وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشگاه دامغان
دانشکده فیزیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد
فیزیک (گرایش نجوم و اخترفیزیک)

بررسی تأثیر در نظر گرفتن سرعت قطبی در ساختار قرص‌های برافزایشی وشکسان - مقاومت مغناطیسی

توسط:
قاسم صفایی

استاد راهنما:
دکتر شهرام عباسی

شهریور ۱۳۹۱

بسم الله الرحمن الرحيم

به نام خدا

بررسی تأثیر در نظر گرفتن سرعت قطبی در ساختار قرص‌های برافزایشی وشکسان - مقاومت مغناطیسی

توسط:

قاسم صفایی

پایان‌نامه

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه به عنوان بخشی از فعّالیّت‌های تحصیلی لازم
برای اخذ درجه‌ی کارشناسی ارشد

در رشته‌ی:

فیزیک (گرایش نجوم و اخترفیزیک)

از دانشگاه دامغان

ارزیابی و تأیید شده توسّط کمیته‌ی پایان‌نامه با درجه: **عالی**

دکتر شهرام عباسی استادیار رشته فیزیک، گرایش نجوم و اخترفیزیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه دامغان.(استاد راهنما)

دکتر علی‌رضا خصالی دانشیار رشته فیزیک، گرایش نجوم و اخترفیزیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه مازندران.(داور اول)

دکتر مسعود جعفری استادیار رشته فیزیک، گرایش نجوم و اخترفیزیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه دامغان.(داور دوم)

دکتر مهدی اردیانیان استادیار رشته فیزیک، گرایش ماده چگال، دانشکده فیزیک، دانشگاه دامغان.(نماینده تحصیلات تکمیلی)

شهریور ۱۳۹۱

تقدیم به

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

سپاسگزاری

نخست خداوند مهربان را شکرگزارم که در سایه‌ی لطف و کرم بی انتهایش توانستم مرحله‌ای جدید از تحصیل را به پایان برسانم و از او برای موفّقیّت در تمام مراحل زندگی یاری می‌جویم.

از پدر و مادر مهربانم که در همه‌ی مراحل زندگی یار و یاور و پشتیبانم بوده‌اند بسیار ممنونم.

بیش از همه مایلم نهایت سپاسگزاری خود را از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر عبّاسی اعلام نمایم ، خداوند متعال را سپاسگزارم که توفیق شاگردی ایشان را نصیب من نمود و تمامی عمرم به شاگردی ایشان افتخار می‌کنم و از تلاش ها و زحمات بی دریغ ایشان که همواره راهگشای اینجانب در این مسیر بوده است صمیمانه سپاسگزاری می‌نمایم.

چکیده

بررسی تأثیر در نظر گرفتن سرعت قطبی در ساختار قرص‌های برافزایشی وشکسان - مقاومت مغناطیسی

به وسیله‌ی:
قاسم صفایی

در این کار تأثیر سرعت قطبی بر ساختار قرص‌های برافزایشی پهن‌رفت غالب ـ مقاومت مغناطیسی در اطراف ستاره‌ی مرکزی با میدان مغناطیسی دو قطبی را بررسی می‌کنیم. سیّال برافزایشی پایا، دارای تقارن محوری، همدما و بدون اثرات نسبیّتی است، ساز و کار غالب در اتلاف انرژی، ناشی از وشکسانی و مقاومت مغناطیسی به عنوان منبع گرمایش قرص می‌باشد. ما در این کار هم سرعت قطبی و هم میدان مغناطیسی دو قطبی را نگه داشتیم و با برگزیدن جواب‌های حلّ خودمشابهی در دستگاه مختصّات کروی پارامترهای فیزیکی آن (چگالی ،فشار،سرعت و ...) را تعیین می‌نماییم و انتظار داریم با ورود سرعت قطبی شاهد یک رفتار کلّی به اثبات رسیده از قرص برافزایشی مورد مطالعه با عنوان اثر باد باشیم. با افزایش پارامترهای پهن‌رفت (f) [۱]، پارامتر آلفا به عنوان ضریب وشکسانی (α)[۲] و مقاومت مغناطیسی ($\eta_\circ$)[۳]شاهد این هستیم که ماکزیمم مقدار چگالی بیشتر می‌شود و شکل قرص ضخیم تر می‌گردد.

---

[۱] Advection parameter

[۲] α model

[۳] Magnetic resistivity

فهرست مطالب

فهرست مطالب ه

فهرست شکل‌ها ز

۱ پیشینه پژوهش و تعاریف مقدماتی ۴

۱-۱ مقدّمه ۴

۱-۲ دلیل شکل‌گیری قرص ۵

۱-۳ منبع انرژی قرص ۶

۱-۴ برافزایش ۷

۱-۵ وشکسانی ۷

۱-۶ الگوی آلفا و بتا ۸

۱-۶-۱ تأثیر خودگرانش بر قرص برافزایشی ۹

۱-۷ انتقال اندازه حرکت زاویه‌ای ۹

۱-۸ پهن‌رفت ۱۰

۱-۹ مقاومت مغناطیسی ۱۱

۱-۱۰ $ADAF$ ۱۲

۲ روابط و محاسبات ۲۰

۲-۱ مقدّمه ۲۰

۲-۲ روابط اساسی ۲۴

۲-۲-۱ معادله‌ی پیوستگی ۲۵
۲-۲-۲ معادله‌ی بقای اندازه حرکت ۲۶
۲-۲-۳ معادله‌ی القا ۳۴
۲-۲-۴ معادله‌ی انرژی ۳۹
۲-۳ جمع بندی ۴۳

