



دانشکده علوم پایه
گروه فیزیک

بررسی تأثیر حرکت گاز بر رشد پیش‌سیارات (تمرکز بر رشد سیارات در گرداب‌ها)

ساره عطائی‌ترشیزی

پایان‌نامه

جهت اخذ درجه دکتری تخصصی فیزیک

استاد راهنما

دکتر جمشید قهری

استاد همکار در دانشگاه هایدلبرگ آلمان

دکتر پروفسور کورنلیس پروس دولمند

شهریور ۹۲

چکیده

با پیشرفت ابزارهای رصدی در طول موج‌های بلند مشخص شد که دسته‌ی خاصی از قرص‌های پیش‌سیاره‌ای وجود دارند که دارای حفره‌ای در ناحیه‌ی میانی هستند. از آنجا که تصور می‌شود این قرص‌ها مرحله‌ی بین قرص پیش‌سیاره‌ای و قرص نخاله باشند، آنها را گذارقرص می‌نامند. مشاهدات اخیر آشکار ساخته است که در لبه‌ی خارجی تعدادی از این گذارقرص‌ها ساختارهایی نامتقارن وجود دارند. یک سیاره‌ی پرجرم هم می‌تواند حفره را شکل دهد و هم نامتقارنی‌ها را از دو طریق بیضی کردن لبه‌ی خارجی حفره یا ایجاد گرداب بوجود آورد. ما تفاوت این دو ساختار نامتقارن را برای وشکسانی‌های مختلف قرص و جرم‌های متعددی برای سیاره بررسی کردیم و معیاری برای رصدگران ارائه دادیم. ما نشان دادیم که اگر تفاوت چگالی غبار بین ناحیه‌ی نامتقارن و دیگر نقاط قرص بسیار زیاد (بیش از ۷۰ برابر) باشد حتماً ساختار نامتقارن گرداب است ولی اگر در حد تفاوت چگالی گاز باشد، نامتقارنی ناشی از بیضی شدن لبه‌ی شکاف است. این مسئله اهمیت گرداب‌ها در به دام انداختن غبار و تشکیل سیارات را نیز نشان می‌دهد. به همین دلیل ما ماندن پیش‌سیاره‌ی تازه تشکیل شده را در درون گرداب مورد بررسی قرار دادیم. ما گردابی را در یک برآمدگی فشار در قرص ایجاد کردیم و سیاراتی با جرم مختلف را در آن قرار دادیم تا اندرکنش گرانشی گرداب و سیاره را مورد بررسی قرار دهیم. ما متوجه شدیم که حتی سیاراتی با جرم بسیار کم (حدود ۱/۵ جرم زمین در سیستمی با ستاره‌ای خورشید-مانند) در درون گرداب باقی نمی‌مانند و در نتیجه‌ی اندرکنش گرانشی با قرص، از گرداب بیرون می‌آیند و به یکی از دُم‌های گرداب قفل می‌گردد. این مسئله اگر چه مانع ادامه‌ی رشد سیاره در گرداب و تبدیل آن به سیاره‌ی غول می‌شود ولی نشان می‌دهد که گرداب نقش مهمی در به دام انداختن سیارات دارد.

کلمات کلیدی: قرص پیش‌سیاره‌ای، گذارقرص، سیاره، گرداب، مهاجرت

فهرست مطالب

۱	شواهد رصدی قرص‌های پیش‌سیاره‌ای	۱
۱	۱.۱ مقدمه	۱
۴	۲.۱ توزیع طیفی انرژی قرص‌های پیش‌سیاره‌ای	۴
۵	۱.۲.۱ قسمت‌های مختلف توزیع طیفی انرژی	۵
۷	۲.۲.۱ دسته‌بندی اجرام ستاره‌ای جوان	۷
۹	۳.۱ تپاهای عجیب: گذار قرص‌ها	۹
۱۴	۴.۱ تصاویر گذار قرص‌ها و ساختارهای نامتقارن	۱۴
۱۷	۵.۱ نکات کلیدی این فصل	۱۷
۱۸	۲ الگوهای نظری که می‌توانند گذار قرص‌ها را بسازند	۱۸
۱۸	۱.۲ داستان یک قرص پیش‌سیاره‌ای معمولی	۱۸
۲۰	۲.۲ عواملی که می‌توانند حفره در قرص‌های پیش‌سیاره‌ای ایجاد کنند	۲۰
۲۱	۱.۲.۲ تبخیر نوری	۲۱
۲۲	۲.۲.۲ سیارات پرجرم	۲۲
۲۶	۳.۲.۲ رشد غبار	۲۶
۲۸	۴.۲.۲ سازوکار برنده کدام است؟	۲۸
۲۹	۳.۲ سازوکارهایی که در گذار قرص‌ها عدم تقارن می‌سازند	۲۹
۲۹	۱.۳.۲ گرداب‌ها	۲۹
۳۳	۲.۳.۲ شکاف بیضی‌شکل	۳۳

۴.۲	دام‌های غبار	۳۵
۵.۲	نکات کلیدی این فصل	۳۸
۳	چگونه در مشاهدات یک گرداب را از شکاف بیضی شکل تشخیص دهیم؟	۳۹
۱.۳	یادآوری و طرح مسأله	۳۹
۲.۳	چگونه به این سؤال پاسخ دهیم؟	۴۰
۱.۲.۳	قرص گازی	۴۱
۲.۲.۳	قرص غباری	۴۸
۳.۳	نتایج	۵۰
۴.۳	تعبیر رصدی نتایج و مقایسه با آخرین نتایج رصدی	۵۷
۵.۳	نکات کلیدی این فصل	۵۸
۴	گرداب و رشد سیاره	۶۱
۱.۴	روش و تنظیمات اولیه	۶۲
۲.۴	نتایج الگوی اصلی	۶۵
۳.۴	مطالعه‌ی مقداری	۶۷
۴.۴	تحلیل گشتاورهای وارد بر سیاره	۷۰
۵.۴	اهمیت این نتایج در تشکیل سیارات	۷۳
۶.۴	نکات کلیدی این فصل	۷۴
۵	حرف آخر	۷۶
۱.۵	خلاصه و نتایج	۷۶
۲.۵	پیشنهادهای	۷۷
مراجع		۷۹
آ	محاسبات خروج از مرکز قرص	۸۷

