بسم الله الرحمن الرحیم
الحمد لله رب العالمین الرحمن الرحیم مالک یوم الدین
ایاک نعبد و ایاک نستعین اهدنا الصراط المستقیم
صراط الذین انعمت علیهم غیر المغضوب علیهم
و لا الضالین

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک (اخترفیزیک)

بررسی اثر هدایت گرمایی بر ساختار دینامیکی قرص‌های برافزایشی با پهن‌رفت غالب در حضور وشکسانی، مقاومت الکتریکی، و میدان مغناطیسی دوقطبی ستاره‌ی مرکزی

استاد راهنما:

دکتر جمشید قنبری

دکتر شهرام عباسی

ارائه دهنده:

مریم قاسم نژاد بافنده

تابستان ۱۳۸۷

چکیده

هدایت گرمایی در حقیقت جابجایی گرما از طریق الکترونها و یونها می‌باشد. مشاهدات از پلاسمای بسیار داغ اطراف A^{x} تیرانداز و نزدیک تعدادی از هسته‌های کهکشانی نشان می‌دهندکه مسافت آزاد میانگین الکترونها و پروتونها قابل مقایسه با شعاع تسخیر کننده‌ی گاز است. بنابراین در این نوع گاز برخوردها از نوع ضعیف می‌باشد و در نتیجه هدایت گرمایی توسط یونها سهم بسزایی در انتقال گرمای آزاد شده در فرآیند برافزایش دارد. ما سیال برافزایشی با تقارن محوری، ایستا و همدما که شامل میدان مغناطیسی دو قطبی ستاره‌ی مرکزی است را در نظر گرفته‌ایم. سازو کار غالب در اتلاف انرژی، وشکسانی و مقاومت الکتریکی ناشی از میدان می‌باشد. سعی کرده‌ایم حل‌های خود مشابه برای قرص‌های برافزایشی با پهن رفت غالب در حضور هدایت گرمایی بیابیم. نشان خواهیم داد که کمیت‌های دینامیکی سیستم نسبت به پارامترهای وشکسانی، پهن رفت و هدایت گرمایی حساس می‌باشند. افزایش وشکسانی، منجر به کاهش سرعت شعاعی و سرعت زاویه‌ای و افزایش چگالی می‌شود. با کاهش ضریب هدایت گرمایی، سرعت شعاعی کاهش می‌یابد و موجب افزایش چگالی در صفحه‌ی استوا می‌شود.

چکیده

هدایت گرمایی در حقیقت جابجایی گرما از طریق الکترونها و یونها می‌باشد. مشاهدات از پلاسمای بسیار داغ اطراف A^{x} تیرانداز و نزدیک تعدادی از هسته‌های کهکشانی نشان می‌دهندکه مسافت آزاد میانگین الکترونها و پروتونها قابل مقایسه با شعاع تسخیر کننده‌ی گاز است. بنابراین در این نوع گاز برخوردها از نوع ضعیف می‌باشد و در نتیجه هدایت گرمایی توسط یونها سهم بسزایی در انتقال گرمای آزاد شده در فرآیند برافزایش دارد. ما سیال برافزایشی با تقارن محوری، ایستا و همدما که شامل میدان مغناطیسی دو قطبی ستاره‌ی مرکزی است را در نظر گرفته‌ایم. سازو کار غالب در اتلاف انرژی، وشکسانی و مقاومت الکتریکی ناشی از میدان می‌باشد. سعی کرده‌ایم حل‌های خود مشابه برای قرص‌های برافزایشی با پهن رفت غالب در حضور هدایت گرمایی بیابیم. نشان خواهیم داد که کمیت‌های دینامیکی سیستم نسبت به پارامترهای وشکسانی، پهن رفت و هدایت گرمایی حساس می‌باشند. افزایش وشکسانی، منجر به کاهش سرعت شعاعی و سرعت زاویه‌ای و افزایش چگالی می‌شود. با کاهش ضریب هدایت گرمایی، سرعت شعاعی کاهش می‌یابد و موجب افزایش چگالی در صفحه‌ی استوا می‌شود.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: معرفی قرص‌های برافزایشی

