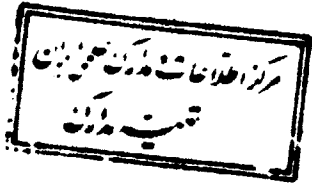


بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

۲۵۶۳۹

۲ / ۲۶۶۳

۱۳۷۸ / ۲ / ۳۰



دانشگاه فردوسی مشهد  
دانشکده علوم (بخش فیزیک)

موضوع:

بررسی تأثیر عوامل سردشوندگی  
در دینامیک سحابی‌های سیاره‌ای

به راهنمایی:

استاد ارجمند جناب آقای دکتر جمشید قنبری

نگارش:

محمد رضا عباسیان

زمستان ۱۳۷۳

تایپ و حروفچینی لیزی چاپاک (مشهد)

۲۵۹۳۹

**تقديم به**

**همسر فداکار و فرزندان صبورم  
که بخاطر موفقیتم در امر تحصیل  
سختیهای زیادی را تحمل کردند.**

## بسم الله الرحمن الرحيم

نخست به درگاه پاک پروردگار مهربان سپاس می‌گزارم و به روان مقدس پیامبر  
عظیم الشان اسلام، محمد مصطفی(ص) و دوازده خورشید تابناک هدایت سلام و  
درود می‌فرستم. هر چند بیانم قاصر است و واژگان نارسا؛ چنانکه سعدی می‌فرماید:

از دست و زبان که برآید      کز عهده شکرش به درآید

دانش هدیه‌ای آسمانی است که خدای حکیم آن را به بندگان خویش ارزانی داشت  
و هر کس با توجه به بضاعت خود توشه‌ای برگرفت. هنگامی که آدمی در پهنای  
بیکرانه دانش گام برمی‌دارد و در ژرفای شگفت انگیز آن می‌کاود، عظمت و ابهت  
فرزنده کاخ هستی و فروزنده مشعل ستارگان، بیش از پیش برایش رخ می‌نماید.

خدای را شکر می‌کنم که به این حقیر توفیق عنایت فرمود تا خوشه چین خرمن  
دانش استادان گرانمایه‌ای باشم که به حق خود را وقف برافروختن هر چه با  
شکوه‌تر مشعل دانش در این مرز و بوم نموده‌اند و در این راه از هیچ کوشش و بذل  
مساعی دریغ نمی‌ورزند، باشد که خدای تبارک و تعالی به همه آنها توفیق روز  
افزون و طول عمر عنایت فرماید.

در پایان بخصوص از توجهات و عنایات بی‌شائبه استاد گرام جناب آقای  
دکتر جمشید قنبری استاد راهنما قدردانی و تشکر می‌کنم و یادآور می‌شوم که  
اگر راهنمایی‌های به موقع و دلسوزی آن استاد فرزانه شامل حال اینجانب نمی‌شد  
به انجام رساندن این پروژه برایم امکان‌پذیر نمی‌گردید. همچنین از  
جناب آقای دکتر تقی عدالتی استاد مشاور و جناب آقای دکتر عجب شیرزاده  
استاد مدعو و ممتحن که قبول زحمت فرموده‌اند تشکر و سپاسگزاری می‌کنم و برای  
همگی از درگاه ایزدمنان، سلامتی و طول عمر با عزت مسئلت می‌نمایم.

## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

### فصل اول: مروری بر تحول ستارگان پس از ترک رشته اصلی

- ۱-۱ - مقدمه ۲
- ۲-۱ - تحولات روی شاخه مجانبی غولها و تأثیر از دست دادن جرم ۳
- ۳-۱ - بادهای ستاره‌ای ۶
- ۴-۱ - اثر بادهای ستاره‌ای در تشکیل نواحی مختلف اطراف ستاره مرکزی ۷
- سحابی سیاره‌ای ۷
- ۵-۱ - تحولات ستاره مرکزی ۹
- ۶-۱ - محاسبه آهنگ فوتونهای یونیده کننده حاصل از ستاره مرکزی ۱۵

