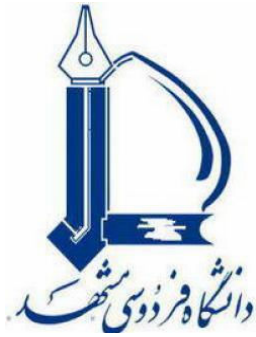


پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک (اختر فیزیک)

بررسی اثر هدایت گرمایی بر قرص های بر افزایشی مغناطیده چنبره ای با پهن رفت غالب برای الگوی وشکسانی آلفا

اساتید راهنما :

دکتر جمشید قنبری

دکتر شهرام عباسی

ارائه دهنده :

وفا امیدوار

زمستان ۱۳۸۸

Ferdowsi University of Mashad

Faculity of science

Department of physics

M.SC Thesis Astrophysics

The Effects of Thermal Conduction on the ADAF with a Toroidal Magnetic Field

Supervisors :

Dr. Jamshid Ghanbari

Dr. shahram abbassi

By:

Vafa Omidvar

January 2010

چکیده:

در این تحقیق اثر هدایت گرمایی بر ساختار قرص برافزایشی نازک چرخان در اطراف یک جرم مرکزی، و با استفاده از روش خود مشابه مورد بررسی قرار می گیرد. چرخش قرص از نوع زیرکپلری است و فرض می کنیم قرص مغناطیده چنبره ای باشد. در این مسأله فرآیند اتلافی نظیر وشکسانی را نیز وارد می کنیم که برای آن از الگوی وشکسانی آلفا استفاده می کنیم. نتایجی که بدست می آوریم نشان میدهد درآهنگ برافزایش بالا باافزایش هدایت گرمایی سرعت شعاعی وسرعت صوت افزایش می یابد در حالیکه برای آهنگ برافزایش پایین این کاملاً متفاوت است.در هردو آهنگ برافزایش با افزایش هدایت گرمایی سرعت سمتی افزایش می یابد. همچنین تأثیر میدان مغناطیسی را بر روی قرص مورد بررسی قرار می دهیم و به این نتیجه می رسیم که با افزایش میدان مغناطیسی سرعت شعاعی، سرعت زاویه ای وسرعت صوت افزایش می یابد.

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل اول: مقدمه ای بر قرص های برافزایشی

۱-۱ تاریخچه قرص های برافزایشی ۲

۱-۲ برافزایش چیست؟ ۳

۱-۳ چگونگی تشکیل قرص های برافزایشی ۵

۱-٤ انواع قرص های برافزایشی بر اساس شکل ظاهری ٦

۱-۴-۱ قرص های نازک ٦

۱-۴-۲ قرص های ضخیم ۷

۱-۵ انواع قرص های برافزایشی در اختر فیزیک ۸

۱-۵-۱ قرص های پیش سیاره ای ۸

۱-۵-۲ قرص های اطراف ستاره های دو تایی ۹

۱-۵-۳ قرص های اطراف هسته های فعال کهکشانی ۱۰

۱-٦ وشکسانی چیست؟ ۱۱

۱-۷ منابع تولید وشکسانی ۱۲

۱-۷-۱ وشکسانی مولکولی ۱۲

۱-۷-۲ وشکسانی الکترونی ۱۲

۱-۷-۳ وشکسانی ناشی از ناپایداری مغناطیسی ۱۲
۱-۷-۴ وشکسانی ناشی از ناپایداری همرفتی ۱۲
۱-۷-۵ وشکسانی ناشی از ناپایداری گرانشی ۱۳
۱-۸ الگوهای وشکسانی قرص ها ۱۳
۱-۸-۱ الگوی α ۱۳
۱-۸-۲ الگوی β ۱۴
۱-۹ انتقال انرژی در قرص ها ۱۵
۱-۹-۱ تابش امواج الکترومغناطیس ۱۵
۱-۹-۲ پهن رفت ۱۵
۱-۱۰ بررسی تاثیر هدایت گرمایی بر روی قرص ها ۱۶
۱-۱۱ بررسی تاثیر میدان مغناطیسی بر روی قرص ها ۱۹
۱-۱۲ انواع قرص های برافزایشی بر اساس نوع انرژی آنها ۲۲
۱-۱۲-۱ قرص های استاندارد ۲۲
۱-۱۲-۲ قرص های برافزایشی با پهن رفت غالب ۲۳