۱-۱ تاریخچه قرص‌های بر افزایشی..... ۲

۱-۲ برافزایش چیست؟..... ۳

۱-۳ اهمیت پدیده‌ی برافزایشی..... ۷

۱-۴ قرص برافزایشی..... ۹

۱-۵ ساز و کار انتقال تکانه‌ی زاویه ای..... ۱۰

۱-۶ وشکسانی..... ۱۳

۱-۷ پهن رفت در چه صورت اتفاق می افتد؟..... ۱۵

۱-۸ تاثیر هدایت گرمایی بر قرص‌های برافزایشی..... ۱۵

۱-۹تاثیر میدان مغناطیسی بر قرص‌های برافزایشی..... ۱۶

۱-۱۰ تاثیر خود گرانش بر قرص‌های برافزایشی..... ۱۷

۱-۱۱ انواع قرص‌های برافزایش..... ۱۹

۱-۱۱-۱ قرص‌های پیش سیاره‌ای..... ۱۹

۱-۱۱-۲ برهمکنش ستارگان دوتایی..... ۱۹

۱ -۱۱-۳ قرص‌های اطراف هسته‌های کهکشانی فعال..... ۲۱

۱-۱۱-۴ قرص‌های اخترفیزیکی دیگر..... ۲۲

۱-۱۲ دسته‌بندی قرص‌های برافزایشی از نظر شکل ظاهری..... ۲۳

۱-۱۲-۱ قرص‌های نازک..... ۲۳

۱-۱۲-۲ قرص‌های ضخیم..... ۲۳

فصل دوم – بررسی شاره‌های برافزایشی با پهن‌رفت غالب.

۲-۱ تاریخچه ۲۵

۲-۲ بررسی ساختارADAF ۲۶

۲-۳ معادله‌ی انرژی حاکم برADAF ۲۷

۲-۴ چرا تابش موثرADAF پایین است؟ ۲۹

۲-۵ در مورد ADAF چه می‌دانیم؟ ۳۰

۲-۶ بررسی پایداری ADAF ها ۳۱

۲-۷ خواصADAF ها ۳۱

۲-۷-۱ از لحاظ هندسی و سینماتیکی ۳۱

۲-۷-۲ خواص گرماییADAF ها ۳۲

۲-۷-۳ تابش موثر(η) ۳۳

۲-۷-۴ ساختار طیفیADAF ها ۳۴

۲-۷-۵ شاره‌های خروجی و جت‌ها ازADAF ها ۳۶

۲-۷-۶ همرفت ۳۷

۲-۷-۷ مقایسه یADAF با برافزایش کروی خالص..... ۳۸

فصل سوم: معادلات حاکم بر سیستم

۳-۱ مقدمه..... ٤٠

۳-۲ فرمول‌بندی سیستم..... ٤٠

۳-۳ فرض‌های موجود در مسئله..... ٤١

۳-۴ اصول عمومی حاکم بر مسئله..... ٤٧

۳-۵ حل‌های خودمشابهی..... ٤٩

فصل چهارم: نمودارها و نتایج و پیشنهادات

۴-۱ مقدمه..... .... ۵۷

۴-۲ شرح مختصر روشRelaxation ۵۸

۴-۳ بررسی اثر پهن‌رفت..... ۵۹

۴-۴ بررسی اثر وشکسانی..... ٦٦

۴-۵ بررسی اثر هدایت گرمایی..... ... ۷۲

۴-۶ نتایج..... .... ۷۸

۴-۷ پیشنهادات..... ۸۰

پیوست برنامه‌ی نوشته شده به زبان فرترن برای حل معادلات ۸۱

مراجع..... ۹۷

.

فصل اول

معرفی قرص‌های برافزایشی

۱ _۱ تاریخچه قرص‌های برافزایشی

۱-۲ برافزایش چیست؟

۱-۳ اهمیت پدیده برافزایش

۱-۴ قرص برافزایشی

۱-۵ ساز وکار انتقال تکانه‌ی زاویه‌ای

۱-۶ وشکسانی

۱-۷ پهن‌رفت در چه صورت اتفاق می‌افتد؟

۱-۸ تاثیر هدایت گرمایی بر قرص‌های برافزایشی

۱-۹ تاثیر میدان مغناطیسی بر قرص‌های برافزایشی

۱-۱۰ تاثیر خودگرانش بر قرص برافزایشی

۱-۱۱ انواع قرص‌های برافزایشی

۱-۱۲ دسته‌بندی قرص‌های برافزایشی از نظر شکل ظاهری

۱-۱ تاریخچه قرص‌های بر افزایشی

بررسی قرص‌های بر افزایشی از سه دهه پیش آغاز شده است[۲]. اولـین مباحـث مطـرح شـده در مـورد مسئله بر افزایش را می‌توان به اواسط قرن هجدهم و به کارهای کانت ولاپلاس[۱] مرتبط دانـست[۴۹]. در سال ۱۹۳۹ هویل و لیتلتون[۲] مقاله‌ای را ارائه کردند که در آن به موضوع برافزایش در مسائل اخترفیزیکی می‌پرداخت[۲۲]. در سال ۱۹۵۹ یکی از مهمترین مقاله‌ها که پایه‌ای بـرای مقالـه‌هـای بعـدی بـه شـمار می‌رفت توسط هرمان بوندی[۳] ارائه شد. او اولین کسی بود که به طور جدی به بررسـی برافـزایش کـروی غیر چرخان که ساده ترین نوع بر افزایش است، پرداخت[۸].