### فصل دوم: دینامیک سحابیهای سیاره‌ای

- ۱-۲ - مقدمه ۱۹
- ۲-۲ - توزیع فضایی و سینماتیک سحابیهای سیاره‌ای ۲۰
- ۳-۲ - شکل‌شناسی سحابیهای سیاره‌ای ۲۴
- ۴-۲ - الگوهایی که در بررسی سحابیهای سیاره‌ای بکار می‌روند ۲۶
- ۵-۲ - دینامیک پوسته در یک الگوی دو بعدی ( $\theta$  و  $r$ ) ۲۷
- ۶-۲ - حل مسئله ۳۱
- ۷-۲ - نتایج ۳۳
- ۸-۲ - تعیین ضخامت پوسته ۳۶

**فصل سوم: میدان تابشی**

۴۸	۱-۳ - مقدمه
۴۸	۲-۳ - فراوانی عناصر
۵۲	۳-۳ - میدان تابشی
۵۳	۱-۳-۳ - تابش حاصل از ستاره مرکزی یا تابش فرودی
۵۴	۲-۳-۳ - تابش پراکنده
۵۵	۴-۳ - شار تابشی و آهنگ یونیدگی

**فصل چهارم: یونیده شدن پوسته سحابی**

۵۸	۱-۴ - مقدمه
۵۹	۲-۴ - فوتویونیزاسیون ابر ئیدروژنی خالص
۶۳	۳-۴ - فوتویونیزاسیون سحابیهایی که شامل ئیدروژن و هلیوم باشند
۶۶	۴-۴ - فوتویونیزاسیون عناصر سنگین
۶۸	۵-۴ - باز ترکیب یونها با الکترونها

**فصل پنجم: عوامل مؤثر در گرم شدن و سرد شدن پوسته سحابی**

۷۲	۱-۵ - مقدمه
۷۳	۲-۵ - انرژی ورودی در اثر فوتویونیزاسیون ئیدروژن و هلیوم
۷۵	۳-۵ - انرژی خروجی در اثر باز ترکیب ئیدروژن و هلیوم با الکترونها
۷۷	۴-۵ - انرژی خروجی در اثر گذار آزاد - آزاد
۷۸	۵-۵ - انرژی خروجی در اثر نشر حاصل از برانگیختگی برخوردی

## فصل ششم: تأثیر عوامل سردشوندگی در دینامیک سحابی های سیاره‌ای

۸۴	۱-۶ - مقدمه
۸۴	۲-۶ - انرژی کل سرد شوندگی
۸۹	۳-۶ - معادله حرکت پوسته با احتساب انرژی کل سرد شوندگی
۹۰	۴-۶ - حل مسئله
۹۳	۵-۶ - نتایج
۹۷	۶-۶ - ناپایداری ریلی - تیلور
۹۸	۷-۶ - اثر زمان انتقال ( $\tau$ ) بزرگ
۱۰۱	۸-۶ - بحث و نتیجه‌گیری کلی
۱۰۹	ضمیمه
۱۲۲	فهرست مراجع

## چکیده

محاسبات دینامیک سحابیهای سیاره‌ای را به دو صورت می‌توان انجام داد. ۱- با در نظر گرفتن یک تابع چگالی معین برای ابر باد و فرض برقرار بودن تعادل گرمایی در پوسته سحابی ۲- با استفاده از الگوی چگالی مورد نظر و احتساب انرژی سرد شوندرگی در دینامیک پوسته سحابی.

در این رساله به پیروی از قنبری (۱۹۸۹) ابتدا با انتخاب یک الگوی دوبعدی ( $r$  و  $\theta$ ) برای چگالی مواد ابر باد و فرض تعادل گرمایی در پوسته سحابی و اعمال چند پارامتر مؤثر در توزیع مواد ابر باد و انرژی مکانیکی باد سریع، ساختار دینامیکی سحابی سیاره‌ای را محاسبه نموده‌ایم. سپس به مطالعه عوامل مؤثر در گرم شدن و سرد شدن پوسته سحابی پرداخته و معادله حرکت پوسته را با احتساب انرژی سرد شوندرگی در پله‌های زمانی مختلف حل کرده‌ایم، تا تأثیر انرژی سرد شوندرگی در دینامیک پوسته در مراحل مختلف تحول سحابی مشخص شود.