لیست تصاویر

- ۱.۱.۱ تصویر گرفته شده از جرم ۴۰۵-۱۸۳ در سحابی جبار. جرم تاریک در بالای تصویر که با مربعی سفید مشخص شده در تصویر سمت راست به تنهایی نشان داده شده است. ابعاد این جرم در تصویر $۱/۲'' \times ۰/۹''$ و جرم ستاره حداقل $۰/۲ M_{\odot}$ است [۵۸]. ۳
- ۱.۲.۱ توزیع طیفی انرژی برای 49 Cet. خطوط پیوسته الگوی نظری و نشانه‌های نقطه‌ای داده‌های رصدی با تلسکوپ‌های مختلف را نشان می‌دهد. خطچین‌ها مولفه‌های جسم سیاه از مناطق مختلف قرص است [۷۵]. ۵
- ۲.۲.۱ توزیع طیفی انرژی برای تابش جسم سیاه یک قرص با عمق اپتیکی کم در نواحی خارجی. دقت کنید که از لحاظ رصدی νF_{ν} و λF_{λ} دارای شکل یکسانی هستند و تنها در یک ضریب متفاوتند. (با اجازه از ک. دولموند) ۷
- ۳.۲.۱ توزیع طیفی انرژی برای یک قرص با در نظر گرفتن جزئیات بیشتر در قرص و همچنین وارد کردن طیف انرژی ستاره [۲۳]. ۸
- ۴.۲.۱ دسته‌بندی اجرام ستاره‌ای جوان با توجه به شیب تپا در ناحیه‌ی فروسرخ. این دسته‌بندی با مراحل تحولی آن‌ها به خوبی تطابق دارد. این تصویر که از [۳] برگرفته شده است مؤلفه‌های مختلف تپا را نیز نشان می‌دهد. ۱۰

- ۱.۳.۱ الگوواره‌ای که مفهوم α_{excess} را نشان می‌دهد. خط ممتد (سبز) تطای فرضی است و نقاط (قرمز) نتایج مشاهدات فرضی هستند. اگر $\lambda_{turn-off}$ در ۲.۲ میکرومتر باشد، α_{excess} منفی و برای $\lambda_{turn-off}$ در ۸ میکرومتر، α_{excess} مثبت است و در نتیج جرم را گذارقرص می‌گویند. تعیین $\lambda_{turn-off}$ توسط طیف و مشخصات ستاره تعیین می‌شود که این، اهمیت مطالعه برای تعیین دقیق‌تر تطای ستارگان این اجرام را مشخص می‌سازد. (شکل برگرفته از [۸۸]) ۱۱
- ۲.۳.۱ دسته‌بندی گذارقرص‌ها. نوار خاکستری روشن تطای نوعی برای ت-گاوهای کلاسیکی را نشان می‌دهد که با توجه به الگوهای مختلف قرص‌های پیش‌سیاره‌ای ساخته شده است. a نمونه‌ای از تطای یک قرص ضعیف را نشان می‌دهد که تابش فروسرخ آن در تمام محدوده‌ی فروسرخ بسیار کمتر از تطای نوعی ت-گاوهای کلاسیکی است. این اجرام شبیه به الگوهایی هستند که دانه‌های غبار در آنها رشد کرده‌اند و بنابراین به جای ناحیه‌ی فروسرخ در طول موج‌های بلندتر تابش می‌کنند. b یک گذارقرص کلاسیکی را نشان می‌دهد که البته در محدوده‌ی قرص‌های سرد نیز قرار می‌گیرد. این قرص‌ها هیچ تابش اضافه‌ای در فروسرخ نزدیک ندارند که حاکی از خالی بودن قسمت درونی قرص می‌باشد. c نمونه‌ای از یک قرص سرد است با یک قله کوچک در ۱۰ میکرومتر که به ویژگی سیلیکات معروف است و نشانه‌ی وجود غبارهای سیلیکات بی‌شکل است. d یک پیش‌گذارقرص که دارای مقداری تابش اضافه در فروسرخ دور، افت شار در فروسرخ نزدیک و تابش قابل توجه منطبق با الگوهای ت-گاو در فروسرخ دور است. وجود تابش اضافه در محدوده‌ی فروسرخ نزدیک و دور نشانی از حضور قرص به ترتیب در نواحی نزدیک به ستاره و نواحی خارجی قرص است. به عبارت دیگر این اجرام دارای یک شکاف بزرگ در محدوده‌ی میانی هستند (شکل برگرفته از [۸۸]). ۱۳
- ۱.۴.۱ تصاویر گرفته شده از AB Aur. a تصویر تهیه شده در نوار H (۱/۵ تا ۱/۸ میکرومتر). تمایل حدوداً ۳۰ درجه قرص در این تصویر تصحیح شده و ساختارهای اصلی قابل تشخیص نیز مشخص شده‌اند. b این تصویر در طول موج ۱/۴ میلی‌متر پیوسته تهیه شده است. ساختارهای کشف شده قبلی (که در تصویر a نشان داده شده است) با رنگ سیاه و ساختار نامتقارن جدید با خط سفید مشخص گردیده است. c تصویری با نور قطبیده از نواحی داخلی این جرم. جعبه‌ی سمت راست بالا بزرگ شده ناحیه‌ای است که احتمال حضور یک منبع نقطه‌ای در آنجا می‌رود. ۱۵

۲۰۴۰۱ تصاویر گرفته شده از $HD142527$. تصویر سمت چپ که در سال ۲۰۱۲ گرفته شده است بیضی بودن قرص را به خوبی نشان می‌دهد. در تصویر سمت راست مشاهدات انجام شده در سال ۲۰۱۳ نمایش داده شده است: a تصویر تهیه شده در طول موج 0.8μ میکرومتر پیوسته. تمایل این جرم ۲۰ درجه و به سمت شرق است و بنابراین این جرم تقریباً رو به ما قرار گرفته است. شکل نعل‌اسبی به وضوح در این تصویر دیده می‌شود. b شدت خطوط CO برای انتقال ۳ به ۲ را نشان می‌دهد. رنگ‌های زمینه مطابق با انتقال به آبی و انتقال به سرخ انتخاب شده‌اند. c نور بازتاب شده‌ی ستاره از قرص را نشان می‌دهد که در طول موج 2μ میکرومتر توسط تلسکوپ جمینی گرفته شده است. برخلاف تصویر a که لایه‌های درونی قرص را نشان می‌دهد، این تصویر توزیع غبار در لایه‌های رویی را آشکار می‌کند. d مشابه با b است اما برای HCO^+ . جعبه‌های کوچک میانی نیز بزرگ‌شده‌ی قسمت‌های داخل حفره‌ی میانی را در گاز (سمت راست) و غبار (سمت چپ) نشان می‌دهد. ۱۶

۱۰۱۰۲ الگوواره‌ای از مراحل تحولی یک قرص پیش‌سیاره‌ای معمولی که از [۸۸] برداشته شده است. a یک قرص پیش‌سیاره‌ای جوان را نشان می‌دهد که برافزایش بر تبخیرنوری غالب است، b قرصی دو مؤلفه‌ای که غبار در آن به سمت صفحه میانی ته‌نشین کرده و بنابراین مؤلفه‌ی غباری تخت‌تر شده است، در c قسمت میانی قرص روی ستاره برافزایش کرده و نواحی خارجی نیز به سرعت در حال بخار شدن توسط نور از درون به بیرون است، d قرص نخاله که مجموعه‌ای از غبارهای بزرگ، پیش‌سیارات و سیارات است. قرص نخاله بسیار کم جرم است و هنوز قابلیت رصد دقیق آن وجود ندارد. ۲۰

