

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری



دانشگاه دامغان

دانشکده فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد  
فیزیک (گرایش نجوم و اختر فیزیک)

**حل خودمشابهی قرص های خودگرانشی با پهن رفت**

**غالب در حضور میدان مغناطیسی چنبره ای**

توسط:

**امین مصلی نژاد**

استادان راهنما:

**دکتر شهرام عباسی**

**دکتر جمشید قنبری**

آذر ۱۳۸۹



به نام خدا

## حل خودمشابهی قرص های خودگرانشی با پهن رفت

### غالب در حضور میدان مغناطیسی چنبره ای

توسط:

امین مصلی نژاد

#### پایان نامه

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه به عنوان بخشی از فعالیت های تحصیلی لازم

برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

#### در رشته

فیزیک (گرایش نجوم و اختر فیزیک)

از دانشگاه دامغان

ارزیابی و تأیید شده توسط کمیته پایان نامه با درجه:

دکتر شهرام عباسی استادیار دانشگاه دامغان (استاد راهنما)

دکتر جمشید قنبری استاد دانشگاه فردوسی مشهد (استاد راهنما)

دکتر مسعود جعفری استادیار دانشگاه دامغان (داور اول)

دکتر کاظم فاقعی استادیار دانشگاه دامغان (داور دوم)

دکتر هادی شفائی مقدم استادیار دانشگاه دامغان (نماینده تحصیلات تکمیلی)

آذر ۱۳۸۹

تقدیم بہ پدر بزرگوار و مادر مہربانم

# سپاسگزاری

با سپاس فراوان از زحمات بی دریغ استاد بزرگوارم، جناب آقای دکتر شهرام عباسی که  
برایم راهنمایی فرزانه و معلمی دلسوز بوده و همواره از رهنمودهای استادانه و حمایت  
های بی دریغ ایشان بهره مند بوده ام

با تشکر از استادم جناب آقای دکتر جمشید قنبری که در انجام مراحل مختلف تحقیق  
از راهنمایی های ایشان بهره مند بوده ام

از آقایان دکتر مسعود جعفری و دکتر کاظم فاقعی که زحمت مطالعه و داوری پایان نامه  
اینجانب را به عهده گرفته اند، بسیار ممنونم

از کلیه اساتید گروه فیزیک دانشگاه دامغان، بویژه جناب آقای دکتر نیما قلعه که افتخار  
شاگردی ایشان را داشته ام، کمال تشکر را دارم

## چکیده

# حل خودمشابهی قرص های خودگرانشی با پهن رفت غالب در حضور میدان مغناطیسی چنبره ای

به وسیله‌ی:

امین مصلی نژاد

در این کار تاثیر خودگرانش عمودی بر ساختار دینامیکی قرص های برافزایشی پهن رفت غالب (ADAFs) در اطراف اجرام مرکزی با استفاده از روش خود مشابه مورد بررسی قرار می گیرد. قرص را پایا، دارای تقارن محوری و از نظر هندسی باریک در نظر گرفته ایم. همچنین قرص متلاطم و دارای وشکسان تلاطمی است. فرض می کنیم که انرژی اتلافی ناشی از وشکسانی تلاطمی در تعادل با انرژی های تابشی و پهن رفتی باشد و میدان مغناطیسی قرص ساختار چنبره ای داشته باشد. نتایجی که بدست آورده ایم نشان می دهد افزایش پارامتر خودگرانش ( $D = 2 \frac{M_d}{M_*}$ ) تا مقدار  $D = 2$  (زمانی که جرم قرص و جرم ستاره مرکزی برابر شوند)، منجر به کاهش محسوس در ضخامت قرص می گردد. برعکس افزایش میدان مغناطیسی باعث ضخیم تر شدن قرص می شود.

# فهرست مطالب

ه	فهرست مطالب
۱	مقدمه ای بر قرص های برافزایشی
۱	۱-۱ مقدمه . . . . .
۲	۲-۱ منابع اصلی انرژی در عالم . . . . .
۴	۳-۱ کشف اختروش ها . . . . .
۶	۱-۳-۱ معمای انرژی اختروش ها . . . . .
۸	۴-۱ الگوی قرص برافزایشی . . . . .
۹	۵-۱ مفهوم قرص برافزایشی . . . . .
۱۲	۱-۵-۱ دما، طیف و درخشندگی قرص های استاندارد . . . . .
۱۴	۶-۱ مروری رصدی بر اجرام دارای قرص برافزایشی . . . . .
۱۴	۱-۶-۱ اجرام ستاره ای جوان . . . . .
۱۷	۲-۶-۱ متغیرهای کاتاکلیسمی و منابع پرتوی ایکس ضعیف . . . . .
۲۱	۳-۶-۱ دوتایی های پرتوی ایکس و منابع با درخشندگی بالا . . . . .
۲۴	۴-۶-۱ دوتایی های شامل سیاهچاله و اختروش های کوچک . . . . .
۲۵	۵-۶-۱ منابع پرتوی ایکس فوق درخشان . . . . .
۲۵	۶-۶-۱ هسته های کهکشانی فعال . . . . .