## فصل اول

### مروری بر تحول ستارگان پس از ترک رشته اصلی

#### ۱-۱- مقدمه

پس از شکل‌گیری یک ستاره، مشخصه‌های مهمی که موقعیت آن را روی رشته اصلی در نمودار هرتسپرونگ - راسل تعیین می‌کنند؛ تابندگی، دمای سطحی و جرم ستاره است. ستارگانی که جرم بیشتر دارند (تابندگی بیشتر) دارای زمان تحول کوتاه‌تر می‌باشند و برعکس ستارگانی که جرم کمتر دارند، زمان تحول طولانی‌تری دارا می‌باشند. هنگامی که ستاره به انتهای مرحله، ئیدروژن سوزی اولیه روی رشته اصلی می‌رسد، از رشته اصلی جدا شده و در اثر انقباض گرانشی و آزاد شدن انرژی پتانسیل گرانشی، لایه‌های خارجی آن به بیرون رانده می‌شود و هسته ستاره منقبض می‌گردد و در نهایت به شعاعی حدود  $100R_{\odot}$  می‌رسد. در این حالت ستاره‌ای داریم با شعاع بزرگ و دمای سطحی کم که آن را اصطلاحاً غول قرمز می‌نامند. مسیر تحول و سرنوشت نهایی ستاره بستگی شدیدی به جرم آن دارد. برای ستارگانی با جرم  $M < 4M_{\odot}$  می‌توان سه مرحله تحولی زیر را در نظر گرفت (کاهن و بریتشورت ۱۹۹۰).

۱- پس از ترک رشته اصلی با تشکیل هسته C-O و پوسته‌های هلیوم و ئیدروژن در اطراف آن، ستاره روی شاخه مجانبی غولها (A.G.B) شروع به حرکت می‌کند و

با آهنگ حدود  $10^{-6} M_{\odot}/yr$  و سرعت نهایی  $10 Km/s$  جرم از دست می‌دهد.

۲- پس از رسیدن به قله (A.G.B) فازی بنام اَبَر باد (S.W) شروع می‌شود که ممکن است چند هزار سال طول بکشد. در طی این مرحله ستاره با آهنگ حدود  $10^{-5} M_{\odot}/yr$  سرعت  $10 Km/s$  جرم از دست می‌دهد.

۳- پس از پایان اَبَر باد، باد ستاره‌ای دیگری بنام باد سریع (F.W) شروع می‌شود که سبب کاهش جرم با آهنگ حدود  $10^{-7}-10^{-8} M_{\odot}/yr$  می‌گردد. سرعت نهایی این باد در حدود  $2000-4000 Km/s$  است.

در این فصل ابتدا بطور مختصر تحولات ستاره و اثر از دست دادن جرم را در شاخهٔ مجانبی غولها (A.G.B) و سپس تحولات بعد از (A.G.B) را مورد توجه قرار می‌دهیم. دمای سطحی و تابندگی ستاره در طی این مراحل دچار تغییراتی می‌شوند که در این رساله از نتایج الگوهای تحولی شون برنر<sup>۱</sup> (۱۹۸۱) استفاده می‌کنیم. در محاسبهٔ آهنگ فوتونهای یونیده کننده حاصل از ستارهٔ مرکزی سحابی سیاره‌ای نیز الگوی جسم سیاه را بکار می‌بریم.