فصل دوم: معرفی قرص های برافزایشی با پهن رفت غالب

۲-۱ مقدمه ای بر قرص های برافزایشی با پهن رفت غالب ۲۵
۲-۲ تعریف شاره های برافزایشی با پهن رفت غالب ۲۶
۲-۳ تقسیم بندی $ADAF$ها بر اساس آهنگ بر افزایش جرم ۲۸

۲-٤ تقسیم بندی $ADAF$ بر اساس عمق اپتیکی ۲۹

۲-٥ معادله انرژی خروجی حاکم بر $ADAF$ ۳۱

۲-٦ تابش مؤثر(η) و روشنایی $ADAF$ ۳۲

۲-۷ شاره های خروجی و جت ها از $ADAF$ها ۳٥

۲-۸ روش های حل خود مشابه در قرص های برافزایشی ۳٦

۲-۹ بررسی حل خود مشابه ۳۸

۲-۹-۱ بررسی حل خود مشابه $ADAF$ ها ۳۸

۲-۹-۲ بررسی حل یک بعدی خود مشابه وابسته به θ برای $ADAF$ ها ۳۹

۲-۹-۳ بررسی حل یک بعدی خود مشابه وابسته به R برای $ADAF$ ها ۴۰

فصل سوم: روابط و محاسبات

۳-۱ فرض های در نظر گرفته شده در این تحقیق ۴۲

۳-۲ معادلات حاکم برقرص های برافزایشی ۴٥

۳-۳ روابط ومحاسبات ۴۷

۳-٤ استفاده از روش خود مشابه برای حل معادلات ٥٦

فصل چهارم: نمودارها

٤-١ مقدمه ٦٣

٤-٢ بررسی اثر میدان مغناطیسی ٦٤

٤-٢-١ بررسی اثر میدان مغناطیسی بر سرعت شعاعی ٦٤

٤-٢-٢ بررسی اثر میدان مغناطیسی بر سرعت زاویه ای ٦٧

٤-٢-٣ بررسی اثر میدان مغناطیسی بر سرعت صوت ٧٠

٤-٣ بررسی اثر هدایت گرمایی ٧٢

٤-٣-١ بررسی اثر هدایت گرمایی بر سرعت شعاعی ٧٢

٤-٣-٢ بررسی اثر هدایت گرمایی بر سرعت زاویه ای ٧٤

٤-٣-٣ بررسی اثر هدایت گرمایی بر سرعت صوت ٧٦

٤-٤ بررسی اثر وشکسانی ٧٧

٤-٤-١ بررسی اثر وشکسانی بر سرعت شعاعی ٧٨

٤-٤-٢ بررسی اثر وشکسانی بر سرعت زاویه ای ٨١

٤-٤-٣ بررسی اثر وشکسانی بر سرعت صوت ٨٤

فصل پنجم: نتایج و پیشنهادها

٥-١ نتایج ٨٨

٥-٢ پیشنهادها ٩٠

پیوست ۹۱
مراجع ۹۴

فصل اول

مقدمه ای بر قرص های برافزایشی

۱-۱ تاریخچه قرص های برافزایشی

۱-۲ برافزایش چیست؟

۱-۳ چگونگی تشکیل قرص های برافزایشی

۱-٤ انواع قرص های برافزایشی بر اساس شکل ظاهری

۱-٥ انواع قرص های برافزایشی در اختر فیزیک

۱-٦ وشکسانی چیست؟

۱-۷ منابع تولید وشکسانی

۱-۸ الگوهای وشکسانی قرص ها

۱-۹ انتقال انرژی در قرص ها

۱-۱۰ بررسی تاثیر هدایت گرمایی بر روی قرص ها

۱-۱۱ بررسی تاثیر میدان مغناطیسی بر روی قرص ها

۱-۱۲ انواع قرص های برافزایشی بر اساس نوع انرژی آنها

۱-۱ تاریخچه قرصهای برافزایشی