۱۰۲۰۲ تصویر بالایی تغییر پهنای شکاف اطراف یک سیاره با جرم مشتری را در اثر تغییر وشکسانی نشان می‌دهد. محور عمودی نسبت چگالی سطحی را بعد از ۱۰۰۰ دور نسبت به چگالی سطحی اولیه نشان می‌دهد. در این نمودار چگالی سطحی روی زاویه‌ی سمتی میانگین گرفته شده است. محور افقی نشان‌دهنده‌ی فاصله از ستاره است (تصویر برگرفته از [۱۸]). تصویر پایینی پهنای شکاف را برای سیاراتی با جرم 0.1μ ، 1μ و ۱ جرم مشتری نشان می‌دهد. محورها همانند بالایی هستند (تصویر از [۱۹]). ۲۵

- ۱.۳.۲ الگوواره‌ی قرصی با منطقه‌ی مرده. نواحی خارجی و داخلی قرص با کمک پرتوهای پرنرژ می‌یونیده می‌شوند و انتقال تکانه و در نتیجه آهنگ برافزایش در این مناطق بیشتر هستند. اما در نواحی میانی درجه یونیدگی و به تبع آن آهنگ برافزایش نیز کمتر است. در مرزهای بین این دو لایه به دلیل تفاوت آهنگ برافزایش، مواد تلنبار می‌شوند. ۳۰
- ۲.۳.۲ تصویر سمت راست تصاویر ساخته شده در طول موج‌های میلی‌متری از شبیه‌سازی‌های رگالی و همکارانش [۷۲] است که بسیار شبیه تصاویر تهیه شده توسط براون و همکارانش از سه گذار قرص متفاوت می‌باشند [۱۳] که در سمت چپ نشان داده شده‌اند. نام هر جرم در بالای تصاویر آمده است و بیضی‌ها در کنار هر تصویر ابعاد پرتو دریافت شده توسط تلسکوپ را مشخص می‌کنند. ۳۲
- ۳.۳.۲ چگالی یکی از شبیه‌سازی‌های لایرا و همکارانش که نشان می‌دهد حضور گرداب‌های بزرگ مقیاس تحت تأثیر تفکیک عددی قرار نمی‌گیرند و بنابراین گرداب‌ها، ساختارهای مصنوعی ناشی از محدودیت کدهای عددی نیست. این شبیه‌سازی‌ها سه بعدی است و این تصویر چگالی در صفحه‌ی میانی قرص را نشان می‌دهد. مرز بین نواحی مرده و زنده توسط یک خط چین مشخص شده است و گرداب‌ها نواحی قرمز با چگالی بالا هستند (تصویر از [۴۹]). ۳۳
- ۴.۳.۲ گرداب در لبه‌ی خارجی یک شکاف شکل گرفته توسط یک سیاره با جرم 0.1 جرم مشتری در یک قرص غیروشکسان (تصویر از [۴۳]). ۳۴
- ۵.۳.۲ چگالی سطحی لگاریتمی قرصی با وشکسانی 10^{-5} ν بعد از 2000 دور برای سیاره‌ای با جرم 3 (بالا) و 5 جرم مشتری (پایین). دایره‌ی سیاه لبه‌ی خارجی شکاف را نشان می‌دهد. خروج از مرکز دایره سیاه برای تصویر پایین 0.2 است که نشان‌دهنده‌ی بیضی بودن شکاف است. لازم به ذکر است که سیاره در این الگوها بر روی یک مدار دایره‌ای ثابت شده است. (تصویر از [۳۷]). ۳۵
- ۱.۴.۲ سرعت راندگی برای ذرات با عددهای استوکس متفاوت در قرصی با وشکسانی α و 10^{-3} . خط چین، سرعت برافزایش گاز است. (تصویر از [۱۱]). ۳۷
- ۱.۲.۳ محل محاسبه‌ی کمیت‌ها در هر سلول شبکه. ۴۳

- ۱.۳.۳ تحول قرصی با وشکسانی $\alpha = 10^{-2}$ که دارای سیاره‌ای با جرم $M_p = 20M_{Jup}$ است از زمان $t = 1000$ تا $t = 1002$ زمان مداری. ساختار نامتقارن ناشی از یک شکاف بیضی شکل کاملاً مشخص است و مشاهده می‌کنیم که این ساختار در طی ۲ دور ثابت است.
- ۵۱ علامت + نشان‌دهنده‌ی مکان سیاره است.
- ۲.۳.۳ تحول قرصی با وشکسانی $\alpha = 10^{-4}$ که دارای سیاره‌ای با جرم $M_p = 10M_{Jup}$ است از زمان $t = 1000$ تا $t = 1002$ زمان مداری. یک گرداب در این قرص کاملاً مشخص است. گرداب در طی ۲ دور به وضوح به دور ستاره دوران می‌کند. علامت + نشان‌دهنده‌ی مکان سیاره است. همانطور که مشاهده می‌شود هیچ وابستگی بین مکان سیاره و موقعیت گرداب وجود ندارد.
- ۵۲ ۳.۳.۳ تحول قرصی با وشکسانی $\alpha = 10^{-4}$ که دارای سیاره‌ای با جرم $M_p = 15M_{Jup}$ است از زمان $t = 1000$ تا $t = 1002$ زمان مداری. در حالیکه بیضی بودن شکاف کاملاً مشخص است، یک گرداب نیز در قرص وجود دارد. اگر چه گرداب از درون فشردگی ناشی از بیضی بودن لبه‌ی شکاف عبور می‌کند، اما همچنان پس از بیرون آمدن از آن ساختار خود را باز می‌یابد. چنین الگوهای پیچیده‌ای ممکن است بتوانند قرص‌های به هم ریخته‌ای مانند HD 142527 را توضیح دهند. علامت + نشان‌دهنده‌ی مکان سیاره است.
- ۵۲ ۴.۳.۳ در این تصویر بیضی بودن شکاف در انتهای شبیه‌سازی‌ها با نقطه‌ای مشکی مشخص شده است. رنگ‌ها نیز طول عمر گرداب را نشان می‌دهند. محور عمودی لگاریتم وشکسانی و محور افقی جرم ستاره است. برای $M_p = 15M_{Jup}$ و $\alpha = 10^{-4}$ ساختارهای نامتقارن بعد از دور ۱۶۰۰ چنان با هم مخلوط شدند که غیر قابل تشخیص بودند. به همین دلیل ما عمر گرداب را برای این مورد ۶۰۰ دور در نظر گرفتیم.
- ۵۴ ۵.۳.۳ عدد استوکس برای ذرات با جرم $5g$ و $50g$ برای الگوی دارای شکاف بیضی (بالا) و الگوی دارای گرداب (پایین) در ابتدای شبیه‌سازی‌های غبار.
- ۵۵