۲۸	فرایندهای فیزیکی مربوط به برافزایش	۲
۲۸	درخشندگی ادینگتون	۱-۲
۳۱	برافزایش بوندی	۲-۲
۳۴	سازوکار انتقال تکانه زاویه ای	۳-۲
۳۶	نقش خود گرانش در قرص های برافزایشی	۴-۲
۳۷	شتاب گرانشی در یک قرص نازک برافزایشی	۱-۴-۲
۳۸	اثر خود گرانش در راستای شعاعی	۲-۴-۲
۳۹	اثر خود گرانش بر ساختار عمودی	۳-۴-۲
۴۲	روابط و محاسبات	۳
۴۲	مقدمه	۱-۳
۴۳	روابط اساسی	۲-۳
۴۴	معادله پیوستگی	۱-۲-۳
۴۵	معادله اندازه حرکت	۲-۲-۳
۵۱	معادله انرژی	۳-۲-۳
۵۲	معادله القا	۴-۲-۳
۵۴	حل خود مشابه	۳-۳
۶۵	نتایج	۴
۶۵	مقدمه	۱-۴
۶۶	بررسی و تحلیل نمودارها بر حسب پارامتر پهن رفت $f$	۲-۴
۶۶	بررسی نمودارهای سرعت شعاعی	۱-۲-۴
۶۸	بررسی نمودارهای سرعت چرخشی	۲-۲-۴
۷۱	بررسی نمودارهای ضخامت قرص برافزایشی	۳-۲-۴
۷۴	بررسی و تحلیل نمودارها بر حسب پارامتر خودگرانش $D$	۳-۴
۷۴	بررسی نمودارهای سرعت شعاعی	۱-۳-۴
۷۷	بررسی نمودارهای سرعت چرخشی	۲-۳-۴



۳-۳-۴ بررسی نمودارهای ضخامت قرص برافزایشی . . . . . ۷۹

۸۲

مراجع

# فصل ۱

## مقدمه ای بر قرص های برافزایشی

### ۱-۱ مقدمه

سال ها این تصور وجود داشت که واحد های پایه از اجزای اصلی عالم را ستاره ها تشکیل می دهند و هر چه در آسمان مشاهده می شود، همه ستاره اند. خوشه های ستاره ای و کهکشان ها مجموعه ای از ستاره ها هستند و توزیع شبکه ای از کهکشان ها، ساختار بزرگ مقیاسی از عالم را بوجود می آورد. از سوی دیگر، از آنجا که انرژی ستاره ها از برهم کنش های هسته ای مراکز آنها تامین می شود، این باور وجود داشت که فرایند هسته ای مهمترین فرایند تولید انرژی در عالم است. اما در طول دهه های اخیر، با کشف اختروش ها<sup>۱</sup> و در ادامه، قرص های برافزایشی<sup>۲</sup>، این تصور کاملاً دگرگون شده است. در حقیقت در این پدیده ها بر خلاف ستاره ها، انرژی گرانشی نقش غالب را بازی می کند.

در مقایسه با ستاره ها که از زمان های باستان شناخته شده اند، قرص های برافزایشی در اواسط قرن بیستم کشف شده اند. در نتیجه می توان گفت که قرص های برافزایشی اجرام جدیدی در عالم محسوب می شوند. به دلیل اینکه در فرایند برافزایش، توده ای از ماده ی چرخان تحت تاثیر پتانسیل جسم مرکزی، به صورت مارپیچ بر روی سطح جسم مرکزی فرو می ریزد، احتمال حضور این قرص ها در اطراف ستاره های فشرده و با گرانش قوی، از جمله سیاهچاله ها، که در حقیقت مراحل پایانی از

---

<sup>۱</sup>Quasars

<sup>۲</sup>Accretion Disks

عمر یک ستاره محسوب می شوند بیشتر می شوند. از آنجا که اطلاعات رصدی ما در مورد سیاهچاله ها بسیار کم است، بر پایه اطلاعاتی که از تاثیر سیاهچاله ها بر محیط های اطرافشان (قرص های برافزایشی) بدست می آید، می توانیم درک کاملتری از سیاهچاله ها و خصوصیات آنها داشته باشیم. از طرف دیگر وجود قرص های برافزایشی در اطراف پیش ستاره ها<sup>۳</sup> یعنی مراحل آغازین تشکیل ستاره ها نیز اثبات شده است. امروزه داده های رصدی بسیاری وجود دارد که نشان می دهد در زایشگاه ستاره ها (محیط های میان ستاره ای) در اطراف پیش ستاره ها، معمولاً قرص های عظیمی از ماده وجود دارد. همچنین قرص های برافزایشی را از جمله علل اصلی پدیده های دیگر فعال در عالم از قبیل، شکل گیری سیستم های سیاره ای، تحول ستاره های دوتایی، تولید جت های اخترفیزیکی، حتی شکل گیری کهکشان ها و انفجارهای پرتوی گاما می دانند. در نتیجه، تلاش جهت درک این پدیده، چه از دیدگاه رصدی و چه از منظر نظری، معادل با درک و کسب دانش در مورد پدیده های ناشناخته و پر رمز و راز عالم به شمار می رود. به این ترتیب علم نجوم یک گام به هدف اصلی خویش، یعنی درک صحیح عالم نزدیک تر خواهد شد.