در سال ۱۹۶۰ منجمان با کشف اختروش‌ها و منابع پرتوی ایکـس کـه اجرامـی بـا روشـنایی زیـادی هستند، به این نتیجه رسیدند که منبع انرژی (هسته ای) ستارگان به عنوان منبع تابندگی ناکافی است و انرژی پتانسیل گرانشی خروجی از ماده در حال برافزایش به عنوان منبع اصلی برای سیستم‌های دوتـایی شناخته شده است[۱۲] .

الگوی استاندارد قرص‌های برافزایشی در اوایل دهه هفتاد توسـط شـاکورا (۱۹۷۳)، پرینگـل[۴](۱۹۷۲)، تورنه و نویکو[۵] (۱۹۷۳)بهبود بخشیده شد ودر سال ۱۹۷۳ شاکورا و سانیو[۶] حل تحلیلـی خـود سـازگاری برای قرص‌های بر افزایشی که از نظر هندسی نازک واز نظر اپتیکی ضخیم هستند، ارائه کردندکه به طـور کلی همان قرص‌های نازک استاندارد یا قرص شاکورا و سانیو می باشد. پارامتر تـاثیر گـذار در ایـن الگـو، وشکسانی مطرح گردید که به الگوی استاندارد یا الگوی آلفا معروف می‌باشد[۵۷].

در سال ۱۹۷۷ ایچیمارو[۷] و درسال ۱۹۸۲ ریس[۱] قرص‌های برافزایشی با پهن رفت غالب[۲] را که در آنها تابش موثر کم است، مطرح کردند[۲۴]،[۵۴].

1) Kant & La place
2) Hoyle,Lyttelton
3) H.Bondi
4) Pringel
5) Novikov &Thornel
6) Shakura &Sunyev
7) Ichimaru

در سال ۱۹۷۷ داشل[۳] و همکاران مقاله‌ای ارائه دادند که در آن الگوی آلفا تبدیل بـه الگـوی بتـا شـد (الگوی بتا زمانی مطرح می‌شود که در نواحی بیرونی قرص خود گرانش اهمیت داشته باشد)[۱۱].

در سال۲۰۰۶ قنبری[۴] و همکاران قرص‌های نازک و با حضورخودگرانش را با الگوی بتا برای وشکسانی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که آهنگ برافزایش به سـمت داخـل بـر روی جـرم مرکـزی بـرای قرص‌هایی با الگوی بتا بیشتر از الگوی آلفا است[۱] .

هم اکنون اخترفیزیکدانان بسیاری به مطالعه در مورد قرص‌هـای برافزایـشی در حالـت‌هـای مختلـف می‌پردازند و زمینه‌ی مطالعه در مورد این پدیده‌ی اخترفیزیکی بسیار وسیع می‌باشد.