- ۶.۳.۳ توزیع غبار برای قرصی دارای گرداب و قرصی با شکاف بیضی شکل. ردیف‌های اول و دوم به ترتیب ساختار قرص غباری را برای الگوهای منتخب در زمان‌های ۱۰۱۹، ۱۰۵۱، ۱۱۰۲ و ۱۱۹۷ زمان مداری نشان می‌دهند. انتخاب این زمان‌ها به این دلیل است که گرداب در زاویه‌ی سمتی برابر با فشردگی ناشی از شکاف بیضی شکل قرار گیرد و مقایسه‌ی بین آنها آسان‌تر شود. ردیف‌های سوم و چهارم ضریب افزایش غبار را در زوایای سمتی مختلف برای قرص دارای گرداب و قرص دارای شکاف بیضی شکل نشان می‌دهند. نقاط روشن نمایانگر ذرات با جرم $0.05g$ و نقاط تیره نمایانگر ذرات با جرم $0.5g$ هستند. ۵۶
- ۱.۴.۳ (A) تابش پیوسته در 0.44 میلی‌متر. خط سفید فاصله‌ی $65AU$ از ستاره‌ی مرکزی را نشان می‌دهد. همانطور که این نقشه نشان می‌دهد توزیع غبار میلی‌متری بسیار نامتقارن و اختلاف شدت تابش بین مرکز توزیع و خارج از آن بیش از 300 برابر است. (B) تابش خط $5 - 6$ منوکسیدکربن که حرکت کپلری متقارن گاز را در لبه‌ی حفره نشان می‌دهد. پیش‌زمینه، توزیع غبار میلی‌متری است. (C) تابش پیوسته در $18/7$ میکرون که توسط VISIR (Very Large Telescope Imager and Spectrometer for the mid- infrared) گرفته شده است با نارنجی و تابش 0.44 میلی‌متری با سبز نشان داده شده است. اندازه‌ی پرتو آلفا با رنگ سفید در گوشه‌ی سمت چپ و اندازه‌ی پرتو VISIR با رنگ نارنجی در گوشه‌ی سمت راست نشان داده است. (تصویر از [۸۳]) ۶۰
- ۱.۱.۴ مقایسه‌ی تحول نیم‌محور بزرگ (بالا) و خروج از مرکز (پایین) سیاره با جرم $M_p = 5 \times 10^{-6} M_*$ در دو الگوی با تفکیک $N_r \times N_s = 256 \times 512$ و $N_r \times N_s = 576 \times 1152$. در حالیکه به دام افتادن سیاره تحت تأثیر تفکیک قرار نمی‌گیرد، آهنگ مهاجرت برای دو الگو اندکی متفاوت است. ۶۵
- ۱.۲.۴ سیاره‌هایی با مکان اولیه‌ی متفاوت نسبت به گرداب، سرانجام در یک موقعیت به گرداب قفل می‌شوند. تابلوی سمت چپ، مکان‌های اولیه سیارات و تابلوی سمت راست، مکان سیاره را پس از قفل شدن به گرداب نشان می‌دهد. ۶۶

- ۲۰.۲.۴ مهاجرت سیاره‌ای که در درون گرداب شکل گرفته است. تابلوی بالایی تغییر نیم‌محور بزرگ سیاره را با زمان نشان می‌دهد. سیاره ابتدا به سمت داخل و سپس به سمت خارج مهاجرت می‌کند و پس از چندین نوسان در یک فاصله‌ی ثابت به دام می‌افتد. تابلوی پایینی سمت چپ، رفتار سیاره را در دو بُعد در دستگاه متصل به گرداب نشان می‌دهد. اعداد، موقعیت‌هایی است که سیاره در آنها جهت حرکت سمتی‌اش را پس از خارج شدن از گرداب عوض می‌کند. برای واضح‌تر شدن این حرکت، آن را در طرح‌واره‌ی سمت راست نشان داده‌ایم. در نشان دادن جابه‌جایی شعاعی در این طرح‌واره اغراق شده است تا دنبال کردن حرکت سیاره آسان‌تر باشد. علامت مثبت و منفی در تابلو سمت چپ، نشان‌دهنده‌ی علامت گشتاور وارد بر سیاره از طرف گرداب است. ۶۷
- ۱.۳.۴ مهاجرت سیاره در قرص‌های با وشکسانی متفاوت. تابلوی بالایی تحول نیم‌محور بزرگ سیاره و تابلوهای پایینی مکان قفل شدن سیاره به گرداب را نشان می‌دهند. ۶۸
- ۲.۳.۴ مهاجرت سیاره در قرص‌های با چگالی زمینه‌ی متفاوت. ۶۹
- ۳.۳.۴ اندرکنش سیارات کم جرم با گرداب. ۶۹
- ۱.۴.۴ گشتاور وارد بر سیاره از طرف قرص و ستاره. محور عمودی گشتاور بدون بُعد شده و محور افقی زمان را نشان می‌دهد. ۷۱
- ۲.۴.۴ ناحیه‌ی هم‌چرخش و مسیرهای نعل اسبی اطراف سیاره. خط پررنگ، جدا کننده‌ی ناحیه‌ی هم‌چرخش از قسمت‌های دیگر قرص است. محور افقی زاویه‌ی سمتی و محور عمودی فاصله تا سیاره را نشان می‌دهد که به شعاع هیل سیاره R_H مقیاس شده است (این امر بیشتر یک سنت در مقاله‌های مرتبط با تحلیل گشتاورهاست و به همین دلیل ما نیز رعایت کردیم). ستاره در سمت پایین شکل قرار می‌گیرد. R مختصه‌ی شعاعی و a موقعیت سیاره است. علامت + محل سیاره و $\times$ نقطه‌ی ایستایی را نشان می‌دهد. در سمت چپ بالا موقعیت نقطه‌ی ایستایی داده شده است (نقطه‌ی ایستایی محل تقاطع خطوط جریان است). ۷۳
- ۱.آ خروج از مرکز الگوهای با $15 M_{Jup}$. مقدار پارامتر وشکسانی قرص را نشان می‌دهد. خروج از مرکز نواحی نزدیک به مرزها به دلیل تعیین سرعت‌ها و شرایط مرزی توسط خود ما قابل اعتماد نیستند ولی خروج از مرکز لبه‌ی خارجی شکاف به دلیل دور بودن کافی از مرزها صحیح است. همانطور که در این تصویر می‌بینیم لبه‌ی خارجی شکاف در الگوهای با وشکسانی کم به مقدار قابل توجهی بیضی و کشیده است. ۸۸

فصل ۱

شواهد رصدی قرص‌های پیش‌سیاره‌ای

۱.۱ مقدمه

نخستین شاهد رصدی که نشان‌دهنده‌ی وجود قرص‌هایی است که سیارات درون آن‌ها شکل می‌گیرند، بسیار نزدیک و دم‌دست است: منظومه‌ی شمسی. حقایقی همچون قرار گرفتن تمام سیارات در یک صفحه‌ی مداری، دوران هم‌جهت تقریباً تمام آن‌ها به دور خورشید، مدار تقریباً دایروی سیارات و یکسان بودن جهت چرخش اغلب آن‌ها با دوران مداریشان، ایده‌ی شکل‌گیری سیارات از یک ابر اولیه را به ذهن می‌آورد. این ایده به طور رسمی در سال ۱۹۷۶ توسط لاپلاس با نام "فرضیه سحابی" مطرح شد. در این فرضیه توده‌ای را در نظر می‌گیریم که در اثر گرانش در حال فروریزی است. اگر این توده دارای اندکی چرخش باشد، با کوچک شدن توده سرعت چرخش آن به دلیل بقای تکانه زاویه‌ای افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، نیروی جانب مرکز ناشی از دوران با قسمتی از نیروی گرانش به تعادل می‌رسد در حالیکه سهمی از نیروی گرانش که به سوی صفحه دوران است شکل توده را به صورت قرص درمی‌آورد. در حین فروریزش انرژی پتانسیل گرانشی آزاد شده باعث گرم شدن قرص می‌شود و در نهایت قرصی داغ در اطراف ستاره تازه متولد شده شکل می‌گیرد. با گذر زمان دمای قرص به دلیل تابش پایین آمده و قرص تکه‌تکه می‌شود که این تکه‌ها سیارات را به وجود می‌آورند [۲۴]. اگرچه این فرضیه دارای ایراداتی است اما می‌توان آن را سنگ بنای الگوهای بعدی برای شکل‌گیری سیستم‌های سیاره‌ای دانست. از طرف