لذا به دلیل اهمیت قرص های برافزایشی و فرایند برافزایش در اخترفیزیک، در این فصل، به بررسی اهمیت انرژی گرانشی در عالم، ایجاد تصویری پایه ای از قرص های برافزایشی و همچنین بیان شواهد رصدی دال بر وجود قرص های برافزایشی در اجرام اخترفیزیکی مختلف می پردازیم.

## ۲-۱ منابع اصلی انرژی در عالم

امروزه برای همه ما روشن است که منبع اصلی انرژی ستاره ها، همجوشی هسته ای است که در هسته های آنها به وقوع می پیوندد. اما به لحاظ تاریخی، نامزدهای دیگری از قبیل انرژی شیمیایی و انرژی گرانشی نیز به عنوان منابع انرژی در ستاره ها در نظر گرفته شده اند. در این بخش، این منابع انرژی را از نقطه نظر بازده تبدیل این انرژی ها نسبت به انرژی سکون مقایسه خواهیم کرد.

برای شروع، خورشید را به عنوان ستاره نمونه در نظر گرفته و ضریب بازده را برای آن محاسبه می کنیم. می دانیم که خورشید ستاره ای با جرم  $M_{\odot} = 1.99 \times 10^{33} g$ ، درخشندگی  $L_{\odot}$  و عمر  $\tau_{\odot} = 4.6 \times 10^9 yr$  و  $3.85 \times 10^{33} erg s^{-1}$  است. پس اگر فرض کنیم، درخشندگی

<sup>۳</sup>Protostars

خورشید در طول مدت عمر آن ثابت بماند، انرژی کل آزاد شده از خورشید، برابر است با:

$$E_{\odot} = L_{\odot} \tau_{\odot} = 5/60 \times 10^{50} \text{ erg} \quad (1.1)$$

همچنین انرژی سکون کل خورشید نیز برابر می شود با:

$$M_{\odot} c^2 = 1/79 \times 10^{54} \text{ erg} \quad (2.1)$$

در نتیجه نسبت انرژی تابشی کل خورشید به انرژی سکون کل آن یا همان  $\eta_{\odot}$ ، برابر خواهد شد با:

$$\eta_{\odot} = \frac{L_{\odot} \tau_{\odot}}{M_{\odot} c^2} = 0/000313 \quad (3.1)$$

که پارامتر بدون بعد سیستم از نقطه نظر انرژی است. واضح است که بازده واقعی منبع انرژی خورشیدی باید از این مقدار تخمینی بدست آمده، بزرگتر باشد.

از انرژی شیمیایی، یعنی انرژی پیوندی اتم ها یا مولکول ها شروع می کنیم. در اثر سوختن یک کیلوگرم بنزین به طور کامل، در حدود  $4/2 \times 10^{14} \text{ erg}$  انرژی آزاد می شود. در این صورت بازده تبدیل این انرژی نسبت به انرژی سکون برابر با  $5 \times 10^{-10}$  خواهد شد. واضح است که این مقدار، بسیار کوچکتر از بازده بدست آمده برای خورشید می باشد. پس به جرات می توان گفت، انرژی شیمیایی منبع انرژی ستاره ها محسوب نمی شود.

دومین نامزد انرژی ستاره ها، انرژی گرانشی است. اگر جسمی به جرم  $M$ ، تحت تاثیر گرانش از بینهایت تا شعاع  $R$  منقبض شود، به طور تقریبی انرژی گرانشی به اندازه  $\frac{GM^2}{R}$ ، آزاد می شود، در حالی که انرژی سکون آن برابر با  $Mc^2$  است. پس بازده انرژی گرانشی،  $\eta_G$  در مورد خورشید برابر می شود با:

$$\eta_G \sim \frac{GM}{Rc^2} \sim 2 \times 10^{-6} \quad (4.1)$$

این مقدار بازده بدست آمده، نیز به اندازه کافی کوچک است. بنابراین نمی توان انرژی گرانشی را به عنوان منبع انرژی خورشیدی در نظر گرفت، اگرچه ممکن است این منبع انرژی در فاز تولد ستاره ها بسیار مهم باشد.