بررسی قرص های بر افزایشی را می توان به اواسط قرن هجدهم و به کارهای کانت[۱] و لاپلاس[۲] مرتبط ساخت[۴۵] .در سال ۱۹۵۲ یکی از مهمترین مقاله ها توسط بوندی[۳] ارائه گردید و برافزایش کروی غیرچرخان به نام او معروف شد[۹] .

در دهه ۱۹۷۰ یکی از مهمترین مقاله ها در زمینه برافزایش توسط شاکورا[۴] و سانیو[۵] نوشته شد[۶۷] .

در این الگو پارامتر تاثیر گذار وشکسانی معرفی شد و اکثر اختر فیزیکدانان از آن به عنوان الگوی استاندارد استفاده می کنند[۵۸] .

آنها حل تحلیلی خودسازگاری برای قرص های برافزایشی که از نظر هندسی نازک و از نظراپتیکی ضخیم هستند، یافتند که به طور کلی همان قرص نازک استاندارد یا قرص شاکورا و سانیو[۶] می باشد،

[1])Kant
[2])Laplace
[3])Bondi
[4])Shakura
[5])Sanyaev

که یکی از شاخه های آن شاره های برافزایشی با پهن رفت غالب[۷] می باشد که از آنها می توان به الگوی شاره های برافزایشی با پهن رفت غالب که از نظر اپتیکی و هندسی ضخیم هستند، اشاره نمود که این کار توسط آبروموویچ[۸] در سال ۱۹۹۸ میلادی انجام شد و همچنین به الگوی شاره های برافزایشی با پهن رفت غالب که از نظر هندسی ضخیم و از نظر اپتیکی نازک هستند، اشاره نمود که توسط اختر فیزیکدانان متعددی مورد مطالعه قرار گرفت[۵] .

در حال حاضر مباحث اصلی موجود در مورد قرص های برافزایشی نظریه پهن رفت در سیستم را بیان می کند. این پدیده اغلب می تواند پاسخگوی پدیده های موجود در قرص های برافزایشی باشد[۱۶] .

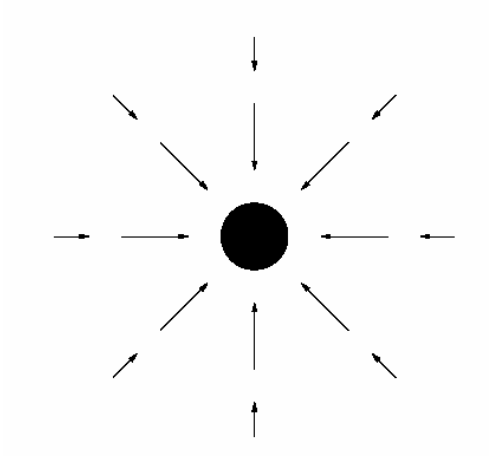
۱-۲ برافزایش چیست؟

یک ستاره که در یک محیط گازی کروی و ساکن قرار گرفته است به علت وجود جاذبه گرانشی ستاره جرم از اطراف به صورت شعاعی بر روی ستاره فروریزش می کند. این نوع برافزایش را برافزایش بوندی یا برافزایش کروی می گویند که ساده ترین نوع برافزایش محسوب میشود. در این حالت مواد در اطراف ستاره نمی چرخند و تنها بر روی ستاره مرکزی فرو ریزش می کنند، پس ازتکانه زاویه ای صرف نظر شده است.

شکل(۱-۱) الگوی بوندی را برای قرص های برافزایشی نشان می دهد که شاره های برافزایشی مستقیما تحت جاذبه گرانشی جسم مرکزی بر روی جسم می ریزند. این الگو امروزه هیچ کاربردی ندارد زیرا در صورت پذیرفته شدن باید تمام جهان در یک نقطه جمع شود.