دیگر چون این فرضیه تنها به خورشید محدود نمی‌شود، پیش‌بینی می‌کند که باید تعداد بسیار زیادی سیاره و قرص پیش‌سیاره‌ای اطراف ستارگان جوان وجود داشته باشد. متأسفانه لاپلاس به اندازه‌ی کافی عمر نکرد تا شاهد کشف صدها منظومه‌ی فراخورشیدی باشد^۱.

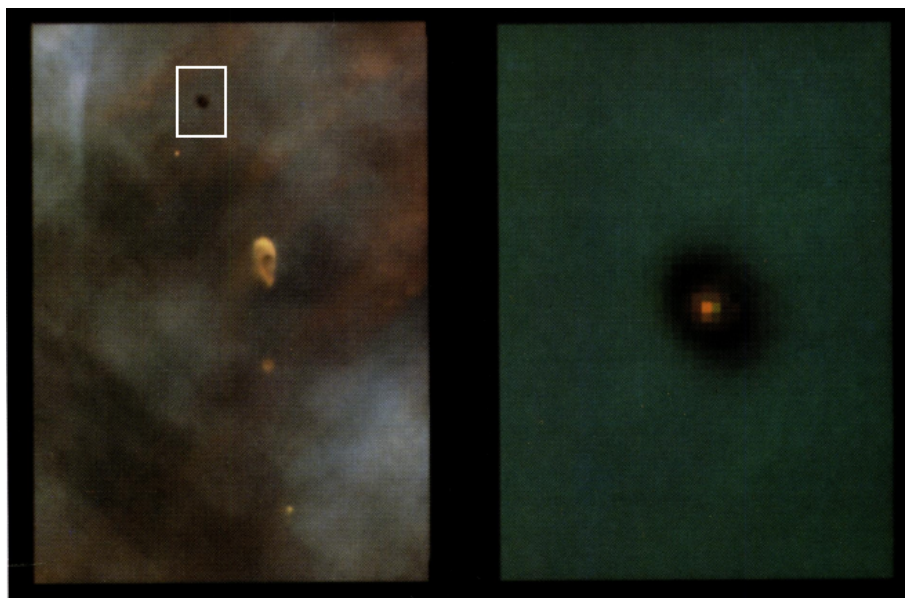
برای یافتن قرص‌های پیش‌سیاره‌ای، به خاطر دمای پایین این اجرام، نیاز به رصد در طول موج‌های بلند است. به همین دلیل تا اواخر قرن بیستم که تلسکوپ‌های فروسرخ آغاز به کار کردند مشاهده‌ای از این اجرام در دست نبود. یکی از اولین نشانه‌های وجود قرص اطراف ستارگان پیش‌رشته‌ی اصلی، با استفاده از رصد خط گسیلی CO ^{۱۳} انجام شد. سارجنت و بک ویت در ۱۹۸۷ نشان دادند که در اطراف دو نمونه از ستارگان جوان خورشیدمانند ساختارهای گازی متمرکز و کشیده وجود دارند [۷۷]. ماهواره‌ی نجومی فروسرخ (IRAS)^۲ چشم ما را به آسمان فروسرخ باز کرد و اولین مطالعه آماری قرص‌ها توسط اشتروم و همکارانش در ۱۹۸۹ انجام شد [۸۲]. مشاهدات آن‌ها در طول موج ۲۰۲ میکرومتر از ۸۳ ستاره جوان از مجموعه‌ی ستاره‌ساز واقع در صورت‌های فلکی گاو و ارا به ران نشان داد که دست‌کم ۶۰ درصد این ستارگان جوان (با عمر حدود ۳ میلیون سال) دارای قرص هستند. در حالیکه تنها ۱۰ درصد ستارگان پیش‌رشته‌ی اصلی با عمری حدود ۱۰ میلیون سال قرص دارند. این آمار علاوه بر اینکه وجود قرص‌های پیش‌سیاره‌ای را قویاً تأیید می‌کند، تخمینی از عمر این قرص‌ها را نیز به دست می‌دهد. مدتی بعد در ۱۹۹۰ بک ویت و همکارانش با انتشار نتایج رصدهایشان در طول موج پیوسته ۱۰۳ میلی‌متر بر روی ۸۶ ستاره از همان ناحیه قبلی (گاو-ارابه‌ران) نشان دادند که این قرص‌ها مقادیر کافی غبار برای ساختن سامانه‌های سیاره‌ای را دارا هستند [۶].

اما تصویری که تلسکوپ فضایی هابل (HST)^۳ در طول موج مرئی و با تفکیک بالا از سحابی جبار (M42) در سال ۱۹۹۴ منتشر کرد اولین تصویر مستقیم از قرص‌های پیش‌سیاره‌ای بود که ساختار تخت آن‌ها را نشان می‌داد و دلیلی انکار ناپذیر بر وجود چنین اجرامی بود [۵۸]. شکل ۱۰.۱.۱ این قرص را نشان می‌دهد. دیده شدن ستاره‌ی مرکزی در میان توده‌ای تاریک در تصویر سمت راست حاکی از تخت بودن قرص است. از طرفی اودل ون و همکارانش بیان می‌کنند که این قرص غباری در نواحی داخلی از لحاظ اپتیکی ضخیم و در نواحی خارجی‌تر نازک است به طوری که آن‌ها توانستند چگالی ستونی قرص را در نواحی خارجی اندازه بگیرند و جرم قرص را حداقل $g \times 10^{28} \times 4/4 - 1/1$ تخمین بزنند [۵۸].

^۱<http://exoplanet.eu>

^۲Infrared Astronomical Satellite

^۳Hubble Space Telescope



شکل ۱.۱.۱: تصویر گرفته شده از جرم ۴۰۵-۱۸۳ در سحابی جبار. جرم تاریک در بالای تصویر که با مربعی سفید مشخص شده در تصویر سمت راست به تنهایی نشان داده شده است. ابعاد این جرم در تصویر $۱/۲'' \times ۰/۹''$ و جرم ستاره حداقل $۰/۲ M_{\odot}$ است [۵۸].

