تخمین زده می‌شود [۱۰]. ابعاد و انرژی‌های بیشتر حفره‌ها و پوسته‌های راه کاهکشان، و سایر کهکشانهای مشابه با نحوه شکل‌گیری آنها در اطراف اجتماعهای OB سازگار است [۱۱]. به نظر می‌رسد بزرگترین

حفره‌ها نتیجه برخورد بین ابرهای با سرعت بالا و صفحه کهکشانی باشند [۱۲]. اخیراً در $M101$ نیز پوسته‌های نسبتاً بزرگی کشف شده است [۱۳]. قطر برخی از این پوسته‌ها به $1/5$ کیلوپارسک می‌رسد که با سرعت 50 کیلومتر بر ثانیه در حال انبساط‌اند. هنوز برای توجیه چنین ناحیه‌هایی، کار نظری چندانی انجام نشده است. بویژه نحوه شکل‌گیری و دنیا میک این پوسته‌های بزرگ، بدرستی مشخص نیست.

حفره‌ها و پوسته‌های موجود در ابرهای ماژلانی بزرگ و کوچک، بیشتر بررسی و مطالعه شده‌اند: مثلاً شکل ۲-۱ وضعیت اطراف ابر نواختر $A 1987$ را در ابر ماژلانی بزرگ نشان می‌دهد [۱۴]. برخی از اخترشناسان معتقدند انبساط کاواک اطراف ابر نواختر $A 1987$ باعث شکل‌گیری ستاره‌ها و به وجود آمدن رشته‌هاست. جالب این جاست که چنین ساختارهایی فراوان وجود دارند. مثلاً خورشید نیز در داخل کاواکی قرار دارد، و خود این کاواک در احاطه محیطی داغ‌تر است [۱۵]. بحث درباره خاستگاه چنین ساختارهایی همچنان ادامه دارد. در بخش ۲-۱ باز هم به این موضوع اشاره خواهیم کرد.

حال برای آشنایی بیشتر با محیط میان ستاره‌ای، بهتر است به ساختار سلسله مراتبی (*Hierarchical Structure*) آن پردازیم. محیط میان ستاره‌ای دارای ساختارهایی سلسله مراتبی است با اندازه‌هایی بین $0/1$ تا 1000 پارسک! این

موضوع بویژه در نقشه‌هایی که باتوان تفکیک بالا تهیه شده‌اند، بوضوح مشهود است. در مقیاسهای کوچک، ساختارها خود - مشابه و فراکتالی هستند؛ ولی در مقیاسهای بزرگ به علت تأثیرات دینامیکی کهکشان این‌طور نیست. بنابراین، حفره‌ها و ابرهای بزرگی که به آنها اشاره کردیم با حفره‌ها و توده‌های موجود در ابرهای کوچک فرق دارند. به بیان دیگر برای مطالعه این ناحیه‌ها نمی‌توان روش یکسانی را در پیش گرفت.

برای مرور کارهایی که تا بحال در زمینه ساختار سلسله مراتبی محیط میان ستاره‌ای انجام شده است، می‌توانید به مرجعهای ۱۶ و ۱۷ مراجعه کنید. ساختار سلسله مراتبی بدین معناست که در ابرها، توده‌هایی وجود دارد؛ و خود این توده‌ها نیز توده‌های کوچکتری دارند و همین‌طور، تا آخر! البته به دلیل مشکلات رصدی هنوز اطلاعات دقیقی درباره مراحل سلسله مراتب در دست نیست. یکی از کارهایی که بسیار ضروری است، کسب اطلاعات دقیق‌تر رصدی در این زمینه است.

یکی از عواملی که یقیناً در شکل‌گیری ساختار فراکتالی محیط میان ستاره‌ای نقش بسزایی دارد، تلاطم است. امروزه، برخی از اخترشناسان امیدوارند بر این اساس بتوانند ساختار فراکتالی *ISM* را توجیه کنند [۱۷]. در واقع ساختار سلسله مراتبی و فراکتالی محیط میان ستاره‌ای ناشی از فرایندهای غیر خطی است. این فرآیندها می‌تواند تلاطم، ناپایداری گرانشی، ناپایداری گرمایی و برخورد بین ابرها

باشد. ما در بین همه این عوامل فقط ناپایداری گرمایی را مطالعه می‌کنیم. (آن هم در حالت‌هایی ساده!) ذکر این نکته ضروری است که در ساختار محیط میان ستاره‌ای، عامل مهم میدان مغناطیسی نیز نقش بسزایی دارد.