حال به بررسی انرژی هسته ای می پردازیم. در فرایند همجوشی هسته ای هیدروژن، زمانی که چهار هیدروژن به یک هلیوم تبدیل شود، کسر انرژی برای هر ذره برابر است با:

$$(4 \times 1/0079 - 4/0026)/4 \sim 7 \times 10^{-3} \quad (5.1)$$

بنابراین بازده همجوشی هسته ای هیدروژن،  $\eta_N \sim 0.007$  محاسبه خواهد شد. این مقدار، برای تامین انرژی خورشیدی کافی است. بنابراین، اگر ما یک ستاره معمولی مانند خورشید را در نظر بگیریم، انرژی هسته ای بهترین منبع انرژی به شمار می رود. اما این منبع انرژی برای مدت زیادی، به عنوان منبع اصلی انرژی در اجرام اخترفیزیکی فشرده، مانند ستاره های نوترونی یا سیاهچاله ها در نظر گرفته نشد.

### ۳-۱ کشف اختروش ها

پس از جنگ جهانی دوم، نجوم رادیویی با پیشرفت های بزرگی همراه بود. چندین پروژه رصدی در فاز رادیویی، آسمان را به صورت کاملاً دقیق مورد بررسی قرار دادند و فهرست هایی از منابع رادیویی نیز در آن زمان تهیه شد. برای مثال، در سال ۱۹۵۹ فهرست رادیویی با عنوان فهرست  $3C$ ، توسط دانشگاه کمبریج تهیه شد که نام ۴۷۱ جرم در آن ثبت شده بود. بر پایه این فهرست های تهیه شده، شناسایی اپتیکی این نقاط نیز آغاز شد.

به عنوان نمونه، متیو<sup>۴</sup> و سندگ<sup>۵</sup>، در سال ۱۹۶۰ با استفاده از تلسکوپ پنج متری رصدخانه پالومار، ستاره ای با قدر ۱۶ را در موقعیت  $3C\ 48$  از فهرست سوم کشف کردند [۲۳]. این ستاره در مقایسه با یک ستاره معمولی به شدت آبی به نظر می رسید، در بازه زمانی یک ساله یا کمتر، روشنایی خود را تغییر می داد، دارای سحابی کم نوری در اطراف خود بود و یک ستاره معمولی به نظر نمی رسید. بلافاصله گرینستین<sup>۶</sup> طیف این ستاره، را که طیف گسترده به نظر می رسید، بدست آورد. او نتیجه گرفت که این حالت طیفی ناشی از فلز است و به این دلیل آن را ستاره ای عجیب خواند [۱۴].

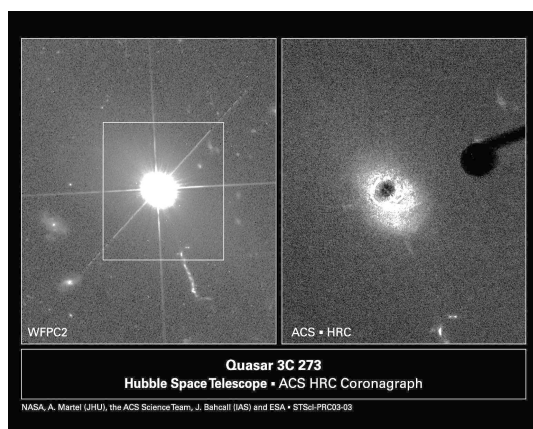
علاوه بر این، در سال ۱۹۶۲ در زمان غیبت ماه، هازارد<sup>۷</sup> و همکارانش منبع رادیویی عجیب دیگری را با قدر ۱۳ شناسایی کردند. آن ها همچنین موقعیت دقیق مولفه های  $A$  و  $B$  این ستاره را نیز تعیین کردند. مولفه اول منبعی نقطه ای بود و مولفه دوم ساختاری جت مانند از خود نشان می داد [۱۷].

<sup>۴</sup>Matthews

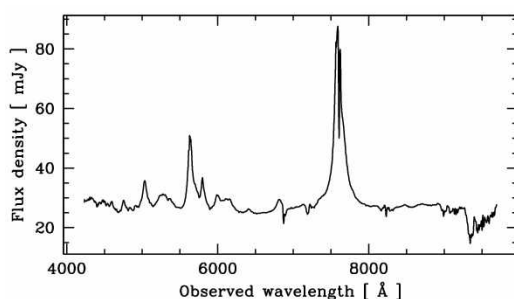
<sup>۵</sup>Sandage

<sup>۶</sup>Greenstein

<sup>۷</sup>hazard



شکل ۱-۱: اختروش درخشان ۳C ۲۷۳



شکل ۱-۲: طیف اختروش ۳C ۲۷۳

در اواخر همان سال، اشمیت<sup>۱</sup> با بدست آوردن طیف این ستاره متوجه حضور شش خصوصیت نشری عجیب در طیف آن شد (شکل ۱-۲). در فوریه سال ۱۹۶۳، اشمیت نشان داد که این خطوط طیفی، تنها خطوط هیدروژن بالمری هستند که به سمت طول موج‌های بالاتر تغییر طول موج دادند [۳۱]. این لحظه را زمان کشف اختروش‌ها قرار دادند.