۳ نتایج **۴۵**
۳-۱ حلّ خودمشابهی ۴۵
۳-۲ جواب‌های خودمشابهی ۴۶
۳-۳ معادلات دیفرانسیل خطّی شده ۷۴

۴ حلّ عددی و نمودارها **۷۷**
۴-۱ شرح مختصر روش ریلکسیشن ۷۸
۴-۲ اثر تغییر $f, \alpha, \gamma, \eta_\circ$ ۸۱

۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادات **۸۷**
۵-۱ پیشنهادات ۸۸

مراجع **۸۹**

فهرست شکل‌ها

۴-۱ اثر تغییر پارامتر پهن‌رفت روی چگالی قرص برای $\alpha = ۰/۵$ ، $\eta_۰ = ۰/۱$ ، $\gamma = \frac{۴}{۳}$. ۸۱

۴-۲ نمودار سرعت شعاعی برای مقادیر$\alpha = ۰/۰۱$ ، $\eta_۰ = ۰/۱$ و مقادیر مختلف f . . ۸۲

۴-۳ نمودار چگالی قرص با مقادیر $\alpha = ۰/۰۱$ ، $f = ۰/۱$ و برای مقادیر متفاوت $\eta_۰$ . . ۸۴

۴-۴ نمودار سرعت شعاعی با مقادیر $\alpha = ۰/۰۱$ ، $f = ۰/۱۶$ و برای مقادیر متفاوت $\eta_۰$. ۸۴

۴-۵ نمودار سرعت قطبی در اثر تغییرات $\eta_۰$ با مقادیر $\alpha = ۰/۵$ ، $\gamma = \frac{۴}{۳}$ ، $f = ۰/۷$ . . ۸۵

۴-۶ نمودار سرعت شعاعی در اثر تغییرات α با مقادیر $\gamma = \frac{۴}{۳}$ ، $\eta_۰ = ۰/۱$ ، $f = ۰/۷$. ۸۵

۴-۷ نمودار سرعت برداری با مقدار ثابت $\alpha = ۰/۵$ ۸۶

پیشگفتار

قرصی چرخان از غبار و گاز که به دلیل وجود گرانش اطراف گونه‌های خاصی از ستاره‌ها مانند ستاره‌های جوان تی ثوری [۴] ویا دیگر اشیاء پر جرم آسمانی مانند سیاه چاله‌ها[۵] شکل می‌گیرد. این قرص چرخان می‌تواند در سیستم‌های ستاره‌های دوتایی نزدیک به هم که یکی از آنها به صورت کوتوله‌ای سفید[۶]،ستاره‌ای نوترونی یا به صورت سیاهچاله باشد و یا سیاهچاله پر جرمی که مرکز بعضی از کهکشان‌ها را تشکیل می‌دهند وجود داشته باشد. بارزترین قرص‌های برافزایشی مشاهده شده مربوط به هسته‌های فعّال کهکشانی و کوازارها [۷]که خود به احتمال زیاد سیاهچاله‌های پر جرم مرکز کهکشانی هستند، می‌باشد[۱] .

مواد از محیط اطراف یا یک ستاره بزرگ که گرانش سطحی برای نگه داشتن لایه‌های بیرونی آن ناچیز است مانند ستاره‌ای غول به سمت ستاره متمرکزتر (مانند کوتوله سفید یا سیاهچاله) حرکت کرده(انتقال جرم)[۸] و اطراف آن قرص برافزایشی تشکیل می‌دهند. مواد درون این قرص حول جرم مرکزی حرکتی چرخشی ومارپیچی شکل داشته و درنهایت به سطح آن سقوط می‌کنند. این سقوط می‌تواند به تولید اشعه ایکس، گاما یا ماوراء بنفش منجر شود. در مورد سیاهچاله‌های پر جرم می‌توان انتظار تشکیل جت‌هایی از مواد مانند الکترون‌های پر سرعت داشت که به صورت عمود بر صفحه قرص و مرکز آن، از دوسمت آن به خارج پرتاب می‌شوند. این جت‌ها منبع امواج قوی رادیویی هم می‌باشند[۱، ۲].