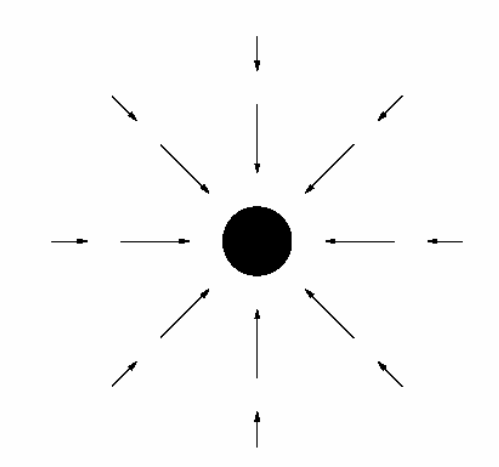
۱-۲ بر افزایش چیست؟

اگر تعدادی مولکول گاز در یک مدار دایره‌ای حول یک جسم مرکزی با گـرانش قـوی، در حـال چـرخش باشد در صورتی که انرژی و تکانه‌ی زاویه‌ای ذرات ثابت بماند در آن مدار باقی می‌ماند، ولـی از آنجـا کـه تحت تاثیر فرایند های اتلافی مثل برخورد مولکول‌ها با یکدیگر، امـواج ضـربه‌ای و وشکـسانی مقـداری از انرژی درونی به انرژی گرمایی و انرژی تابشی تبدیل می‌شود، در نتیجه ذرات بیـشتری در چـاه پتانـسیل گرانشی جسم مرکزی فرو می روند و مقداری از تکانه‌ی زاویه‌ای از دست رفته‌ی خود را تجدید می‌کننـد. مقیاس زمانی که طی آن انرژی خود را به صورت تابش از دست می‌دهند از مقیاس زمانی دینامیکی که به حرکت مداری ذرات مربوط می‌شود بسیار طولانی‌تر است. بنابراین فرایند بر افـزایش در مقیـاس‌هـای زمانی بالایی رخ می‌دهد یعنی مواد اطراف ستاره مرکزی یک‌باره روی ستاره نمی‌ریزند. برای یک تکانه‌ی زاویه‌ای معین حداقل انرژی سیستم در حالتی است که ذرات در مدار دایره‌ای حرکت می‌کننـد، بنـابراین

1) Rece
2) Advection dominated accretion flows
3) Duschel
4) Ghanbari

ذرات در مدار مارپیچی که به تدریج شعاع آن کاهش می‌یابد به سمت جسم مرکزی حرکت می‌کنند که به این فرآیند برافزایش می‌گویند[۱۴].

اگر ستاره‌ای در یک محیط گازی همگن و ساکن قرار بگیرد، مواد اطراف ستاره تحت پتانسیل گرانشی ستاره بر روی آن برافزایش می‌کنند، این حالت را برافزایش کروی یا برافزایش بوندی می‌نامند و فقط درحالتی بکار می رود که تکانه‌ی زاویه‌ای گاز قابل صرف نظرکردن باشد به این معنی که گاز اطراف ستاره، بدون چرخش روی ستاره فروریزش می‌کند[۴۹].



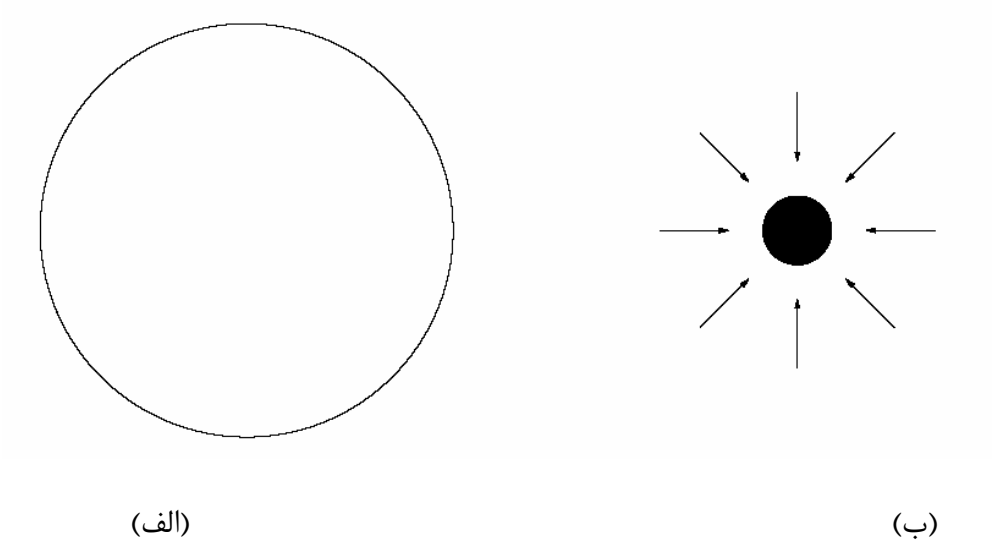
شکل ۱-۱. برافزایش کروی

بیشتر شاره‌های برافزایشی دراخترفیزیک به سرعت حول جرم مرکزی می‌چرخند. هنگامیکه برافزایش در آنها رخ می‌دهد ما با این مسئله مواجه هستیم که چگونه تکانه زاویه‌ای را حذف کنیم (طبق الگوی بوندی).

در شاره‌های پراکنده شده انرژی پتانسیل گرانشی به انرژی جنبشی و تابش تبدیل می‌شود. و تکانه‌ی زاویه‌ای را می‌توان به راحتی کنار گذاشت که در بخش ۱-۴ به طور کامل به این مسئله می‌پردازیم.

با آن که جهان در حال انبساط است ولی بیشتر اجرام مورد مطاله در نجوم، در نتیجه فروریزش گرانشی تشکیل شده اند.

یک ابر گازی کروی یکنواخت و ساکن را که تحت گرانش خودش فروریزش می‌کند در نظر می گیریم. فروریزش می‌تواند به صورت تقارن کروی در نظر گرفته شود.