---

[6])SSD
[7])Advection dominated accretion flows
[8])Abramowicz



شکل(۱-۱). برافزایش بوندی.

اگر تعدادی ملکول گاز در یک مدار دایره ای حول یک جسم مرکزی با گرانش قوی در حال گردش باشند در صورتی که انرژی و تکانه زاویه ای ذرات ثابت بماند در مدار باقی می مانند. ولی از آنجا که تحت تاثیر فرایندهای اتلافی مثل برخورد های مولکول ها با یکدیگرقرار می گیرند، امواج ضربه ای[۹] و وشکسانی[۱۰] مقداری از انرژی درونی را به انرژی گرمایی و انرژی تابشی تبدیل می کنند. در نتیجه ذرات بیشتر در چاه پتانسیل گرانشی جسم مرکزی فرو می روند و مقداری از تکانه زاویه ای خود را از دست می دهند. مقیاس زمانی ای که طی آن ذرات می توانند تکانه زاویه ای از دست رفته خود راتجدید کنند از مقیاس زمانی ای که طی آن ذرات انرژی خود را به صورت تابش از دست می دهند و همچنین از مقیاس زمانی دینامیکی که به حرکت مداری ذرات مربوط می شود بسیار طولانی تر است. بنابراین ذرات انرژی خود را بتدریج از دست می دهند و چون برای یک تکانه زاویه ای معین حداقل انرژی سیستم در حالتی است که ذرات در مدار دایره ای حرکت کنند، لذا ذرات بصورت مارپیچی در

[9])Shock waves
[10])viscosity

مدارهای دایره ای که به تدریج شعاع آن کاهش می یابد بسمت جرم مرکزی حرکت می کنند به این فرآیند برافزایش گفته می شود[۱۷]و[۱۹].

۱-۳ چگونگی تشکیل قرص های برافزایشی

یک قرص برافزایشی شاره ای است که می تواند همراه با آزاد کردن انرژی معمای تکانه ی زاویه ای را نیز حل کند[۵۵].

زمانیکه شاره ی اطراف جرم مرکزی با حرکت شعاعی و نیز چرخشی حول جرم مرکزی همراه باشد انتظار داریم گاز در مدار دایره ای و در مسیر مارپیچی به سمت شاره فشرده به داخل حرکت کند که این شکل قرص برافزایشی است. در طی حرکت مارپیچی در غیاب گشتاور خارجی تکانه زاویه ای کاهش می یابد و این تنها با جا به جا شدن تکانه زاویه ای قرص به وسیله گشتاور داخلی اتفاق می افتد. پس قسمتهای خارجی تکانه زاویه ای بدست می آورند و به صورت مارپیچی به سمت خارج حرکت می کنند.

حضور اصطکاک تحت عنوان وشکسانی امکان تبادل تکانه زاویه ای بین عناصر مجاور سیال را فراهم می کند به این ترتیب که وشکسانی تکانه زاویه ای را از هر عنصر گازی می گیرد و به یک عنصر گازی دورتر می دهد. عنصر گازی اول با نزدیکی به جرم در حال برافزایش سرعت زاویه ای جدیدی مطابق با مدار کوچکتر بدست می آورد. با تکرار این فرایند عنصر گازی سرانجام به درون جرم مرکزی سقوط می کند و شارش بر افزایشی از این طریق صورت می گیرد[۳۸].

وشکسانی در یک قرص گازی انرژی پتانسیل گرانشی را به انرژی گرمایی تبدیل و سپس به صورت تابش از محیط خارج می کند.هنگامی که انرژی پتانسیل گرانشی آزاد می شود گاز در یک حرکت مارپیچی به جرم مرکزی نزیک می شود. هرچه گاز به جرم مرکزی بیشتر نزدیک می شود میزان

انرژی پتانسیل آزاد شده نیز افزایش می یابد. بنابراین بیشترین مقدار انرژی آزاد شده توسط یک قرص برافزایشی از لبه داخلی آن می باشد. طبق قضیه ویریال می دانیم که انرژی جنبشی مواد در مرز داخلی قرص برابر با نصف انرژی پتانسیل گرانشی است که مواد در چرخش مارپیچی تا لبه قرص از دست می دهند[۴۵] .