---

[۴] T-Tauri

[۵] Black Holes

[۶] White dwarf

[۷] quasars

[۸] mass transfer

به طور کلّی تشکیل قرص برافزایشی در بروز پدیده‌های بسیاری مؤثّر است، از شکل‌گیری منظومه شمسی، تشکیل حلقه‌های زحل گرفته تا شکل‌گیری ستاره‌های دوتایی تولید کننده‌ی اشعه‌ی ایکس. در طیف تابش سیستم‌های دوتایی که از قرص برافزایشی تشکیل شده اند، مشاهده می‌گردد که دو دسته اشعه تابش می‌گردد، یکی از این دو، تابش جسم سیاه با دمای k۳۱۰۰۰ بوده و دسته دوّم اشعه‌ی X سخت با انرژی KeV۱۵۰ است. در واقع طیف این دسته دوّم اشعه که تا انرژی KeV۱۵۰ را هم داراست شاهدی بر وجود سیاهچاله به عنوان زوج نامرئی این دوتایی است. البتّه اگر این زوج از نوع ستاره نوترونی هم باشد اشعه‌ي Xتولید می‌شود ولی نشان داده شده است که در این صورت اشعه X دارای انرژی حدود KeV۱۰۰ خواهد بود [۳]. به تازگی اشعه‌ی گاما پرانرژی هم برای ستاره‌های دوتایی نزدیک به هم مشاهده شده است که بر سیاهچاله بودن شیء غیرقابل رؤیت این دوتایی تأکید می‌کند. تاکنون تعداد زیادی از این سیستم‌های دوتایی که می‌تواند شاهد وجود سیاهچاله باشد کشف شده است و امروزه یکی از زمینه‌های مشاهده‌ای کشف و بررسی این گونه دوتایی‌هاست.

برافزایش در بسیاری از اجرام نجومی به عنوان منبع انرژی در نظرگرفته می‌شود. که می‌توان از آن جمله به انواع ستاره‌های دوتایی، دوتایی‌های منبع اشعه‌ی X اغلب کوازارها و هسته‌های فعّال کهکشانی موسوم بهAGN اشاره کرد. آغاز بحث برافزایش را می‌توان به مدّت مدیدی قبل به افرادی چون باندی [۴] [۹]درسال ۱۹۴۴ و هویل [۱۰] [۵] در سال ۱۹۵۲ نسبت داد.

بعد از کشف منابع اشعه‌ی X که توسّط جیاگونی [۱۱] [۶]در سال ۱۹۶۲ انجام شد تحقیقات در مورد برافزایش بسیار قوّت یافت و پس از کشف کوازارها در سال ۱۹۶۳ توسّط اشمیت [۷] [۱۲] بسیار جدّی تر شد. اکنون به عنوان آخرین مباحث برافزایشی می‌توان ستاره‌های نوترونی را ذکر کرد.

برای حلّ معادلات حاصل مثل حلّ عددی هر معادله دیفرانسیل دیگر لزوم وجود شرایط مرزی در این مسائل احساس می‌شود [۸] که می‌تواند سطح ستاره یا لایه‌ی خارجی مگنتو سفر در ستاره‌های به شدّت مغناطیده باشد. در این حالت است که می‌توانیم اطمینان داشته باشیم در سقوط جرم، انرژی گرانشی آن به صورت گرما و تابش به بیرون ساطع می‌گردد.

شرایط در مورد منابعی که شامل سیاهچاله‌ها هستند کاملاً فرق دارد که در بعضی از دوتایی‌های اشعه‌ی X در کهکشان مثل AGNها مشاهده می‌شود. در این حالت مادّه در حال فروریختن به داخل قرص می‌باشد و به دلیل نیروی گرانشی قوی، در این ناحیه نمی‌تواند تابشی به بیرون بگریزد [۹] و بنابراین درخشندگی مادّه در حال فروریختن به داخل سیاه چاله جذب می‌گردد و بهره‌ی برافزایشی از

[۹] Bondi

[۱۰] Hoyle

[۱۱] Giacconi

[۱۲] Schmidt

ابتدا معلوم نیست و این بر خلاف برافزایش روی یک ستاره است که به درخشندگی ستاره به شدّت وابسته است و پارامترهایی چون اندازه‌ی حرکت زاویه‌ای مادّه در حال فروریختن و میدان مغناطیسی محصور شده در ستاره را می‌توان از روی آن به دست آورد.

درباره قرص‌هایی که از لحاظ هندسی ضخیم و از لحاظ اپتیکی نازک هستند شرایط به یک حالت شبیه تقارن کروی می‌رسد و وجود یک میدان مغناطیسی نقش بحرانی را بازی می‌کند. در اینجا یک مروری به مراحل مختلف تکامل نظریّه‌ی قرص‌های برافزایشی می‌اندازیم . همه چیز از ساخت یک مدل موسوم به مدل استاندارد [۱۳] شروع می‌شود و سال‌های اخیر به بحث روی حضور پهن‌رفت در قرص‌ها ختم می‌شود. می‌توان برای دیدن مراحل تکامل به مقالات نارایان [۱۴] و همکارانش [۱۰، ۱۱] در سال ۱۹۹۶ و ۱۹۹۹ اشاره کرد. با در نظرگرفتن قرص‌های تحت غلبه‌ی پهن‌رفت دارای جریان برافزایشی موسوم به ($ADAF$) به عنوان راه حلی برای بسیاری از اجرام نجومی است که باید با در نظرگرفتن یک سری از شرایط برای برآورده شدن شرایط فیزیکی مسئله که پشتوانه‌ی اصلی این روش است به کارگرفته شود.