درباره هر یک از عوامل مؤثر در ساختار محیط میان ستاره‌ای، هر سال، دهها مقاله نوشته می‌شود. همان‌طور که گفتیم تلاش ما بررسی نقش ناپایداری گرمایی است. البته چون معادلات حاکم بر سیستم غیر خطی‌اند، به دست آوردن جواب تحلیلی برای این معادلات در حالت کلی، تقریباً غیر ممکن است. از این رو تلاش کردیم در حالت‌هایی ساده، معادلات را حل کنیم؛ تا به دیدگاهی هر چند کلی از نقش ناپایداری گرمایی دست یابیم. در بخش ۱-۲ انواع مختلف ناپایداری را در محدوده خطی مرور می‌کنیم. و ضمن مرور کارهای انجام شده در زمینه ناپایداری گرمایی، فرمول‌بندی مسأله را ارائه می‌کنیم.

۱-۲ انواع ناپایداری‌ها؛ ناپایداری گرمایی

در بین انواع ناپایداری‌ها، دو نوع ناپایداری از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند: ناپایداری گرمایی و ناپایداری گرانشی. ناپایداری گرمایی در فشار تقریباً ثابت عمل می‌کند و در نهایت، ابری چگال و سرد در احاطه محیطی داغ قرار می‌گیرد (۱۸). ناپایداری گرانشی وقتی گرادیان فشار نتواند در برابر اختلال گرانشی مقاومت کند،

به وجود می‌آید. به دنبال ناپایداری گرانشی، ابری چگال با فشار درونی بالا شکل می‌گیرد، و این ابر وارد مرحلهٔ رمبش می‌شود.

نخستین بار در سال ۱۹۶۵ ناپایداری گرمایی در محدودهٔ خطی بررسی شد [۱۹]. در این بررسی گرمایش و سرمایش مناسب برای گاز در نظر گرفته می‌شود و فرض بر این است که فشار ثابت است. بنابراین نتیجهٔ به دست آمده را نمی‌توان برای گازهای ابر صوتی (*Supersonic*) به کار برد؛ و همان‌طور که می‌دانیم محیط میان ستاره‌ای در مقیاس بزرگ، شدیداً متلاطم است.

با این حال، چنین مطالعه‌ایی دیدگاهی کلی به دست می‌دهد. اگر آهنگ گرمایش به چگالی بستگی نداشته باشد ولی در عوض آهنگ سرمایش شدیداً به چگالی بستگی داشته باشد، آنگاه محیط از نظر گرمایی ناپایدار خواهد بود؛ و ابرهایی سرد و چگال در محیط شکل می‌گیرند [۱۹].

طی مدتی که ناپایداری گرمایی رشد می‌کند، این ناحیه‌های چگال، بدون این که برای رسیدن به تعادل، گرما دریافت کنند، همچنان سرد می‌شوند. در محیط‌های متلاطم نیز با کمی تغییرات چنین وضعیتی مشاهده می‌شود [۲۰]. در این جا ناپایداری گرمایی را در محدودهٔ خطی مرور می‌کنیم. روش کار به این صورت است که اختلالی کوچک نسبت به وضعیت تعادلی سیستم وارد می‌کنیم؛ و بعد رفتار سیستم را مطالعه می‌کنیم.

معادله‌های حرکت، پیوستگی، و انرژی، معادلات حاکم بر سیستم هستند؛ که

همراه با معادله حالت گاز، رفتار سیستم را مشخص می‌کنند. داریم [۱۸ یا ۱۹]

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\vec{\nabla} P, \quad (1)$$

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \vec{\nabla} \cdot \vec{v}, \quad (2)$$

$$\frac{DU}{Dt} = -U \vec{\nabla} \cdot \vec{v} - P \vec{\nabla} \cdot \vec{v} + \Gamma - \Lambda = -\gamma U \vec{\nabla} \cdot \vec{v} + \Gamma - \Lambda. \quad (3)$$

معادله‌های (۱)، (۲) و (۳) به ترتیب معادله‌های حرکت، پیوستگی و انرژی

هستند. همچنین $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla}$ ؛ ضمناً U چگالی انرژی درونی، $U = \frac{P}{\gamma - 1}$ ، و γ