بنابراین درخشندگی برافزایشی تابش شده از ناحیه مرزی قرص به اندازه تمام تابش قرص اهمیت دارد[۱۷].

۱-۴ انواع قرص های برافزایشی بر اساس شکل ظاهری

قرصها به طور عمده به دو دسته نازک و ضخیم تقسیم می شوند:

۱-۴-۱ قرص های نازک

در قرصهای نازک ضخامت قرص (H) در مقایسه با شعاع آن (R) خیلی کوچکتر است یعنی $H \ll R$.در نتیجه شکل این نوع قرصها تخت و پخیده است. در این حالت چون چگالی در قرص ها کوچک است و ضخامت قرص نسبت به شعاع آن کوچک می باشد لذا نیروی ناشی از شیب فشار در قرص از نیروی گرانش به طور قابل ملاحظه ای کمتر است. در ضمن سرعت عمودی که بر ضخامت سیال اثر می گذارد به مراتب از سرعت در راستای شعاعی کوچک تر می باشد. در اکثر الگوهایی که به بررسی این قرص ها می پردازد، حرکت مواد را در مدارهای کپلری فرض می کند. در بررسی ساختار قرص های نازک چون ارتفاع قرص را در مقایسه با شعاع آن بسیار کوچک در نظر می گیرند، در حل معادلات مربوط به قرص نازک از سیستم مختصات استوانه ای استفاده می کنند.

یکی از عواملی که بر شکل قرص اثر می گذارد آهنگ برافزایش ماده است. در قرص های نازک آهنگ برافزایش باید بسیار کمتر از آهنگ برافزایش ادینگتون باشد.

به علت کوچک بودن ضخامت قرص در برابر شعاع آن ساختار عمودی و شعاعی از یکدیگر جدا هستند.

۱-۴-۲ قرص های ضخیم

به دلیل این که ناحیه داخل قرص هم از نظر حرارتی و هم ساختاری ناپایدار است پس الگوی قرص نازک نمی تواند الگوی مناسبی برای توصیف ساختار قرص باشد.

ضخامت قرص H قابل مقایسه با شعاع آن R است یعنی هر دو از یک مرتبه هستند. این نوع قرص ها در راستای افقی و عمودی ساختاری مشابه دارند. پس انتظار می رود کمیت های فیزیکی قرص های ضخیم در راستای شعاعی و عمودی مشابه یکدیگر رفتار کنند.

این قرص ها در هسته های کهکشانی فعال یا در اجرام کمیاب نظیر SS433 و 1-xgyc و ... دیده می شوند.

این نوع قرص ها عموما چنبره ای شکل هستند که در آن پخش شدگی جرم در راستای شعاعی مشابه راستای عمودی است. معادلات آن ها به سادگی قرص های نازک نخواهد بود و عموما سه بعدی هستند.

اولین بار درسال ۱۹۸۰ ویتا[11] و پازنسکی[12] یک بررسی اجمالی بر روی الگوی قرص های برافزایشی ضخیم انجام دادند که مورد استقبال قرار گرفت[۵۷].

در بررسی هایی که در مورد قرصهای ضخیم توسط آبرومویچ[13] انجام شد نتیجه گرفته شد که حرکت شعاعی در قرص ضخیم از حرکت سمتی در آن کندتر است[۳]،[٤].

[11])Witla
[12])Paczynski

قنبری[14] و عباسی[15] [۲۱] در مقاله ای خود گرانش را در یک قرص متعادل چرخان و در حضور یک میدان مغناطیسی دو قطبی بررسی کردند.در قرص های ضخیم خود گرانش نقش مهمی در تحول و ساختار قرص دارد. افزایش تاثیر خود گرانش ضخامت قرص را کاهش می دهد.