رقابت بین پیشرفت‌های مشاهداتی اشعه‌ی X که توسّط تلسکوپ‌های پیشرفته برای مشاهده‌ی اجرام آسمانی با اطّلاعات به دست آمده از رصد است و مدل‌های پیشنهادی که برای توجیه و توضیح مشاهدات است باعث شده است که یک نوع مدل در زمان ارائه شدن با واقعیّت تطابق داشته باشد. بعضی مدل‌های $ADAF$ مثال‌های خوبی از این نوع هستند و با مشاهده‌ی داده‌های رصدی انطباق خوبی را دارند. این کار اشتباهی است که هر مدل فیزیکی را بدون در نظر گرفتن مشاهدات رصدی نجومی همراه با یک زمینه‌ی فیزیکی محکم و مدلّل توجیه کنیم، یعنی باید مدل پیشنهادی در برگیرنده‌ی هر دوی موارد بالا باشد.

در این کار پژوهشی هدف ما بررسی تحوّل قرص‌های اطراف ستاره‌ها در حالت مغناطیده است. در فصل اوّل به اختصار به نحوه‌ی تشکیل قرص‌ها، فرآیندهای انتقال تکانه زاویه‌ای، برافزایش، وشکسانی [۱۵]،پهن‌رفت و مقاومت مغناطیسی خواهیم پرداخت. در فصل دوّم به بررسی نتایج کارهای قبلی انجام گرفته و ضمناً معادلات حاکم بر سیستم می‌پردازیم، در ادامه در فصل سوّم روش حلّ خودمشابهی[۱۶] و جواب‌های حاصل از آن را به‌دست می‌آوریم، در فصل ۴و۵ به بررسی نمودارها و نتایج حاصله می‌پردازیم .

---

[۱۳] Standard Model

[۱۴] Narayan

[۱۵] Viscosity

[۱۶] Self Similar Solutions

فصل ۱

پیشینه پژوهش و تعاریف مقدماتی

۱-۱ مقدّمه

به دلیل تحوّل سریع علوم ارتباطات و امکانات رصدی، تصویری که ما از اجرام نجومی داریم هر روز در حال تکامل و بهبود است. یکی از مهم‌ترین و در عین حال شگفت‌ترین پدیده‌های نجومی قرص‌های برافزایشی هستند که در مراحل مختلف عمر ستاره‌ها مشاهده‌می‌گردند. در واقع اسم قرص‌های برافزایشی بر گرفته از شکل رصدی که ما از آن‌ها مشاهده‌می‌کنیم می‌باشد. مطالعات رسمی و بررسی دقیق قرص‌های برافزایشی به حدود ۴۰-۳۰ سال پیش برمی‌گردد منتها قبل از آن می‌توان به تحقیقات افرادی چون کانت [۱]، لاپلاس [۲] در قرن ۱۸ اشاره‌کرد و همینطور به مقاله‌ای که در سال ۱۹۳۹ برای درک اهمّیّت برافزایش در پدیده‌های اختر فیزیکی توسّط هویل [۳] و لیتلون [۴] نوشته‌شده‌بود، می‌توان اشاره‌کرد[۱].

به جرأت می‌توان گفت قدم اساسی اوّل را با فرض یک جریان برافزایشی غیر چرخان که به عنوان ساده‌ترین نوع بررسی است هرمان بوندی [۵] در سال ۱۹۲۵ برداشت. هرچند که این مدل کامل نبود ولی برای توجیه مشاهدات پرتو ایکس نتایج خوبی را داشت.

مرز بین درک ما از انرژی گرانشی و انرژی هسته‌ای به عنوان منبع تولید انرژی در هسته‌های ستاره‌ها و کهکشان‌ها، اختروش‌ها هستند. در حقیقت کشف اختروش‌ها یک جرقه‌بود برای اینکه اهمّیّت

---

[۱] Kant

[۲] Laplace

[۳] Hoyle

[۴] Raymond Arthur Lyttleton

[۵] Hermann Bondi

گرانش که تا آن زمان تحت تأثیر انرژی هسته‌ای بود دوباره مورد توجّه قرار بگیرد. کشف اختروش‌ها در سال ۱۹۶۰ این نتیجه را دربرداشت که انرژی پتانسیل گرانشی ناشی از جرم فشرده‌ی سنگین تأثیری به مراتب بیشتر از انرژی هسته‌ای را از خود نشان می‌داد. در اصل این کشف جدید منجر به این شد که برافزایش واهمّیّت آن دوباره مورد توجّه محافل علمی قرار گیرد تا اینکه در سال ۱۹۷۰ مدل مشهور به مدل استاندارد [۶]قرص‌های برا فزایشی توسّط شاکورا[۷]سانیف [۸]پیشنهاد شد آن‌ها در این مدل پارامتر مؤثّر وشکسانی را به صورتی تعریف کرده‌اند که بعد از آن به الگوی آلفا مشهور شد و در بسیاری از کارهای بعدی از جمله در کار ما مورد استفاده قرار گرفت.