در دهه‌ی اخیر با کمک تلسکوپ‌های فروسرخ رصدخانه‌ی فضایی فروسرخ (ISO)^۴ و تلسکوپ فضایی اسپیتزر (Spitzer)^۵ اطلاعات بسیار گسترده‌ای درباره‌ی جرم ستارگان مرکزی، سن، محیط و شرایط تحولی قرص‌های پیش‌سیاره‌ای به دست آمده است. در نمونه‌گیری‌های بزرگ اسپیتزر حدود ۹۰ درصد نواحی ستاره‌ساز واقع در فاصله ۵۰۰ پارسیکی نقشه‌برداری شد و طیف فروسرخ میانی بیش از ۲۰۰۰ جرم ستاره‌ای جوان موجود در این محدوده بدست آمد [۲۶]. همچنین با پیشرفت روشها و ابزار تداخل‌سنجی امکان دریافت داده‌های رصدی در طول موج‌های کوتاه‌تر و تفکیک بالاتر توسط تلسکوپ‌های آرایه‌ای زمینی فراهم گردید. آرایه زیر میلی‌متری (SMA)^۶ به پژوهشگران اجازه داد تا حتی نقشه‌هایی از ساختار این قرص‌ها بدست آورند. اطلاعاتی که تا کنون به کمک تلسکوپ فضایی هرشل

^۴Infrared Space Observatory

^۵Spitzer Space Telescope

^۶Submillimeter Array

(Herschel)^۷ و آرایه‌ی بزرگ زیرمیلیمتری و میلیمتری آتاکاما (ALMA)^۸ و طرح‌هایی که برای آینده‌ی این تلسکوپ‌ها پیش‌بینی شده است، انفجاری در دانش ما از قرص‌های پیش‌سیاره‌ای بوجود خواهد آورد و معماهایی همچون ساختار داخلی و مسیر تحولی این اجرام را حل خواهد کرد. پاسخ این معماها به همراه اطلاعاتی که از سیارات فراخورشیدی به دست می‌آید کمک بسیار بزرگی به تصحیح الگوهای سیاره‌سازی خواهد کرد.

ما در قسمت‌های بعد به دسته‌بندی مشاهده‌ای قرص‌های پیش‌سیاره‌ای خواهیم پرداخت و سپس دسته‌ای خاص از این قرص‌ها را در قسمت ۳.۱ معرفی می‌کنیم. در قسمت آخر نیز تعدادی از مشاهدات و نقشه‌های تصویری بدست آمده از این اجرام را معرفی خواهیم کرد.

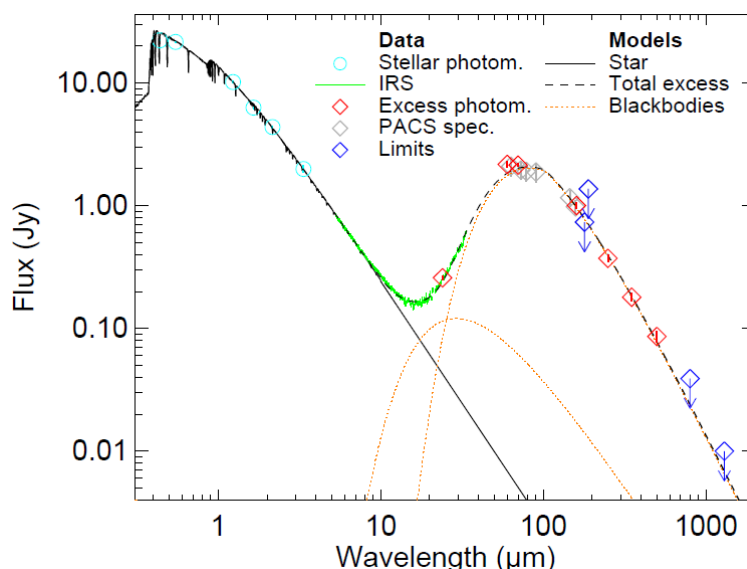
۲.۱ توزیع طیفی انرژی قرص‌های پیش‌سیاره‌ای

قرص‌های پیش‌سیاره‌ای به دلیل دارا بودن غبار فراوان و در نتیجه عمق اپتیکی زیاد می‌توانند تابش حرارتی داشته باشند. این قرص‌ها همچنین بسیار گسترده هستند (صدها واحد نجومی) و میزان دریافت انرژی آن‌ها از ستاره‌ی مرکزی متفاوت است. بنابراین، طیف دریافتی از این اجرام را می‌توان حاصل برهم‌نهی تعداد زیادی جسم سیاه با دماهای مختلف دانست. بنابر الگوهای موجود برای این قرص‌ها، می‌توان طول موج‌های مناسب برای مشاهده‌ی نواحی مختلف آن‌ها را تعیین کرد و پس از بدست آوردن داده‌ها و مقایسه با الگوها از ساختار این اجرام آگاه شد. یکی از نمودارهای پایه‌ای در مطالعه‌ی قرص‌ها نمودار "توزیع طیفی انرژی (SED)"^۹ است که مقدار انرژی دریافتی را در طول موج یا بسامدهای مختلف نشان می‌دهد. در شکل ۱.۲.۱ توزیع طیفی انرژی یک قرص پیش‌سیاره‌ای را به عنوان نمونه آورده‌ایم که شامل الگوهای نظری و نتایج زیادی از مشاهدات مختلف می‌باشد.

^۷Herschel Space Observatory

^۸Atacama Large Millimeter/submillimeter Array

^۹Spectral Energy Distribution



شکل ۱.۲.۱: توزیع طیفی انرژی برای 49 Cet. خطوط پیوسته الگوی نظری و نشانه‌های نقطه‌ای داده‌های رصدی با تلسکوپ‌های مختلف را نشان می‌دهد. خط‌چین‌ها مولفه‌های جسم سیاه از مناطق مختلف قرص است [۷۵].

۱.۲.۱ قسمت‌های مختلف توزیع طیفی انرژی

تفسیر و توضیح دقیق توزیع طیفی انرژی (از این پس **تطا**، SED) قرص‌های پیش‌سیاره‌ای به خاطر ساختار پیچیده آن‌ها و دارا بودن مقدار عظیمی غبار بسیار مشکل است. اما برای داشتن یک تصور اولیه از قرص هنگام دیدن تطای آن می‌توان از تخمین‌های ساده‌ای استفاده کرد. فرض کنید یک قرص تخت داریم که در راستای عمودی همدماست و بنابراین در هر نقطه‌ای به صورت جسم سیاه تابش می‌کند یعنی $I_\nu(r) = B_\nu(T(r))$ که $I_\nu(r)$ شدت تابش و $B_\nu(T(r))$ تابع تابش جسم سیاه است. اگر زاویه‌ی انحراف قرص از خط دید ما i و فاصله‌ی قرص از زمین d ، باشد شار دریافتی از نواری به ضخامت dr که در فاصله‌ی r از ستاره‌ی مرکزی واقع می‌باشد برابر است با

$$dF_\nu = d\Omega B_\nu = \frac{\pi r dr}{d^2} \cos(i) B_\nu \quad (1.2.1)$$

که $d\Omega$ زاویه‌ی فضایی است که نوار تحت آن دیده می‌شود. برای محاسبه‌ی شار کل دریافتی باید روی تمام قرص انتگرال گرفت

$$F_\nu = \frac{\pi \cos(i)}{d^2} \int_{r_{in}}^{r_{out}} B_\nu(T(r)) r dr \quad (2.2.1)$$