۱-۵ انواع قرص های بر افزایشی در اخترفیزیک

قرصهای برافزایشی را به طور کلی به سه دسته تقسیم می کنند:

۱-۵-۱ قرص های پیش سیاره ای

از زمان انقلاب کوپرنیکی متوجه شده بودند که سیارات منظومه شمسی تقریبا در یک صفحه و به یک شکل به دور خورشید می گردند. در قرن هجدهم کانت و لاپلاس[16] متوجه شدند که چنین موقعیتی تصادفی نیست و حدس زدند که سیاره ها باید از یک ابر گازی چرخان در اطراف خورشید شکل گرفته باشند. این الگو برای سحابی خورشیدی مفهوم قرص های پیش سیاره ای را بوجود آورد. در سال ۱۹۹۵ تلسکوپ هابل تصاویری از چنین قرص هایی را در اطراف ستارگان در حال تولد در سحابی جبار تهیه کرد و مشخص شد که این قرص ها مراحل اولیه تشکیل ستارگان می باشند که به نام قرص های پیش سیاره ای خوانده می شوند.

۱-۵-۲ قرص های اطراف ستاره های دوتایی

قرص ها در اطراف منظومه ها دوتایی به دو دلیل اصلی تشکیل می شوند:

---

[13])Abramowicz
[14])Ghanbari
[15])Abbassi
[16])Kant & Laplace

الف) برافزایش از طریق باد ستاره ای

یکی از ستاره ها در یکی از مراحل تحول خود مقدار زیادی از جرم خود را به صورت باد ستاره ای به بیرون می فرستد، مقداری از این مواد توسط جاذبه گرانشی ستاره همدم جذب می شود که به آن برافزایش باد ستاره ای می گویند.

ب) پر شدن حد روچ

وقتی یکی از ستاره ها در مسیر تحول خود رشته اصلی را ترک کرده و به شکل غول در می آید شعاع آن افزایش یافته و یا فاصله بین دو ستاره کم می شود و به سرعت به پایان عمر خود یعنی به شکل یک جرم متراکم تحول پیدا می کند. در این نظریه ستاره همدم می تواند هنوز روی رشته اصلی خود باشد. گاز خروجی از ستاره همدم باید انرژی زیادی داشته باشد که گرانش جرم متراکم قادر به بلعیدن آن باشد و نیز تکانه زاویه ای باید طوری باشد که از فرو ریزش مستقیم آن جلو گیری کند. اگر سیستم بسته باشد در مرحله سر ریزی یک فرآیند پر قدرت بیرون ریزی ماده از نقطه لاگرانژی داخلی دو ستاره صورت می گیرد که، اصطلاحاً به آن پر شدن حد روچ می گویند. ستاره اولیه که زود تر به تحول رسیده است سنگین تر و متراکم تر شده است و ستاره همدم به سمت آن فروریزش می کند و بدلیل چرخش آن در مدار دوتایی گاز منتقل شده، تکانه زاویه ای را مستقیما روی سطح ستاره اولیه می ریزد که باعث شکل گیری قرص برافزایشی اطراف ستاره می شود.

۱-۵-۳ قرص های اطراف هسته های فعال کهکشانی[۱۷]

بیشتر کهکشان ها دارای سیاهچاله های خیلی بزرگ در مرکزشان هستند. بعضی از کهکشان ها دارای هسته های کهکشانی فعال به صورت منابع ستاره ای با طیف غیر گرمایی و دارای انتقال به سرخ مشخص می باشند. الگوی استاندارد برای ***AGN*** شامل قرص های برافزایشی اطراف سیاهچاله ها است که یک منبع انرژی را فراهم می کند و اجازه می دهد سیاهچاله ها رشد کند[۵٤].

تصاویری که تلسکوپ فضایی هابل با جزئیات زیاد از نواحی مرکزی کهکشانی فعال تهیه کرده است، شواهد مستقیمی برای وجود بعضی از ساختارهای قرص مانند در اطراف هسته های آنهاست که می توانند اطلاعاتی در مورد این گونه قرص های برافزایشی در اختیار ما قرار دهند[۱۷].