### ۱-۲- تحولات ستاره در شاخهٔ مجانبی غولها (A.G.B) و تأثیر از دست دادن جرم

اکنون پدیده خروج جرم از سطح غول قرمز با آهنگ بیش از  $10^{-5} M_{\odot}/yr$  یک حقیقت کاملاً شناخته شده است. ریمر<sup>۲</sup> (۱۹۷۵) یک قانون تجربی پیدا کرد که آهنگ از دست دادن جرم غول قرمز را براساس تابندگی، شعاع و شدت میدان گرانش

---

1. schönberner

2. Reimers

ستاره می‌داد. پکسی - فوسی<sup>۱</sup> (۱۹۷۵) نیز یک فرمول نیمه تجربی بر مبنای زمینه نظری بدست آوردند. بعضی از محققین مانند گین‌گلد<sup>۲</sup> (۱۹۷۴-۱۹۷۵) و رُز<sup>۳</sup> (۱۹۷۰) و سوی گارت<sup>۴</sup> (۱۹۷۱) هم محاسبات تحول ستاره روی شاخهٔ جانبی غولها را بدون در نظر گرفتن از دست دادن جرم انجام داده‌اند.

در اینجا وضعیت تحول ستاره را بوسیلهٔ پارامتر بدون بُعد  $q = \frac{\dot{M}_c}{M}$  جرم هسته یا جرم داخل پوستهٔ اصلی و  $M$  جرم کل) توضیح می‌دهیم. در طول تحولات ستاره در امتداد مسیر هایاشی، جرم هسته بطور یکنواخت افزایش می‌یابد. در انتهای مسیر تحول که ستاره به کوتولهٔ سفید تبدیل می‌شود  $q \rightarrow 1$  که این بدان معنی است که جرم لایه‌های خارجی از هستهٔ مرکزی از دست می‌روند و جرم کوتوله برابر جرم هسته می‌شود. یک مقیاس زمانی  $\tau$  بصورت  $\tau = \frac{q}{\dot{q}}$  تعریف می‌کنیم که اگر جرم کل ثابت بماند برابر  $\frac{\dot{M}_c}{M_c}$  می‌شود. از طرف دیگر با احتساب کاهش جرم می‌توان نوشت:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{\dot{M}_c}{M_c} - \frac{\dot{M}}{M} \quad (\dot{M} < 0) \quad (1-1)$$

اولین جمله رشد هسته را براساس مصرف سوخت در یک منبع پوسته‌ای نشان می‌دهد و دومین جمله نشان دهندهٔ تغییر جرم کل با زمان است. براساس کار ریمر (۱۹۷۵)  $\dot{M}$  را از معادلهٔ زیر می‌توان محاسبه کرد:

$$\begin{aligned} \dot{M} &= -4 \times 10^{-3} \frac{L}{L_\odot} (g/g_\odot)^{-1} (R/R_\odot)^{-1} \\ &= -1.3 \times 10^{-5} \left(\frac{L}{L_\odot}\right)^{1.5} (M/M_\odot)^{-1} T_{\text{eff}}^{-2} \quad [M_\odot/\text{yr}] \quad (2-1) \end{aligned}$$

$$\dot{M} = -3.2 \times 10^{-3} \left(\frac{L}{L_\odot}\right)^{1.66} \quad [M_\odot/\text{yr}] \quad (3-1) \quad \text{یا:}$$

1. Pecci - Fusi

2. Gingold

3. Rose

4. Sweigart

مادام که تحول در امتداد مسیر هایاشی اتفاق افتد ( $T_{\text{eff}} = 10^{3.8} \left(\frac{L}{L_{\odot}}\right)^{-0.02}$ ) و

از طرف دیگر از آهنگ ئیدروژن سوزی می توان نوشت (شون برنر ۱۹۷۸):

$$\dot{M}_c = 1.5 \times 10^{-11} \frac{L}{L_{\odot}} \quad [M_{\odot}/\text{yr}] \quad (4-1)$$

بنابراین در تابندگی های بالا جمله دوم سمت راست معادله (۱-۱) اهمیت بیشتری

دارد و مقیاس زمانی تحول کاهش می یابد. برای مثال در  $L \approx 10^3 L_{\odot}$  مقادیر مساوی

برای  $\frac{\dot{M}}{M}$  و  $\frac{\dot{M}_c}{M_c}$  بدست می آید. (با فرض  $M \approx 1M_{\odot}$  و  $M_c \approx 0.5M_{\odot}$ ) آهنگ کاهش

جرم  $\dot{M} \approx 3 \times 10^{-8} M_{\odot}/\text{yr}$  نتیجه می شود.