از مهم‌ترین کارهای انجام شده بعد از آن تاریخ می‌توان به ایچمارو [۹] در سال ۱۹۷۷ و ریس [۱۰] در سال ۱۹۸۲ اشاره‌کرد که به بررسی قرص‌های برافزایشی با تابش مؤثّر کم پرداخته‌اند. در سال ۱۹۷۷ داشل[۱۱] و همکارانش مقاله‌ای ارائه‌کردند که در آن الگوی آلفا با الگوی جدیدی به نام بتا [۱۲]جایگزین شده‌بود و در زمانی اهمّیّت پیدا می‌کرد که در نواحی بیرونی قرص خود گرانش اهمّیّت بسزایی داشته‌باشد.

۱-۲ دلیل شکل‌گیری قرص

در صورتی که حرکت دورانی توده‌ی مادّه را با سرعت کم و آرام در نظر بگیریم شاهد تشکیل یک کره یا توده خواهیم بود. امّا اگر سرعت چرخشی این مواد افزایش یابد ضمناً نیروی گریز از مرکز در مورد این سیستم حاکم باشد آن گاه شاهد تشکیل شکل قرص خواهیم بود. در واقع در فرآیند برافزایش با افزوده‌شدن جرم به سمت جرم مرکزی اندازه حرکت نیز به تدریج به سمت بیرون انتقال می‌یابد و علاوه برآن به دلیل سقوط جرم در پتانسیل مرکزی و مقیّد شدن ذرّه به گرانش مرکز قرص، انرژی آزاد شده نیز خواهیم داشت. در صورتی شاهد تشکیل قرص خواهیم بود که مادّه‌ی برافزایشی تقریباً روی یک صفحه در حال چرخش باشد، در این صورت در حالت تعادل بین نیروی گرانش و گریز از مرکز آنچه انتظار داریم این است که، شکل کلّ توده‌ی مادّه به شکل قرص حاصل می‌شود.

---

[۶] Standard Model

[۷] Shakura

[۸] Sunyaev

[۹] Ichimaru

[۱۰] Rece

[۱۱] Duschel

[۱۲] β

۱-۳ منبع انرژی قرص

اگر منابع مختلف انرژی را به سه دسته‌ی شیمیایی، پتانسیل‌گرانشی و هسته‌ای تقسیم کنیم و در ضمن بهره‌ی انرژی را به صورت انرژی حاصل از یک صورت خاصّ انرژی تقسیم بر انرژی حاصل از تبدیل جرم m به انرژی که از رابطه :

$$E = mc^{۲}$$

به دست می‌آید تعریف کنیم، مقدار بهره‌ی انرژی به ترتیب برای انرژی شیمیایی، پتانسیل‌گرانشی وهسته‌ای به صورت زیر به دست می‌آیند (کمّیت η کمیّتی بدون بعد است و فقط برای مقایسه به کار می‌رود)[۱۲]:

$$\eta_C = ۵ \times ۱۰^{-۱۰}$$

$$\eta_G = ۲ \times ۱۰^{-۶}$$

$$\eta_N = ۷ \times ۱۰^{-۳}$$

از مقایسه‌ی مقادیر بالا آنچه به‌دست می‌آید این است که بهره‌ی انرژی هسته‌ای بیشتر از گرانشی و آن هم بیشتر از شیمیایی است و تنها در صورتی انرژی گرانشی نقش اساسی را بازی می‌کند که جرم مرکزی بسیار بزرگ باشد. امروزه می‌توانیم از طریق اندازه‌گیری درخشندگی، انرژی آزاد شده در ستاره‌ها را تعیین کنیم. در ستاره‌های سبک(حدود جرم خورشید)انرژی هسته‌ای نقش مهمّی را ایفا می‌کند ولی در اجرام نجومی سنگین وضعیّت فرق دارد و در صورتی که ذرّه‌ای به جرم m از فاصله‌ی بی نهایت دور بر روی ستاره‌ای با جرم M وشعاع R سقوط کند میزان انرژی آزاد شده از رابطه زیر بدست می‌آید. شعاع شوارتزشیلد را فاصله‌ای از یک جرم نجومی در نظر می‌گیریم که در آن شعاع، حتّی جرمی با سرعت نور نیز نمی‌تواند از قید گرانش ستاره‌ی مرکزی فرار کند. در واقع سرعت نور را در صورتی که بر اساس روابط نسبیّتی بالاترین سرعت فرار در نظر بگیریم که اگر جرم به سرعت بیشتر از آن برسد تبدیل به انرژی (فوتون) می‌شود. در این صورت داریم[۱۲]:

$$\frac{GMm}{R} = \frac{R_s}{۲R} mc^{۲} \longrightarrow R_s = \frac{۲GM}{c^{۲}}$$

$$R_s = \frac{۲GM}{c^{۲}}$$

انرژی پتانسیل‌گرانشی آزاد شده در اثر برافزایش یک جرم m روی سطح ستاره به صورت زیر می‌باشد:

$$\triangle E_{acc} = \frac{GMm}{R}$$

در عمل انحنای نور اطراف سیاهچاله‌ها و اجرام سنگین نجومی را می‌توان به انحنای فضا-زمان که یک مفهوم نسبیّت عامی است نسبت دهیم، با این توضیح که نور همواره کوتاه‌ترین مسیر فضا زمانی را طی می‌کند قابل توجیه است.