بحث‌های زیادی راجع به این که آیا اختروش‌ها، ابرککهکشان هستند یا اجرام درون کهکشانی مطرح شد. اما از آنجایی که قرمزگرایی بزرگ گرانشی می‌تواند ناشی از یک نقطه، با گرانش بسیار قوی باشد، بنابراین اگر این خطوط اپتیکی از مجاورت اجرامی نسبیتی از قبیل سیاهچاله‌ها ناشی شوند، اختروش‌ها می‌بایست اعضای از کهکشان ما باشند. اما امروزه ما اعتقاد داریم اختروش‌ها، اجرامی کیهانی اند و قرمزگرایی بزرگ آنها، نشان دهنده انبساط کیهانی است.

همچنین مقدار انرژی عظیم آزاد شده از آن‌ها، نیز معمای آن روزها بود. برای مثال در مورد ۳C ۲۷۳، انرژی تابشی که بر پایه درخشندگی ظاهری و فاصله تخمین زده شده از طریق قرمزگرایی

<sup>۱</sup>Schmidt

بدست آمده، بالغ بر  $10^{47} \text{ erg s}^{-1}$  است. در حالی که یک کهکشان معمولی حدود  $10^{44} \text{ erg s}^{-1}$  انرژی تابش می کند که با این حساب، تابش حاصل از  $273 \text{ C}$  هزاران بار بیشتر از یک کهکشان معمولی است و بعلاوه، این حجم عظیم انرژی از یک اختروش نقطه ای، تابش می شود.

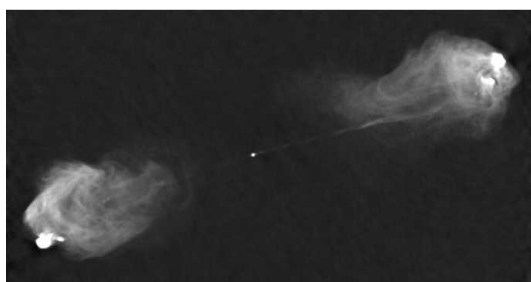
### ۱-۳-۱ معمای انرژی اختروش ها

اختروش ها، اجرامی با درخشندگی قابل توجه هستند و در همه طول موج های امواج الکترومغناطیس، از امواج رادیویی گرفته تا اشعه ایکس و گاما تابش دارند. علاوه بر این، دائماً درخشندگی آنها تغییر می کند. انرژی کل تابش شده از اختروش ها  $E \sim \tau.L$  است که در اینجا  $L$  درخشندگی و  $\tau$  عمر اختروش ها است. البته این درخشندگی، از قرمزگرایی و درخشندگی ظاهری بدست می آید. این درخشندگی منحصر به فرد، در حدود  $10^{45-46} \text{ erg s}^{-1}$  در نظر گرفته می شود. از سوی دیگر، عمر اختروش ها نیز از گستردگی ساختارهای رادیویی موجود در اطرافشان محاسبه می شود. به این صورت که اغلب در اطراف اختروش ها انبساط های رادیویی وجود دارد و اعتقاد بر این است که از مرکز آنها نشئت گرفته اند. بنابراین اگر این پهن شدگی امواج رادیویی را بر سرعت نور تقسیم کنیم، کمینه عمر آنها بدست می آید (شکل ۱-۳). به عنوان نمونه عمر آنها  $\tau \gtrsim 10^6 \text{ yr}$  است. با توجه به این مقدار برای عمر آن ها، انرژی تابشی کل  $E \gtrsim 10^{60} \text{ erg}$  خواهد شد.

اگر اندازه منابع انرژی را بینهایت کوچک در نظر بگیریم، انتظار داریم در بازه زمانی بسیار کوچکی تغییر کنند، اما در حالت کلی، اگر اندازه منبع محدود باشد، بازه زمانی تغییرات نیز محدود خواهد شد. این بازه زمانی توسط رابطه  $t \gtrsim R/c$  با شعاع،  $R$ ، مرتبط است. به بیان دیگر، زمانی که منبع در بازه  $t$  تغییر کند، ابعاد منبع انرژی نیز باید  $R \lesssim ct$  شود. در بیشتر موارد، درخشندگی اختروش ها در بازه زمانی یک روزه یا کمتر از یک روز تغییر می کند. با توجه به نتایج رصدی، اندازه منبع انرژی اختروش ها باید کوچک تر از یک روز نوری باشد،

$$R \lesssim \text{one light day} \sim 10^{15} \text{ cm} \quad (6.1)$$

با توجه به اینکه منبع انرژی اختروش ها اساساً حدود  $10^{60} \text{ erg}$  انرژی تابش می کند و اندازه ای کوچک تر از یک روز نوری ( $10^{15} \text{ cm}$ ) دارد، انرژی هسته ای و انرژی گرانشی را به عنوان نامزدهای منابع انرژی اختروش ها با یکدیگر مقایسه می کنیم.