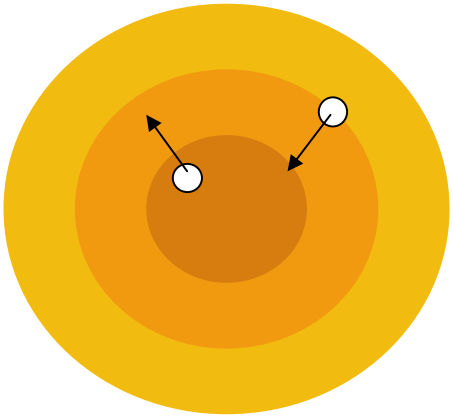
۱-٦وشکسانی چیست؟

فرآیندی که باعث توزیع دوباره تکانه زاویه ای در سیستم و اتلاف انرژی می شود وشکسانی می باشد. طبیعت و مقدار وشکسانی به درستی معلوم نیست ولی وشکسانی ساختار قرص ها را تغییر می دهد[٤٤]. اگر قرص را شامل طوق های باریک در نظر بگیریم دو طوق مجاور به یکدیگر گشتاوری وارد می کنند که باعث مخلوط شدن مواد در راستای شعاعی می شود، چنان که در شکل

[17])AGNS

(۱-۲) نشان داده شده است. مواد بین دو طوق می توانند مبادله شوند. به علت این که هر طوق باریک در شعاع متفاوت نسبت به طوق دیگر قرار دارد، پس مواد در هر طوق تکانه زاویه ای مخصوص به خود را دارند. فرانک در سال ۱۹۹۲ با استفاده از وشکسانی این انتقال تکانه ای را محاسبه کرد[۱۷].

وشکسانی تکانه زاویه ای گاز را به سرعت شعاعی تبدیل می کند و سرعت در راستای شعاعی در محدوده زیر صوتی است[۶۱].



شکل (۱-۲). انتقال تکانه زاویه ای بین دو طوق را نشان می دهد.

۱-۷ منابع تولید وشکسانی

۱-۷-۱ وشکسانی مولکولی

در این حالت انتقال تکانه زاویه ای به اندازه ای آهسته صورت می گیرد که می توان تاثیر آن را در تحول قرص ناچیز شمرد[۲۶].

۱-۷-۲ وشکسانی الکترونی

این منبع در مواردی می تواند مهم باشد که فشار تبهگنی الکترونی داشته باشیم[۵۶].

۱-۷-۳ وشکسانی ناشی از ناپایداری مغناطیسی

هر یک از لایه های اطراف قرص دارای سرعت های مختلفی می باشد، خطوط میدان در داخل قرص منحرف می شود و ناپایداری مغناطیسی ایجاد می شود[۸].

۱-۷-٤ وشکسانی ناشی از ناپایداری همرفتی

ناپایداری همرفتی بیشتر از اینکه باعث انتقال تکانه زاویه ای به خارج قرص شود، خلاف آن عمل می کند[۶۵]. قرص هایی که در سیستم های دوتایی یا اختروش ها واقع شده اند دارای وشکسانی همرفتی هستند[۳۷].

بهترین الگویی که همرفتی را منبع وشکسانی معرفی کرد توسط ویلا[۱۸] درسال ۱۹۷۸ [۷٤] و لیانگ[۱۹] در سال ۱۹۷۷[۳۷] ارائه شد.

۱-۷-۵ وشکسانی ناشی از ناپایداری گرانشی

اگر از خود گرانش در قرص نتوان صرف نظر کرد انتقال تکانه زاویه ای را سبب می شود. و ناپایداری گرانشی قادر به تولید تلاطم هایی می شود که باعث ناپایدار شدن قرص و ایجاد بازو های موجی شکل می شود که در این فرایند تکانه زاویه ای منتقل می شود[۷۳].

[18])Vila
[19])Liang