۱-۴ برافزایش

در صورتی که ذرّات تشکیل دهنده‌ی ستاره را به صورت مولکول‌های گاز فرض کنیم، درحالی که حول یک جسم مرکزی با گرانش بالا در حال چرخش هستند، هنگامی این ذرّات در مدار دایره‌ای باقی می‌مانند که انرژی و تکانه‌ی زاویه‌ای آن‌ها ثابت بماند. امّا فرآیندهای اتلافی چون حرکت تصادفی مولکول‌های گاز که منجر به برخورد ذرّات با یکدیگر می‌شوند می‌توانند با ایجاد عواملی چون امواج ضربه‌ای، مقداری از انرژی را به انرژی گرمایی و تابش تبدیل کرده و از سیستم خارج نمایند، علّت این که برافزایش در مقیاس‌های زمانی بالا رخ می‌دهد را می‌توان در این دانست که مقیاس زمانی که طیّ آن ذرّات تکانه زاویه‌ای از دست رفته‌ی خود را تجدید می‌کنند بسیار طولانی‌تر از مقیاس زمانی است که ذرّات انرژی خود را به صورت تابش از دست می‌دهند، بنابراین انتظار داریم ذرّات به تدریج انرژی خود را از دست بدهند و از آنجا که برای یک تکانه زاویه‌ای معیّن کمینه‌ی انرژی سیستم در صورتی رخ می‌دهد که ذرّات در یک مدار دایره‌ای حرکت کنند بنابراین ذرّات به صورت مارپیچی در مدارهای دایره‌ای که به تدریج شعاع آن‌ها کاهش می‌یابد، به سمت جسم مرکزی حرکت می‌کنند، به این پدیده برافزایش می‌گوییم.

۱-۵ وشکسانی

مدل باندی را می‌توان به عنوان اوّلین مدل برای توجیه یک سری از ویژگی‌های قرص‌های برافزایشی نام برد، در این مدل فرض می‌شود که برافزایش کروی غیر چرخانی را در سیستم داریم، این معادل یک رمبش و فروریزش محض است که در آن جرم بدون داشتن اندازه حرکت اوّلیه و فقط با سرعت شعاعی در حال سقوط به سمت جرم مرکزی می‌باشد. مشکل مدل باندی این است که در صورت پذیرش آن باید جمع شدن مواد عالم در یک نقطه را بپذیریم.

امّا در مدل‌های جدید فرض می‌شود که جرم دارای اندازه حرکت می‌باشد، همچنین چون اندازه حرکت‌های ذرّات بنابه فواصل آن‌ها از مرکز قرص فرق می‌کند، لذا در لایه‌های مختلفی براساس اندازه

حرکت شان درحال چرخش حول مرکز قرص هستند. از تأثیر دو لایه درحال چرخش روی یکدیگر وشکسانی تعریف می‌شود.

وشکسانی فرآیندی است که شبیه اصطکاک در جامدات باعث می‌شود بین دو لایه در حال چرخش از مادّه که دارای اندازه حرکت زاویه‌ای و سرعت متفاوت هستند تکانه زاویه‌ای تغییرکند و در ضمن شاهد اتلاف انرژی باشیم. در واقع وشکسانی باعث می‌شود که انرژی به یکی از صورت‌های تابش، همرفت رسانش در قرص منتقل‌شود. پس اثر وشکسانی هم در معادله‌ی بقای اندازه حرکت و هم در معادله مربوط به انرژی وارد می‌شود. دو نوع مختلف وشکسانی می‌توانیم در نظر بگیریم که عبارتند از :وشکسانی تلاطمی و وشکسانی مولکولی. وشکسانی مولکولی را معمولاً به صورت :

$$\nu = l \cdot V$$

می‌توان نوشت که در آن l مقیاس طول و v مقیاس سرعت متوسط مولکولی است. وشکسانی مولکولی بسیار کوچک‌تر از آن است که در قرص برافزایشی مؤثّر باشد. در صورتی که وشکسانی مولکولی را به عنوان عامل اصلی در نظر بگیریم عمر برافزایش بیشتر از عمر عالم می‌شود چون ویسکوزیته حجمی نیز در جریان‌های متلاطم مؤثّر است از آن هم صرف نظر می‌کنیم.

۱-۶ الگوی آلفا و بتا

قرص را به صورت یک مجموعه‌ای از لایه‌های به شدّت لغزنده باعدد رینولدز بالا در نظر می‌گیریم. با این فرض‌ها قرص در مقابل اغتشاشات پایدار است، تا اینکه در سال ۱۹۷۳ شاکورا و سانیف مدل آلفا [۱۳] را برای ویسکوزیته سینماتیکی پیشنهاد کردند.

$$\nu = \alpha c_s H$$

که در آن آلفا عددی بین صفر و یک است، وبه عنوان ضریب الگوی آلفا است، H نصف ضخامت (ارتفاع) قرص است و C_s سرعت صوت می‌باشد. در صورتیکه اثر خود گرانشی در لایه‌های بیرونی قرص در نظر گرفته شود آنگاه مدل دیگری موسوم به مدل بتا [۱۴] کارساز است که توسّط لیندل-بل[۱۵] و پرینگل[۱۶] این است که وابسته به شعاع در قرص‌های کپلری است. مهم‌ترین ویژگی الگوی وشکسانی بتا در این است که به سرعت سمتی وابسته است

[۱۳] α

[۱۴] β

[۱۵] Lynden-Bel

[۱۶] Pringle

$$\nu = \beta V_\varphi r$$

در این رابطه با افزایش شعاع قرص، جرم قرص افزایش می‌یابد، در رابطه بالا V_φ سرعت سمتی، β پارامتری ثابت و بدون بعد و r شعاع قرص است.