نسبت ظرفیت گرمایی‌های ویژه است. Γ و Λ نیز به ترتیب گرمایش و سرمایش را

مشخص می‌کنند. علاوه بر معادله‌های بالا، معادله حالت سیستم را نیز داریم

$$P = \rho c^2. \quad (4)$$

در ساده‌ترین وضعیت تعادلی، سرعت برابر صفر است. حال چنانچه به

سیستم اختلالی وارد کنیم، و پس از مدتی این اختلال از بین رود، می‌گوئیم سیستم

پایدار است؛ اما اگر بر عکس، اختلال همچنان با گذشت زمان رشد کند، سیستم

ناپایدار است. حال فرض می‌کنیم

$$\rho = \rho_0 + \rho_1, \quad (5)$$

$$P = P_0 + P_1, \quad (6)$$

$$C = C_0 + C_1, \quad (7)$$

که متغیرهای با اندیس ۰، وضعیت تعادلی؛ و متغیرهای با اندیس ۱، اختلال را مشخص می‌کنند. فرض بر این است که اختلال بسیار کوچک است. با این فرض معادله‌های (۱)، (۲)، (۳) و (۴) می‌شوند /۱۹/

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\vec{\nabla} P_1, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} = -\rho_0 \vec{\nabla} \cdot \vec{v}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial P_1}{\partial t} = \gamma c_0^2 \frac{\partial \rho_1}{\partial t} + (\gamma - 1)(T_1 - \Lambda_1), \quad (10)$$

$$P_1 = \rho_1 c_0^2 + 2\rho_0 c_0 c_1. \quad (11)$$

در این معادلات چهار مجهول ρ_1 ، P_1 ، c_1 و \vec{v} وجود دارند. همان‌طور که دیده می‌شود معادلات خطی هستند و ضرایب نیز ثابت هستند (هم از نظر فضایی و هم از نظر زمانی). بنابراین، این معادلات دارای جوابهای نمایی هستند. در واقع هر نوع اختلال اولیه بر حسب امواج خطی، یعنی به شکل $e^{i\vec{k} \cdot \vec{r}}$ ، قابل بسط است. بنابراین می‌توان $e^{i\vec{k} \cdot \vec{r} + \omega t}$ را به عنوان جواب عمومی معادلات در نظر گرفت. پس از این جایگزینی، معادله‌های (۸) و (۹) به دست می‌دهند

$$\omega^2 = -k^2 \frac{P_1}{\rho_1}. \quad (12)$$

k را شرایط اولیه، و $\frac{P_1}{\rho_1}$ را معادله انرژی مشخص می‌کند. بر اساس رابطه یاشندگی (معادله ۱۲) می‌توان درباره پایداری محیط بحث کرد. اگر $\frac{P_1}{\rho_1}$ منفی باشد، یکی از ω ها، حقیقی و مثبت است؛ و این متناظر با ناپایداری است: همه کمیتها به

صورت نمایی افزایش می‌یابند.

همان‌طور که دیده می‌شود طبق معادله (۱۲)، هر چه اختلال کوچکتر باشد (k بزرگ)، ω بزرگتر خواهد بود، یعنی آهنگ رشد سریع‌تر است. بنابراین به نظر می‌رسد ناپایداری گرمایی در شکل‌گیری ساختارهای کوچک (ابره‌های کوچک) مؤثر است. بنابراین خاستگاه ابره‌های بزرگ محیط میان ستاره‌ای، نمی‌تواند ناپایداری گرمایی باشد. در واقع ناپایداری گرمایی مسؤل شکل‌گیری ساختارهای کوچک ابره‌های بزرگ است [۲۱، ۲۲].

برای محاسبه $\frac{P_1}{\rho_1}$ از معادله انرژی، باید Γ ، Λ مشخص باشند. در این جا برای

سادگی فرض می‌کنیم [۲۰]

$$\Gamma = \Lambda_0 \left(\frac{P}{\rho_0}\right)^r \left(\frac{c}{c_0}\right)^s, \quad (13)$$

$$\Lambda = \Lambda_0 \left(\frac{P}{\rho_0}\right)^l \left(\frac{c}{c_0}\right)^m, \quad (14)$$

که در تعادل $\Gamma = \Lambda = \Lambda_0$ و l ، s ، r و m اعداد ثابتی هستند. البته گرمایش و

سرمایش می‌توانند شکل‌های پیچیده‌تری نیز داشته باشند؛ در مرجع ۲۳ به تفصیل

در این زمینه بحث شده است. پس از کمی محاسبات داریم

$$\Gamma_1 - \Lambda_1 = \Lambda_0 \left[(r-l) \frac{\rho_1}{\rho_0} + (s-m) \frac{c_1}{c_0} \right], \quad (15)$$

$$\frac{P_1}{\rho_1} = \gamma_{eff} c_0^2 = c_0^2 \left(\frac{\gamma \omega - \omega_c (l-r - [m-s]/r)}{\omega + \omega_c^{(m-s)/r}} \right), \quad (16)$$

که $\omega_c = (\gamma - 1) \frac{\Lambda_0}{P_0}$. حال می‌توان به‌طور دقیق‌تر درباره ناپایداری گرمایی