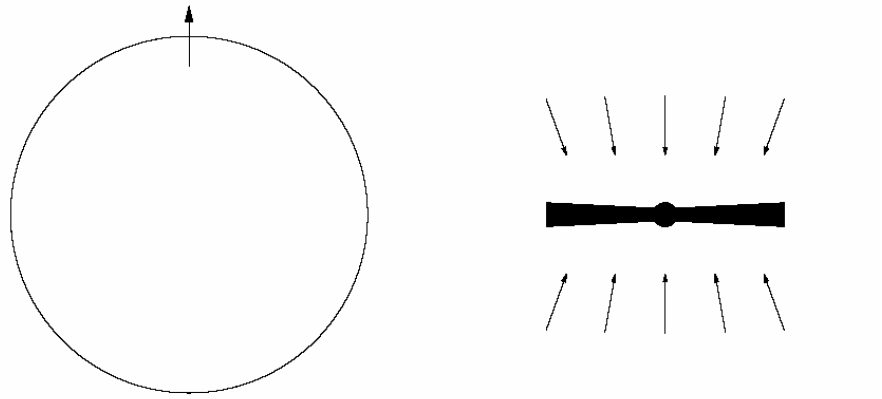


(ب) (الف)

شکل ۱-۲. فروریزش از ابر غیر چرخان.

در این مورد شاره‌های برافزایشی مستقیماً تحت جاذبه‌ی جسم مرکزی بر روی آن می‌ریزند که این الگو امروزه هیچ کاربردی ندارد. زیرا اگر این الگو پذیرفته شود باید تمام جهان در یک نقطه جمع شود .

اگر ابر از ابتدا دارای چرخش یکنواخت باشد دینامیک آن تحت تاثیر نیروی گریز از مرکز قرار می‌گیرد،که فروریزشی پایدار در صفحه‌ی عمود بر محور چرخش داریم. این حالت در فروریزش ابر اهمیت می‌یابد و تکانه‌ی زاویه‌ای را حفظ می‌کند و به طور ناگهانی قرص چرخان، اطراف جسم متراکم مرکزی تشکیل می‌شود. قرص به طور عمده تحت تاثیر نیروی گریز از مرکز که بر خلاف نیروی گرانش بر قرص اعمال می‌شود، قرار می‌گیرد. این حالت باعث پخیدگی در قرص می‌شود که در شکل۱-۳ نشان داده شده است[۴۹].



(الف) (ب)

شکل۱-۳. فروریزش یک ابر چرخان.

در ابر چرخان دو نیروی گریز از مرکز و جاذبه گرانشی در خلاف جهت یکدیگر عمل می‌کنند که از برابری این دو نیرو داریم:

$$m\frac{V^{2}}{r} = G\frac{Mm}{r^{2}} \qquad (۱-۱)$$

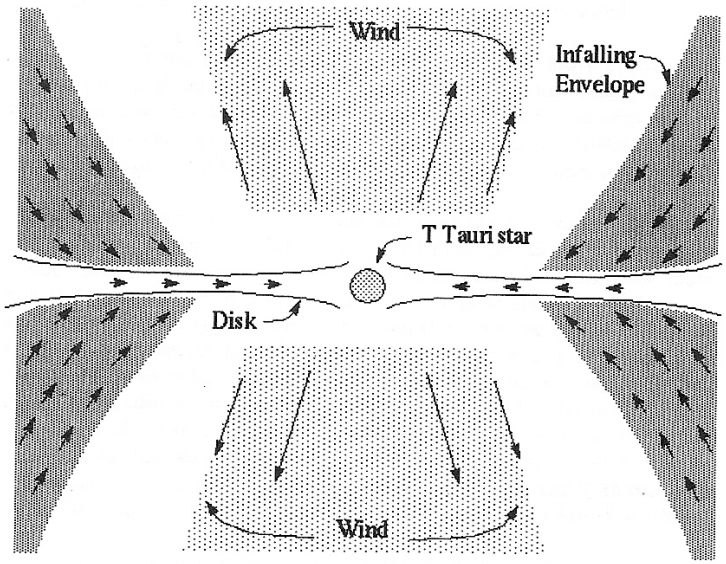
$V=r\Omega$

سرعت زاویه‌ای ابر چرخان به صورت زیر است:

$$\Omega = \left(\frac{GM}{r^{3}}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (۱-۲)$$