در  $L = 10^4 L_{\odot}$  داریم:

$$\frac{\dot{M}_c}{M_c} \approx 2 \times 10^{-2} \quad \text{yr}^{-1} \quad \text{و}$$

$$\frac{\dot{M}}{M} \approx 2 \times 10^{-6} \quad \text{yr}^{-1}$$

با توجه به کاهش جرم مقیاس زمانی  $\tau$  با سازه 10 کاهش می یابد.

پیامدهای از دست دادن جرم را می توان بصورت زیر خلاصه کرد:

۱- کاهش جرم کل، جرم نهایی هسته را کاهش می دهد، بنابراین تابندگی قابل

دسترسی را کم می کند.

۲- در تابندگی بالا آهنگ تحول با آهنگ از دست دادن جرم معین می شود، نه با

رشد هسته.

۳- مادام که جرم پوش خیلی کوچک نیست ( $q < 0.9$ ) بعلت اینکه تابندگی و شعاع

بطور عمده به  $M_c$  بستگی دارد (نه به  $M$ ) مسیر تحول تحت تأثیر قرار نمی گیرد.

۴- اگر جرم پوش کوچک باشد ( $q \approx 1$ ) شعاع و بنابراین دمای مؤثر تابع حساسی

از  $q$  می باشند و تحول در خارج مسیر هایاشی با مقیاس زمانی که براساس آهنگ از

دست دادن جرم کوتاه شده است، انجام می گیرد.

### ۱-۳- بادهای ستاره‌ای

نظریه بادهای ستاره‌ای اولین بار توسط پیکلنر<sup>۱</sup> (۱۹۶۸) ارائه شد و اکنون بطور وسیعی در محاسبات دینامیک سحابیهای سیاره‌ای از آن استفاده می‌شود. طبق این نظریه پس از رسیدن ستاره به قله (A.G.B) ابر باد (S.W) با آهنگ جرم  $10^{-4}$ - $10^{-5} M_{\odot}/yr$  و سرعت  $10 \text{Km/s}$  شروع می‌شود و بتدریج مقداری از جرم پوش غول قرمز را به فضای بین ستاره‌ای می‌راند. سپس در اثر تغییر شرایط فیزیکی که سازوکار آن هنوز کاملاً شناخته نشده است، باد سریع (F.W) با آهنگ جرم  $10^{-7}$ - $10^{-8} M_{\odot}/yr$  و سرعت  $2000$ - $4000 \text{Km/s}$  شروع به وزیدن می‌کند و در اثر برخورد باد سریع به مواد ابر باد یک پوسته نسبتاً چگال بوجود می‌آید.

الگوهایی را که در بررسی دینامیک سحابیهای سیاره‌ای بکار می‌روند، از نظر مشخصات باد سریع می‌توان به دو گروه تقسیم کرد:

۱- الگوهایی که محاسبات آنها با این فرض انجام می‌شود، که سرعت و آهنگ جرم باد سریع در تمام مدت وزیدن ثابت می‌ماند (پیکلنر و کاهن<sup>۲</sup> ۱۹۸۳، کووک<sup>۳</sup> ۱۹۸۰، قنبری ۱۹۸۹)

۲- الگوهایی که در آنها فرض می‌شود، آهنگ جرم و سرعت باد با گذشت زمان تغییر می‌کند. مثلاً کاهن و بریتشورت<sup>۴</sup> (۱۹۹۰) الگویی را به کار بردند که آهنگ جرم باد سریع با گذشت زمان کاهش می‌یافت و سرعت باد از یک مقدار اولیه پایین