شکل ۱-۳: ساختار دوگانه از کهکشان رادیویی Cyg A

از آنجایی که در بخش های پیشین بازده سوخت هیدروژن،  $\eta_N \sim 0.007$  بدست آمد، گاز هیدروژنی با جرم  $M$  زمانی که به طور کامل بسوزد و به هلیوم تبدیل شود، انرژی معادل با  $0.007Mc^2$  آزاد می کند. به این ترتیب جرمی معادل با  $10^8 M_\odot$  هیدروژن قادر به تولید  $10^{60}$  انرژی هسته ای مورد نیاز در اختروش ها است. اما اگر این جرم عظیم در محدوده ای کوچک به ابعاد یک روز نوری گنجانده شود، مقدار انرژی گرانشی آزاد شده به مراتب بزرگتر از انرژی هسته ای خواهد شد. همان گونه که تا کنون بیان شد، انرژی گرانشی برای جسمی به جرم  $M$  و اندازه  $R$  به طور تخمینی برابر با  $E \sim \frac{GM^2}{R}$  است.

بنابراین اگر جسمی به جرمی  $10^8 M_\odot$  را در فضایی کوچکتر از یک روز نوری ( $\sim 10^{15} \text{ cm}$ ) محدود کنیم، انرژی گرانشی آزاد شده، بزرگتر از  $10^{60}$   $\text{erg}$  خواهد شد. در نتیجه برخلاف ستاره ها که منبع انرژی اصلی، گداخت هسته ای است، در اختروش ها انرژی گرانشی نقش غالب را بازی می کند. در مورد ستاره ها، پتانسیل گرانشی در واحد جرم در سطحشان و همچنین بازده تولید انرژی گرانشی به مراتب کوچکتر است. اما این بازده با عمیق تر شدن پتانسیل افزایش می یابد. در مورد سیاهچاله ها این بازده از  $0.057$  برای سیاهچاله شوارزشیلد<sup>۹</sup> (غیرچرخشی) تا  $0.42$  برای سیاهچاله های کر<sup>۱۰</sup> (چرخشی) تغییر می کند.

<sup>۹</sup>Schwarzschild

<sup>۱۰</sup>Kerr



## ۴-۱ الگوی قرص برافزایشی

در این بخش به بیان تاریخچه ای مختصر از قرص های برافزایشی و الگوهایی که تا کنون در این زمینه ارائه شده می پردازیم. در انتهای این بخش نیز الگوی قرص برافزایشی استاندارد مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

در بخش های پیشین ما انرژی گرانشی بین اجرام جاذب را در محیطی کاملاً منزوی به طور تخمینی محاسبه کردیم. هنگامی که گاز بر اثر گرانش بر روی اجسام فشرده فرو می ریزد، مقداری از انرژی گرانشی گاز آزاد می شود که به این فرایند، فرایند برافزایش جرمی اتلاق می شود. از آنجایی که فرایند برافزایش با آزاد شدن انرژی گرانشی همراه است، اهمیت این فرایند از جنبه های مختلفی در نجوم مورد بررسی قرار گرفته است.

در سال ۱۹۶۴، زل دوویچ<sup>۱۱</sup> و ناویکو<sup>۱۲</sup> و همچنین سالپتر<sup>۱۳</sup> به طور جداگانه، به بررسی اهمیت آزاد شدن انرژی گرانشی مربوط به فرایند برافزایش پرداختند [۳۹][۳۰]. البته آنها سیستمی منزوی را در نظر گرفته بودند. در ادامه هایاکاوا<sup>۱۴</sup> و ماتسوکا<sup>۱۵</sup> (۱۹۶۴)، فرایند برافزایش را برای سیستم های دوتایی در نظر گرفتند [۱۶]. مدتی بعد، لیندل-بل<sup>۱۶</sup> (۱۹۶۹) به منظور توضیح منبع انرژی اخترش ها مفهوم قرص برافزایشی وشکسان<sup>۱۷</sup> در اطراف ابرسیاهچاله را مطرح کرد که امروزه نیز از منظر رصدی اثبات شده است [۲۱].