در اثر رمبش، یک ستاره نوزاد به همراه یک قرص پدید می‌آید. در مراحل اولیه رمبش، هسته مرکزی (ستاره‌ی مرکزی) کوچک است و ماده از ابر به سمت قرص سقوط می‌کند و جرم قرص افزایش می‌یابد. این فرایند تا زمانی ادامه دارد که اکثر جرم ابر در قرص جمع می‌شود، در این هنگام تقریباً فرآیند سقوط از ابر به سمت قرص کند یا متوقف می‌شود و تحول قرص وارد مرحله جدیدی می‌شود. به این ترتیب در اثر انباشته شدن بخش عمده‌ی جرم ابر در قرص، قرص از نظر گرانشی ناپایدار می‌شود. به‌علاوه، به علت جاذبه‌ی هسته‌ی مرکزی و دیگر عوامل ناپایداری، قرص به طرف ستاره ی مرکزی شروع به فروریزش

می‌کند. در اثر این فروریزش، که ما آن را بر افزایش و یا در برخی شرایط پهن‌رفت[1] مـی‌نـامیم بخـشی از جرم قرص و بخشی از تکانه‌ی زاویه‌ای و انرژی قرص به همراه آن به ستاره‌ی مرکـزی منتقـل مـی‌شـود. البته فرآیندهای دیگری از جمله بادهای اطراف قرص و دیگـر فرآینـدهای مربـوط بـه سـتاره‌ی مرکـزی می‌تواند در ساختار قرص مؤثر باشد. در شکل ۱-۴ فرآیندهای مورد بحث در قرص نشان داده شده اسـت [2].



شکل ۱-۴. فرآیند شکل گیری قرص.

۱-۳ اهمیت پدیده بر افزایش

تا قرن ۱۹ میلادی فیزیکدانان گرانش را به عنوان تنها منبع انرژی اجرام آسمانی مـی‌شـناختند ولـی بـا توجه به عمر خورشید متوجه شدند که گرانش نمی تواند منبع مناسبی برای انرژی خورشید باشد.

1) Advection
2) Lihartman بر گرفته از کتاب

در اواخر قرن بیستم این تصور پیش آمد که سوخت هسته‌ای منبع روشنایی اجرام آسمانی در جهان می‌باشد اما این نیز منبع مؤثری برای انرژی همه‌ی اجرام آسمانی نبود. برای بعضی اجرام شبیه اختروش‌ها سوخت هسته‌ای کافی نیست و بر افزایش جانشین مناسبی است [۶].

برافزایش به عنوان یکی از منابع انرژی در مواد دارای گرانش، انواع مختلف سیستم‌های دوتایی نزدیک، هسته‌های فعال کهکشانی و اختروش‌ها شناخته شد.

برافزایش (ناشی از گرانش) یک منبع انرژی کارا تر از هم جوشی هسته‌ای در داخل ستارگان است [۴۹].

اگر ذره‌ای به جرم m از فاصله‌ی بی نهایت دور بر روی ستاره‌ای با جرم M وشعاع R_* سقوط کرده و به حالت سکون درآید میزان انرژی آزاد شده برابر است با:

$$\frac{GMm}{R_*} = \left(\frac{R_S}{2R_*}\right) mc^2 \qquad (۳-۱)$$

که در آن R_S شعاع شوارتز شیلد[1] می‌باشد

$$R_S = \frac{2GM}{c^2}$$

برای ستارگان فشرده از قبیل ستارگان نوترونی با جرم $M_\odot$ و شعاع $R = ۱۰^۶$ c m انرژی آزاد شده کسر قابل ملاحظه‌ای از انرژی جرم سکون ذره است[۴۹].

پس نقش جدیدی برای گرانش به خاطر بر افزایش روی اجسام متراکم که یک سازوکار قوی برای تولید تابش با انرژی بالا می‌باشد، ایجاد می‌شود. برای تخمین انرژی، فرض می‌کنیم یک جسم به جرم M وشعاع R_* داریم، انرژی پتانسیل گرانشی آزاد شده به وسیله‌ی برافزایش یک جرم m روی سطح ستاره به صورت زیر است:

$$\Delta E_{acc} = \frac{GMm}{R_*} \qquad (۴-۱)$$

1) Schwarzschild

که G ثابت گرانش است .

با مقایسه انرژی برافزایشی با انرژی همجوشی هسته‌ای (تبدیل اتم‌های هیدروژن به اتم هلیوم) در می‌یابیم که

$$\Delta E_{nuc} = 0.007\, mc^2 \qquad (۵-۱)$$

ΔE_{nuc} انرژی آزاد شده در تبدیل اتم‌های هیدروژن به هلیوم و c سرعت نور است واین مقدار برابر است با $6\times10^{18}\ erg/gr$ که این مقدار $\frac{1}{20}$ انرژی ناشی از برافزایش می‌باشد[۶].