---

1. *Pikelner*

2. *Kahn*

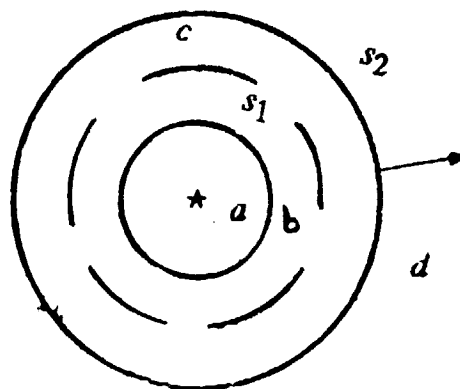
3. *Kwok*

4. *Breitschwerdt*

حدود  $30\text{Km/s}$  به مقدار نهایی بالایی حدود  $3000\text{Km/s}$  می‌رسید. آنها توانستند با این الگوی باد شتابدار بعضی نمودهای فیزیکی جالب مانند قطعه قطعه شدن پوسته و تشکیل نواحی با یونندگی پایین و کم نور را در سحابی توضیح دهند.

#### ۴-۱- اثر بادهای ستاره‌ای در تشکیل نواحی مختلف اطراف ستاره مرکزی سحابی سیاره‌ای

باد سریع بعلت سرعت بالایی که دارد مانند یک پیستون به مواد اَبَر باد که قبلاً در فضای بین ستاره‌ای قرار گرفته، برخورد می‌کند و یک موج ضربه‌ای قوی ( $S_p$ ) در آن بوجود می‌آورد. در اثر این عمل سرعت خود باد کاهش می‌یابد. از آنجا که انرژی باد سریع از نوع جنبشی است، باید راهی برای تبدیل این انرژی به انرژی گرمایی پیدا کرد و تنها راه اینست که یک موج ثانویه ( $S_1$ ) که در داخل باد سریع منتشر می‌شود، در نظر بگیریم، جبهه این موج برعکس ( $S_p$ ) به سمت ستاره مرکزی است همانطور که در شکل (۱-۱) نشان داده شده است، چهار ناحیه با سه مرز مشخص در اطراف ستاره مرکزی بوجود می‌آید که این نواحی با  $a$  و  $b$  و  $c$  و  $d$  مشخص می‌شود و در مورد هر یک بطور مختصر توضیح می‌دهیم.



شکل (۱-۱)

ناحیه (a) این ناحیه شامل مواد باد سریع که هنوز ضربه ندیده است می‌باشد. مواد باد سریع که با سرعت 2000Km/s در حرکتند وارد ضربه S<sub>1</sub> شده و قسمتی از انرژی مکانیکی آن به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود.

ناحیه (b) شامل باد سریع ضربه دیده است دما در این ناحیه از معادله زیر بدست می‌آید (دایسن ۱۹۸۰)

$$T = \frac{3}{32} \frac{m_h V_*^2}{K} \approx 6 \times 10^7 \text{ K} \quad (5-1)$$

V\* سرعت باد سریع است.

بعثت دمای بالا عناصر سنگین مانند اکسیژن در مراتب یونیدگی بالایی قرار دارند (مثلاً O<sup>+5</sup>) و چون امکان برانگیختگی برخورداردی این یونها وجود ندارد، سرد شوندگی این ناحیه بسیار کم است. در نتیجه می‌توان آن را یک ناحیه بی‌در رو دانست. سرعت صوت در گاز این ناحیه که حباب نامیده می‌شود خیلی بالاست (حدود 600Km/s) در نتیجه زمان عبور صوت خیلی کمتر از مقیاس زمانی انبساط حباب است، به این دلیل گاز این ناحیه دارای فشار یکنواختی است که با گذشت زمان این فشار کاهش می‌یابد.

ناحیه (c) این ناحیه از یک پوسته چگال تشکیل شده است که ضربه S<sub>2</sub> از آن عبور می‌کند. به دو دلیل تابشهایی که باعث سرد شدن محیط می‌شوند در این ناحیه مؤثرند. اولاً چگالی در پشت ضربه S<sub>2</sub> بیشتر از ناحیه (b) است و تحت تأثیر رقیق شدگی هندسی قرار نمی‌گیرد. ثانیاً گاز بین ستاره‌ای با سرعت بسیار کمتر از سرعتی که مواد باد سریع به ضربه S<sub>1</sub> برخورد می‌کنند، وارد ضربه S<sub>2</sub> می‌شود. در