در آن زمان ها تلاش های بسیاری جهت ساختن الگویی استاندارد در این زمینه صورت گرفت تا این که سرانجام شاکورا و سانویو<sup>۱۸</sup> (۱۹۷۳)، الگویی بنیادی پیشنهاد کردند که امروزه به الگوی قرص برافزایشی استاندارد یا به اختصار الگوی آلفا معروف است [۳۲]. البته حالت نسبی این الگو در همان

---

<sup>۱۱</sup>Zeldovich

<sup>۱۲</sup>Novikov

<sup>۱۳</sup>Salpeter

<sup>۱۴</sup>Hayakawa

<sup>۱۵</sup>Matsuoka

<sup>۱۶</sup>Lynden-Bell

<sup>۱۷</sup>Viscous Accretion Disks

<sup>۱۸</sup>Shakura and Sunyaev

سال توسط ناویکو<sup>۱۹</sup> و تورنه<sup>۲۰</sup> ارائه شد [۲۸]. بر طبق نظریه شاکورا-سانیو، از آنجایی که انرژی گرانشی برای تبدیل به تابش کافی است، ما قرصی روشن را مشاهده می کنیم. در اواخر سال ۱۹۸۰، آبروموویچ و همکارانش<sup>۲۱</sup> الگوی قرصهای لاغر را ارائه کردند که در الگوی آنها، قرص از لحاظ اپتیکی ضخیم و داغ بود و انرژی پهن رفتی<sup>۲۲</sup> نقشی غالب را در تعادل انرژی بازی می کرد [۲]. علاوه بر این الگو، نارایان و یی<sup>۲۳</sup> (۱۹۹۴) اهمیت انتقال انرژی پهن رفتی را در الگوی قرص نازک بررسی کردند که امروزه به الگوی ADAFs<sup>۲۴</sup> معروف است [۲۵]. این الگو نیز همانند الگوی قرصهای لاغر از رده الگوهای سیال برافزایشی تابش ناکارآمد است (RIAFs<sup>۲۵</sup>). بررسی الگوی ADAFs تاکنون نیز ادامه دارد و محققین زیادی به بررسی این الگو از جنبه های گوناگون پرداخته اند.

## ۵-۱ مفهوم قرص برافزایشی

همان گونه که تا کنون بیان شد، قرص های برافزایشی، قرص های گازی چرخان به همراه سیال برافزایشی هستند که در اطراف اجرام گرانشی، از قبیل پیش ستاره ها<sup>۲۶</sup>، ستاره های رشته اصلی (MSs)<sup>۲۷</sup>، کوتوله های سفید (WDs)<sup>۲۸</sup>، ستاره های نوترونی (NSs)<sup>۲۹</sup> و سیاهچاله ها (BHs)<sup>۳۰</sup> شکل می گیرند (شکل ۱-۴).

قرص های برافزایشی هم به شکل مستقیم و هم غیر مستقیم از جنبه های مختلفی در عالم رویت

<sup>۱۹</sup>Novikov

<sup>۲۰</sup>Thorne

<sup>۲۱</sup>Abramowicz et al

<sup>۲۲</sup>Advection Energy

<sup>۲۳</sup>Narayan and Yi

<sup>۲۴</sup>Advection Dominated Accretion Flows

<sup>۲۵</sup>Radiatively Inefficient Accretion Flows

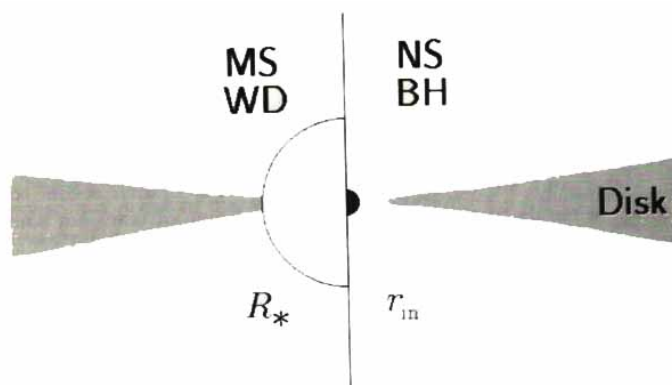
<sup>۲۶</sup>Protostars

<sup>۲۷</sup>Main-Sequence stars

<sup>۲۸</sup>White Dwarfs

<sup>۲۹</sup>Neutron Stars

<sup>۳۰</sup>Black Holes



شکل ۱-۴: تصویری از یک قرص برافزایشی

شده اند. امروزه قرص های برافزایشی را عامل اصلی پدیده های فعال عالم از قبیل، شکل گیری ستاره ها، تابش های با انرژی بالا، تحول دوتایی ها، نواخترها و ابرنواخترهای نوع Ia، ستاره های پرتوی ایکس، اختروش ها، کهکشان های فعال، جت های اخترفیزیکی و ... می دانند.