اگر ذره ای را در نظر بگیریم که در یک مدار دایروی دور ستاره‌ای می‌چرخد، چنانچه این ذره به مدار کوچکتری منتقل شود انرژی آزاد شده تقریباً با انرژی قیدی مدار کوچکتر برابر خواهد بود. این انرژی برای مدارهای اجرامی که به اندازه‌ی کافی فشرده‌اند می‌تواند به کسر مشخصی از انرژی جرم در حال سکون آنها تبدیل شود. به طور مثال حدود ۱۰ درصد انرژی جرم در حال سکون از مدار اطراف ستاره‌ی نوترونی می‌تواند به انرژی پتانسیل گرانشی تبدیل شود، در مورد سیاهچاله‌ها این مقدار به بیشتر از ۴۰ درصد انرژی سکون می‌رسد. پس فرآیند برافزایش می تواند تبدیل موثری از انرژی جرم سکون به تابش باشد[۴۹].

۱-۴ قرص برافزایشی

زمانیکه شاره‌ی اطراف جرم مرکزی با حرکت شعاعی و نیز چرخش حول جرم مرکزی همراه باشد، انتظار داریم گاز در مدار دایره‌ای و در مسیرهای مارپیچی به سمت ستاره‌ی فشرده به داخل حرکت کند که این شکل قرص برافزایشی است. در طی حرکت مارپیچی در غیاب گشتاور خارجی، تکانه‌ی زاویه‌ای کاهش می‌یابد و این تنها با جابجا شدن تکانه‌ی زاویه‌ای قرص به وسیله گشتاور داخلی اتفاق می افتد، پس

قسمتهای خارجی تکانه‌ی زاویه‌ای بدست می آورند و به صورت مارپیچی به سمت خارج حرکت می‌کنند.

پس برافزایش به عواملی نظیر جرم جسم مرکزی، وشکسانی سیستم ، جرم قرص (خود گرانش) و نیز حرکت مواد در راستاهای شعاعی وسمتی وابسته است.

۱-۵ ساز وکار انتقال تکانه‌ی زاویه‌ای

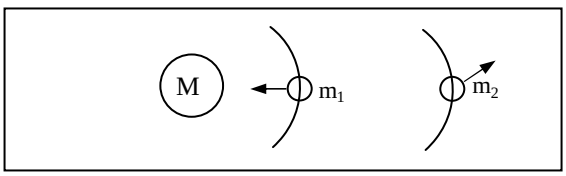
ساز وکار انتقال تکانه‌ی زاویه‌ای،توسط جریان‌های تلاطمی و وشکسانی لایه‌های مختلف قرص برافزایشی صورت می‌گیرد. هر الگوی کاملی برای قرص‌های برافزایشی باید بتواند پایستگی تکانه‌ی زاویه‌ای را بخوبی توصیف کند. برای بررسی فیزیک این فرآیند از الگوی بسیار ساده لیندن_بل[1] و پرینگل[2] (۱۹۷۴) استفاده می‌کنیم[۳۲].

آنها یک الگوی ایده‌آل دو جرمی که حول جرم مرکزی دوران می‌کند در نظر گرفته و فرض کردند دو جرم کوچک m_1 و m_2 حول جرم مرکزی دوران کپلری داشته باشند. بنابراین انرژی و تکانه‌ی زاویه‌ای سیستم به صورت زیر خواهد بود:

$$E = -\frac{GM}{2}\left(\frac{m_1}{r_1} + \frac{m_2}{r_2}\right) \qquad (۶-۱)$$

$$J = (GM)^{\frac{1}{2}}\left(m_1 r_1^{\frac{1}{2}} + m_2 r_2^{\frac{1}{2}}\right) \qquad (۷-۱)$$

که r_1و r_2 شعاع مربوط به مدار جرمهای m_1 و m_2 می باشد:



شکل ۱-۵. سازوکار انتقال تکانه‌ی زاویه‌ای .

1) Lynden _Bel
2) Pringle

حال اگر در مدار دوران اختلالی صورت گیرد و در عین حال تکانه‌ی زاویه‌ای J ثابت بماند، داریم:

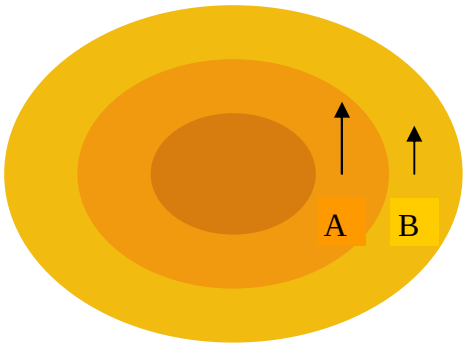
$$\Delta J = 0 \rightarrow m_1 r_1^{-\frac{1}{2}} \Delta r_1 = -m_2 r_2^{-\frac{1}{2}} \Delta r_2 \qquad (۸-۱)$$