باید توجه داشت که انرژی در بازه‌ی بسامدی $\Delta\nu$ برابر است با

$$\Delta E_\nu = F_\nu \Delta\nu = F_\nu \nu \Delta(\log \nu). \quad (3.2.1)$$

چون $\Delta(\log \nu)$ بازه‌ای است که انرژی در آن محاسبه می‌شود و مقداری ثابت است، می‌توان گفت انرژی متناسب با νF_ν است. در نواحی داخل قرص که با بسامدهای زیاد ($\frac{h\nu}{kT} \gg 1$) تابش می‌کند تابع تابش جسم سیاه (پلانک) به صورت زیر در می‌آید

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \simeq \frac{2h\nu^3}{c^2} e^{-h\nu/kT} \quad (4.2.1)$$

$$\nu F_\nu \propto \nu^4 e^{-h\nu/kT} \quad (5.2.1)$$

به این ناحیه از تپا منطقه وین^{۱۰} می‌گویند. برای نواحی خارجی قرص که در بسامدهای پایین ($\frac{h\nu}{kT} \ll 1$) تابش می‌کند تابع پلانک به رابطه‌ی رایله-جینز^{۱۱} تبدیل می‌شود و داریم

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \simeq \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{kT}{h\nu} \quad (6.2.1)$$

$$\nu F_\nu \propto \nu^3. \quad (7.2.1)$$

در نواحی خارجی قرص چگالی کمتر است و در نتیجه با دور شدن از ستاره، قرص از لحاظ اپتیکی نازک‌تر می‌شود. پس کدری محیط می‌تواند بر آهنگ انرژی دریافتی تاثیر بگذارد. اگر فرض کنیم ارتباط کدری با بسامد به صورت $K_\nu \propto \nu^\beta$ باشد، نمایه تپا در بسامدهای زیاد به صورت زیر در می‌آید

$$I_\nu = (1 - e^{-\tau_\nu}) B_\nu(T) \simeq \tau_\nu B_\nu(T) \propto K_\nu B_\nu(T) \quad (8.2.1)$$

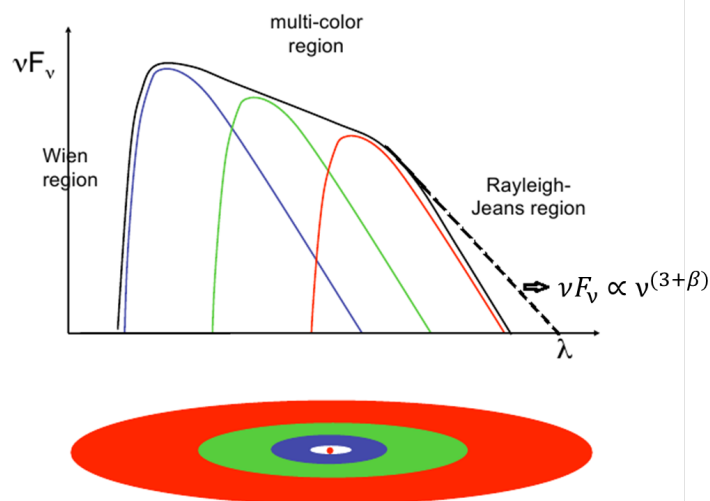
$$\Rightarrow \nu F_\nu \propto \nu \nu^\beta \nu^3 \propto \nu^{3+\beta}. \quad (9.2.1)$$

شکل ۲.۲.۱ شمای ساده یک تپا با تخمین‌های فوق را نشان می‌دهد.

با وارد کردن جزییات بیشتر در الگوی قرص می‌توان تپای دقیق‌تری بدست آورد. به عنوان مثال در تپای شکل ۳.۲.۱ عوامل متعددی مانند سهم ستاره‌ی مرکزی، دو مؤلفه‌ای بودن قرص، انحنای سطح خارجی و پفیده بودن مرز داخلی قرص در نظر گرفته شده است [۲۳]. در این الگو به دلیل ته‌نشینی غبار در لایه‌ی میانی، لایه‌ی سطحی قرص دارای غبار کمتر و در نتیجه عمق اپتیکی کوچک‌تر از لایه‌ی میانی

^{۱۰}Wien

^{۱۱}Rayleigh-Jeans

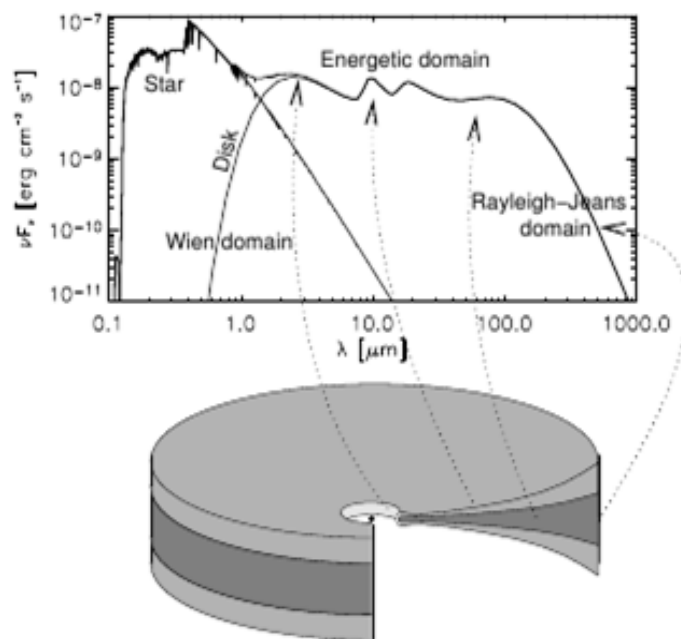


شکل ۲.۲.۱: توزیع طیفی انرژی برای تابش جسم سیاه یک قرص با عمق اپتیکی کم در نواحی خارجی. دقت کنید که از لحاظ رصدی νF_ν و λF_λ دارای شکل یکسانی هستند و تنها در یک ضریب متفاوتند. (با اجازه از ک. دولموند)

است. بنابراین ذرات غبار لایه‌ی سطحی انرژی بیشتری از ستاره دریافت می‌کنند و تابش آن‌ها نیز در طول‌موج‌های کوتاه‌تر خواهد بود و باعث ایجاد یک برآمدگی در تپا می‌شود. نواحی میلی‌متری تپا عمده‌تاً به تابش نواحی خارجی قرص مربوط است و از شیب این قسمت می‌توان اطلاعاتی درباره‌ی غبار موجود در قسمت‌های خارجی قرص بدست آورد. در الگوی این تپا تابش‌های دیگر مانند پراکندگی ذرات غبار در نظر گرفته نشده‌اند. تابش‌های پراکندگی می‌توانند تغییرات مهمی در تپا ایجاد کنند و با کمک آن‌ها حتی اطلاعاتی همچون ترکیبات، شکل و جهت‌گیری ذرات غبار در لایه‌های بالایی از نتایج رصدی قابل استخراج می‌باشد.