در طیّ فرآیند برافزایش، هر عنصر جرم به شعاع‌های کوچک‌تر می‌رود وتکانه زاویه‌ای خود را از دست می‌دهد و در سراسر قرص باعث شارش مادّه از قرص به سمت جسم مرکزی می‌گردد. این که با سقوط جرم به سمت مرکز قرص انرژی پتانسیل‌گرانشی آن آزاد می‌گردد و هرچه جرم به مرکز قرص نزدیک‌تر می‌گردد بیشتر در قید گرانش جرم مرکزی قرارمی‌گیرد، این پدیده معادل است با اینکه قرص رفته رفته بیشتر در پتانسل جرم مرکزی فرو می‌رود. البتّه قسمت کوچکی از موادّ بیرونی هم تکانه زاویه‌ای دریافت می‌کنند و به خارج قرص می‌روند که این مقدار ناچیز است.

۱-۶-۱ تأثیر خودگرانش بر قرص برافزایشی

در ابتدا به تعریف خودگرانش می‌پردازیم در واقع تأثیری را که در اثر گرانش لایه‌های داخلی قرص به قسمت‌های بیرونی آن وارد می‌شود، خودگرانش می‌نامیم. این مسلّم است که در اجرام سنگینی چون سیاهچاله‌ها این اثر بسیار قابل توجّه می‌باشد امّا خودگرانش در یک قرص برافزایشی زمانی نقش مؤثّری دارد که یا نسبت شتاب خودگرانش به شتاب جسم مرکزی کوچک نباشد و یا جرم قرص نسبت به جرم جسم مرکزی قابل ملاحظه باشد. که ما در این کار از آن چشم پوشی نموده ایم و به طور معمول به همراه مدل بتا کاربرد دارد.

۱-۷ انتقال اندازه حرکت زاویه‌ای

وقتی قرص‌های برافزایشی را با یک شارّه در حال برافزایش در نظر بگیریم در اصل یک جرم را که با حرکت شعاعی و چرخش حول محور مرکزی می‌چرخد در نظر گرفته‌ایم و ذرّات گاز در مدارهایی در مسیر مارپیچی دایروی حول محور در حال دوران هستند در صورتی که برآیند نیروهای خارجی صفر باشد، با حرکت به سمت داخل گشتاور اندازه حرکت زاویه‌ای کاهش می‌یابد، و قسمت‌های خارجی تکانه‌ای زاویه‌ای را بدست می‌آورند و به صورت مارپیچی می‌چرخند. در واقع مثل این است که تکانه‌ی زاویه‌ای از لایه‌های داخلی به سمت بیرون انتقال می‌یابد. امّا قسمتی از انرژی ذرّات به این صورت به لبه‌های بیرونی انتقال می‌یابد و قسمت دیگر به دلیل وشکسانی و عوامل اتلافی به صورت گرمایش محیط ظاهر می‌شود تا اینکه در انتها، کسر قابل توجّهی از آن در هنگام رسیدن ذرّه به قست داخلی آزاد می‌گردد، در اثر این فرآیند انرژی از قرص آزاد می‌شود و اکثر انرژی آزاد شده توسّط قرص برافزایشی از

لبه داخلی آن صورت می‌گیرد که با استفاده از قضیّه‌ی ویریال سهم انرژی جنبشی مواد در مرز داخلی برابر نصف انرژی پتانسیل‌گرانشی است[۹] که ذرّات درچرخشی مارپیچی تا لبه‌ی قرص از دست می‌دهند. در یک سری مطالعات چنین بدست آمد که درخشندگی برافزایش تابش شده از ناحیه مرزی قرص با تابش تمام قسمت‌های قرص درجه اهمّیّت یکسانی دارد[۱].

برای درک سازوکار انتقال تکانه‌ی زاویه‌ای توسّط جریان‌های وشکسانی لایه‌های مختلف قرص برافزایشی معمولاً از الگوی لیندن بل [۱۷] وپرنیگل [۱۸] استفاده می‌شود. در این الگو دو جرم در نظر گرفته می‌شود که حول جرم مرکزی درحال دوران هستند. وشکسانی همان سایش لایه‌ها در سیّالات می‌باشد(مثل اصطکاک در جامدات) وشکسانی باعث می‌شود که تکانه زاویه‌ای از عناصر نزدیک‌تر گاز به عناصر دورتر انتقال یابد. وقتی شعاع کوچک است مواد با سرعت کپلری بیشتری نسبت به موادّ لایه‌ی بزرگ‌تر می‌چرخند وبه سمت ستاره مرکزی فرو ریزش می‌کنند. در صورتی که دو لایه مختلف ۱و۲ را در نظر بگیریم ۱ با سرعت بیشتری در شعاع کمتری حول مرکزی در حال چرخش است چون اندازه حرکت پایسته است:

$$J_۱ = J_۲$$

$$m_۱ r_۱ v_۱ = m_۲ r_۲ v_۲$$

عقیده‌ی اساسی درباره قرص‌های برافزایشی بر این اساس است که وشکسانی باعث می‌شود انرژی پتانسیل‌گرانشی به انرژی گرمایی تبدیل شود و این گرما به صورت تابش از محیط خارج‌گردد. با حرکت مارپیچی گاز به سمت جرم مرکزی، هرچه جرم به جرم مرکزی نزدیک‌تر باشد میزان انرژی آزاد شده افزایش می‌یابد، در واقع به همین دلیل است که بیشترین انرژی آزاد شده از لبه‌ی داخلی قرص است.

۱-۸ پهن‌رفت

پهن‌رفت وقتی به وقوع می‌پیوندد که بخش کوچکی از انرژی تولیدی توسّط وشکسانی، تابش شود در واقع سرد شدن در اثر تابش به اندازه‌ای کم است که نقش آن را می‌توان بدون اهمّیّت در نظر گرفت، بنابراین انرژی تولیدی از طریق دیگری غیر از تابش به سمت جسم مرکزی منتقل می‌شود که به آن پهن‌رفت می‌گویند. در واقع قرص‌های $ADAF$ زیر مجموعه‌ای از یک دسته قرص‌های

[۱۷] Lynden-Bel

[۱۸] Pringle

برافزایشی موسوم به تابش ناکارآمد هستند در این دسته قرص‌ها تابش انجام نمی‌شود یا به دلیل ضخامت اپتیکی بالای محیط، در محیط گیرکرده و باعث افزایش دمای محیط می‌گردد. در واقع در مدل استاندارد(SSD) انرژی اتلافی به صورت مؤثّر تابش می‌شود ودر نتیجه دمای قرص کاهش می‌یابد در قرص‌های برافزایشی پهن‌رفت غالب انرژی به سمت داخل پهن‌رفت می‌یابد و باعث می‌شود که دمای سیّال بالا برود در نتیجه دمای مرکزی بالاتری را نسبت به سایر قرص‌های برافزایشی شاهد هستیم.

۱-۹ مقاومت مغناطیسی

تأثیر میدان مغناطیسی در قرص‌های برافزایشی به خاطر اینکه یکی از منابع قوی میدان مغناطیسی در عالم همان ستاره‌ها می‌باشند مخصوصاً در ستارهای نوترونی بسیار با اهمّیّت است، شواهدی از وجود میدان‌های مغناطیسی در قرص‌های برافزایشی نیز مشاهده شده است، بعضاً این قرص‌های برافزایشی دارای میدان مغناطیسی بسیار قوی هستند، این میدان مغناطیسی باعث می‌شود که ما با یک سیّال یونیده مواجه باشیم، علاوه براین خطوط میدان مغناطیسی با این قدرت می‌توانند روی مسیر حرکت ذرّات بسیارتأثیر گذار باشند.

اثر میدان مغناطیسی تا حدّی است که می‌تواند حتّی باعث خروج مادّه از قرص شود که به نام‌های باد [۱۹] و جت [۲۰] نزد اخترفیزیکدانان شناخته شده‌اند، در واقع اینجا لازم است تعریف مختصری راجع به خروجی‌ها ارائه گردد بدین صورت که تنها در صورتی شارّه‌ی خروجی را جت می‌نامند که از نواحی مرکزی قرص اتفاق بیفتد و اگر از نواحی میانی قرص صورت گیرد آن را باد می‌نامند، البتّه هردوی این شارّه‌های خروجی در جهت خطوط میدان هستند، از این طریق در واقع کسر عمده‌ای از انرژی برافزایشی از سیستم خارج می‌شود. در صورتی که فشار مربوط به اندازه حرکت غلبه داشته باشد خطوط میدان مغناطیسی تحت تأثیر جریان برافزایشی خم می‌شود وبرعکس اگر میدان مغناطیسی قوی‌تر باشد مسیر حرکت ذرّات تحت تأثیر خطوط میدان مغناطیسی منحرف خواهند شد.

بررسی هویل در سال ۱۹۶۰ نشان می‌دهد که مهم‌ترین برهمکنش بین قرص و ستاره ناشی از میدان مغناطیسی ستاره است در سال ۲۰۰۰ کابوراکی [۲۱] به حلّ عمومی $ADAF$ با میدان مغناطیسی اقدام کرده است [۱۳] و نشان داد که میدان در ایجاد شار خروجی سهیم است. مقاومت مغناطیسی را می‌توان به صورت بر همکنش بین میدان مغناطیسی و مادّه در حال برافزایش تعریف کرد. در مورد نحوه‌ی به دست آوردن رابطه‌ی القا به طور مفصّل درفصل دوم توضیح داده‌ایم. امّا برای ساده شدن از فرضی که

[۱۹] wind

[۲۰] jet

[۲۱] Kaburaki