تغییر انرژی ناشی از تحول در سیستم:

$$\Delta E = -\frac{GMm_2 \Delta r_2}{2r_2^2}\left[\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^{\frac{3}{2}} - 1\right] \qquad (۹-۱)$$

فرض کنید می‌خواهیم انرژی سیستم را کاهش دهیم، اگر جرم m_2 در فاصله‌ی دورتری از مرکز نسبت به جرم m_1 باشد، می توان با یک $\Delta r_2 > 0$ انرژی سیستم را کاهش داد، یعنی ذره ۲ به سمت خارج حرکت کرده است. اما اگر جسم ۲ نسبت به ۱ به مرکز نزدیکتر باشد می توان با یک $\Delta r_2 < 0$ انرژی سیستم را کاهش داد، زیرا سیستم تمایل به کاهش انرژی دارد تا پایدارتر شود. درضمن، نتیجه اینکه باید تکانه‌ی زاویه‌ای سیستم پایسته بماند این است که ذرات نزدیکتر به ستاره مرکزی به سمت داخل و ذرات دورتر به طرف بیرون حرکت می‌کنند، این پدیده مهمترین فرآیند در قرص‌های برافزایشی می‌باشد که در اثر آن انرژی از سیستم خارج می‌شود و در عین حال تکانه‌ی زاویه‌ای سیستم پایسته می‌ماند [۵۲].

فرآیندی که باعث انتقال تکانه‌ی زاویه‌ای به سمت خارج قرص و فروریزش گاز به سمت ستاره‌ی مرکزی می شود وشکسانی تلاطمی نامیده می‌شود. وشکسانی همان سایش لایه‌ها در سیالات می‌باشد (همانند اصطکاک در جامدات). وشکسانی تکانه‌ی زاویه‌ای را از هر عنصر گازی می‌گیرد و به عنصر گازی دورتر می‌دهد. وقتی شعاع کوچک است مواد با سرعت کپلری بیشتری نسبت به مواد لایه‌ی بزرگتر می‌چرخند و به سمت ستاره‌ی مرکزی فروریزش می‌کنند. اصطکاک بین دو لایه‌ی مجاور سیال که دارای سرعت‌های متفاوتی هستند باعث سُرخوردن لایه‌ی خارجی به بیرون و سُرخوردن لایه‌ی داخلی به داخل می‌شود. فرض می‌کنیم ۲ لایه‌ی A وB که هر کدام دارای سرعت‌های چرخشی متفاوتی هستند، به صورت زیر می‌باشند:



شکل ۱-۶. سازوکار انتقال تکانه‌ی زاویه‌ای.

لایه A دارای سرعت چرخشی بالاتر و در نتیجه تکانه‌ی زاویه‌ای بیشتری نسبت به B که در شعاع بزرگتری قرار دارد، می‌باشد.

در اثر سایش لایه‌ها روی یکدیگر (وشکسانی)، از سرعت لایه‌ی A کاسته می‌شود و به سرعت لایه‌ی Bافزوده می شود. و در واقع یک انتقال تکانه‌ی زاویه‌ای از A به B خواهیم داشت. در اثر پایستگی تکانه-ی زاویه‌ای :

$$\frac{dJ}{dt} = 0 \rightarrow J_1 = J_2 \rightarrow m_1 r_1 v_1 = m_2 r_2 v_2 \qquad (۱۰-۱)$$

ذره‌ی A که در مدار مشخص خود قرار دارد و تحت جاذبه‌ی جرم مرکزی فروریزش می‌کند و چون دارای سرعت چرخشی است یک حرکت مارپیچی به سمت جرم مرکزی خواهد داشت و طبق پایستگی تکانه‌ی زاویه‌ای جرم بیشتری به سمت مرکز فروریزش می‌کند وجرم کمتری به بیرون منتقل می‌شود. پس فرایند برافزایش، حاصل فروریزش و وشکسانی در سیستم است.

عقیده‌ی اساسی در مورد قرص‌های برافزایشی این است که وشکسانی در یک قرص گازی، انرژی پتانسیل گرانشی را به انرژی گرمایی تبدیل نموده و سپس به صورت تابش از محیط خارج می‌کند. هنگامیکه انرژی پتانسیل گرانشی آزاد می‌شود، گاز در یک حرکت مارپیچی به جرم مرکزی نزدیک می‌شود، هر چه گاز به جرم مرکزی بیشتر نزدیک می‌شود میزان انرژی آزاد شده نیز افزایش می‌یابد.