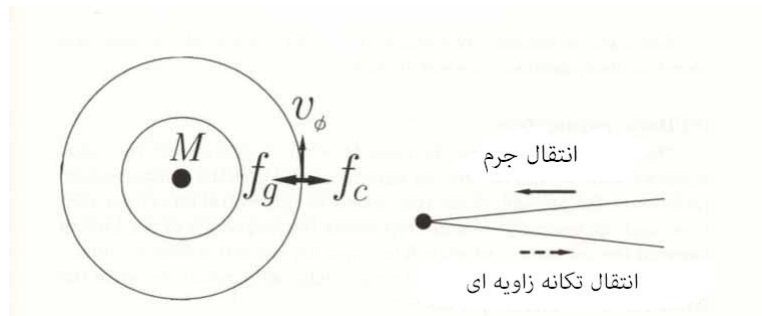
قرص های برافزایشی اساساً از گاز هیدروژن (به شکل یونیده یا گاهی اوقات به شکل مولکولی) تشکیل شده اند و اغلب گاز هلیوم و دیگر عناصر با درصد های کم نیز در آنها یافت می شوند. در تصویر قرص استاندارد کلاسیک، قرص برافزایشی تخت است، یعنی از نظر هندسی نازک است ولی به لحاظ اپتیکی کدر یا مات می باشد که در اصطلاح به آن قرص ضخیم اپتیکی اطلاق می شود. گاز درون قرص در حال چرخش به دور ستاره مرکزی، در شعاع های مختلف دارای سرعت های متفاوتی است (همانند گردش سیارات منظومه شمسی). در این تصویر نیروی گرانش تنها با نیروی گریز از مرکز در تعادل است (شکل سمت چپ ۱-۵). در نتیجه خواهیم داشت:

$$\frac{GM}{r^2} = r\Omega^2 \quad (7.1)$$

که در آن  $G$  ثابت گرانش،  $M$  جرم ستاره مرکزی،  $r$  فاصله از مرکز و  $\Omega$  سرعت زاویه ای است. بنابراین سرعت زاویه ای در بخش داخلی قرص بیشتر از بخش بیرونی است.

$$\Omega = \Omega_K \equiv \sqrt{\frac{GM}{r^3}} \quad (8.1)$$

قانون چرخش جزئی قرص نازک هندسی را عموماً چرخش کپلری می نامند که اندیس  $K$  نیز بیانگر این موضوع است. اما برخلاف سیارات منظومه شمسی، اصطکاک یا وشکسانی نیز در بین لایه های مجاور گاز درون قرص برافزایشی اعمال می شود. در نتیجه گاز شروع به گرم شدن و تابش امواج



شکل ۱-۵: قانون چرخش در یک قرص برافزایشی. نیروی گرانش در تعادل با نیروی گریز از مرکز است (شکل سمت چپ). انتقال جرم و اندازه حرکت زاویه ای (شکل سمت راست).

الکترومغناطیسی می کند. امروزه این اعتقاد وجود دارد که این نوع تابش های امواج الکترومغناطیس منبع اصلی درخشندگی در اخترش ها و منابع پرتوی ایکس در ستاره های دوتایی پرتوی ایکس است. اصطکاک یا وشکسانی در بین لایه های مجاور گاز، اندازه حرکت زاویه ای را نیز به بیرون از قرص منتقل می کند. وجود برهم کنش های حاصل از وشکسانی بین لایه های داخلی و بیرونی گاز باعث می شود که لایه درونی تر قرص که سرعت بیشتری دارند، تکانه زاویه ای خود را اندکی از دست داده و به سمت داخل قرص فروریزش کنند. درحالی که لایه بیرونی که سرعت کمتری داشته، تکانه زاویه ای بدست آورد. بنابراین در حالت کلی، گاز در حال چرخش به سمت ستاره مرکزی فروریزش یا به اصطلاح برافزایش می کند و از طرفی بر طبق این فرایند، تکانه زاویه ای نیز به سمت خارج از قرص انتقال می یابد (شکل سمت راست ۱-۵). زمانی که گاز به صورت پیوسته از بخش های خارج از قرص تامین شود، قرص برافزایشی شکلی پایدار به خود می گیرد.

در نزدیکی اجرام نسبیتی مانند سیاهچاله ها، نیروی جاذبه گرانشی آنقدر از طرف سیاهچاله ها قوی می شود که دیگر مدار پایدار چرخشی برای ذراتی با  $r < r_{in}$  وجود نخواهد داشت. در این رابطه  $r_{in}$  نشان دهنده شعاعی است که برای آن مداری پایدار در نظر گرفته می شود (شکل ۱-۴). در نتیجه قرص برافزایشی دارای یک لبه داخلی خواهد شد. برای مثال در مورد سیاهچاله شوارزشیلد (غیر چرخشی)، شعاع لبه داخلی برابر است با:

$$r_{in} \cong r_{ms} = 3r_g \quad (9.1)$$

که در این رابطه  $r_g$  شعاع شوارزشیلد است ( $r_g = \frac{2GM}{c^2}$ ). همچنین، پارامترهای اساسی در قرص برافزایشی استاندارد شامل،  $M$  جرم ستاره مرکزی،  $\dot{M}$  آهنگ برافزایش جرم یا به عبارتی مقدار جرمی