۲.۲.۱ دسته‌بندی اجرام ستاره‌ای جوان

متداول‌ترین دسته‌بندی اجرام ستاره‌ای جوان، دسته‌بندی بر اساس آهنگ تابش در منطقه‌ی فروسرخ تپا است. این نوع دسته‌بندی که توسط لادا در ۱۹۸۷ اعلام شد، اجرام ستاره‌ای جوان را بر اساس شیب توزیع طیفی انرژی‌شان در محدوده‌ی بین ۲ تا ۲۵ میکرومتر در سه دسته قرار می‌دهد [۴۰]. اگر این



شکل ۳.۲.۱: توزیع طیفی انرژی برای یک قرص با در نظر گرفتن جزئیات بیشتر در قرص و همچنین وارد کردن طیف انرژی ستاره [۲۳].

شیب (α_{IR}) که به صورت زیر تعریف می‌شود

$$\alpha_{IR} = \frac{d \log \lambda F_{\lambda}}{d \log \lambda} \quad (۱۰.۲.۱)$$

مثبت باشد، دسته‌ی ۱، اگر منفی باشد اما تطای دارای مقدار قابل توجهی تابش اضافه در محدوده‌ی فروسرخ دور باشد، دسته‌ی ۲ و اگر مقدار این تابش اضافه بسیار کم باشد دسته‌ی ۳ است. پس از اینکه قدرت آشکارسازی ابزار در محدوده‌ی میلیمتری افزایش یافت در ۱۹۹۳ آندره و همکارانش دسته‌ی ۰ را نیز اضافه کردند [۲]. اجرام دسته‌ی صفر هیچ تابشی در محدوده‌ی طول‌موج‌های کمتر از ۱۰ میکرومتر ندارند و تطای آن‌ها شبیه تابش جسم سیاهی با دمای ۳۰ درجه کلین است. این دسته‌بندی را می‌توان با مراحل تحولی اجرام ستاره‌ای جوان منطبق دانست. شکل گرفتن یک ستاره و سیاره‌های اطراف آن با فروریزش ابر مولکولی اولیه آغاز می‌شود. ستاره در این مرحله کاملاً در پوششی از غبار سرد غوطه‌ور است و تنها تابشی که از این جرم دریافت می‌کنیم به صورت تابش جسم سیاه از غبار اطراف ستاره است.

این مرحله مطابق با دسته‌ی صفر است. با گذشت زمان، پوش غباری به سمت قرص فرو می‌ریزد، بادهای و برون‌شارها شکل می‌گیرد و در نتیجه چگالی غبار در دو سوی قرص کاهش می‌یابد. تابش ستاره بیشتر نمایان می‌شود و تابش جسم سیاه ستاره به طول‌موج‌های کوتاه منتقل می‌گردد در حالیکه هنوز میزان قابل توجهی شار از قرص و پوش غباری اطراف دریافت می‌شود. برهم‌نهی این تابش‌ها شیب افزایشی را در منطقه فروسرخ ایجاد می‌کند و جرم در دسته‌ی ۱ قرار می‌گیرد. پوش اطراف جرم در اثر فروریزش مواد به سمت ستاره و قرص و همچنین بادهای کم‌کم از بین می‌رود و تنها مؤلفه‌های باقیمانده در تطای ناشی از ستاره و قرص می‌باشد و در این مرحله جرم به دسته‌ی ۲ وارد می‌شود. نام قرص پیش‌سیاره‌ای به این مرحله از عمر جرم اطلاق می‌شود. در نهایت قرص بر روی ستاره برافزایش می‌کند و باقیمانده‌ی آن توسط فرایند تبخیرنوری^{۱۲} پراکنده می‌گردد و آنچه باقی می‌ماند قرصی از خرده سیارات و سیارات است که به آن قرص نخاله^{۱۳} می‌گویند. تابش قرص در این حالت بسیار ناچیز و جرم در دسته‌ی ۳ است. این دسته‌بندی و مراحل تحولی مطابق با هر دسته در شکل ۴.۲.۱ نشان داده شده است.

دسته‌بندی دیگری نیز در مقاله‌ها استفاده می‌شود که براساس آهنگ برافزایش روی ستاره در طول‌موج‌های مرئی است: ت-گاوه‌های کلاسیک و ضعیف^{۱۴}. این دسته‌بندی تقریباً مطابق با دسته‌های ۲ و ۳ در دسته‌بندی قبلی است. ت-گاوه‌های کلاسیک دارای تابش‌های قوی در $H\alpha$ و فرابنفش هستند که نشانه‌ی برافزایش روی ستاره‌ی مرکزی است. اما اثر برافزایش در ت-گاوه‌های ضعیف بسیار کم است و یا هیچ‌گونه نشانی از برافزایش نشان نمی‌دهند [۸۸].

۳.۱ تپاهای عجیب: گذار قرص‌ها

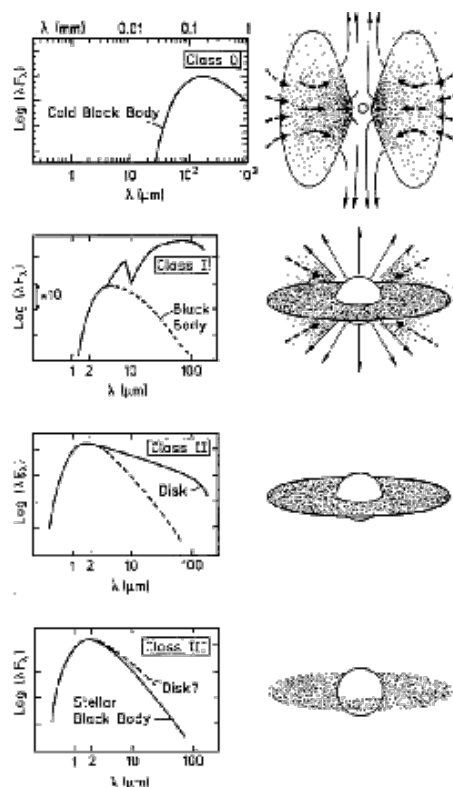
گذار قرص‌ها^{۱۵} برای اولین بار توسط IRAS به عنوان اجرامی با آهنگ تابش اضافه (بر تابش ستاره‌ی کم یا ناچیز در طول‌موج‌های کمتر از ۱۰ میکرومتر و تابش اضافه‌ی بسیار زیاد در طول‌موج‌های بیش از ۱۰ میکرومتر شناخته شدند [۸۲، ۸۹]. اگر به شکل ۳.۲.۱ دقت کنیم متوجه می‌شویم که این تابش مفقود شده در محدوده‌ی کمتر از ۱۰ میکرومتر مربوط به نواحی درونی قرص است. به عبارت دیگر

^{۱۲}photoevaporation

^{۱۳}debris disc

^{۱۴}CTTS and WTTS

^{۱۵}transition discs

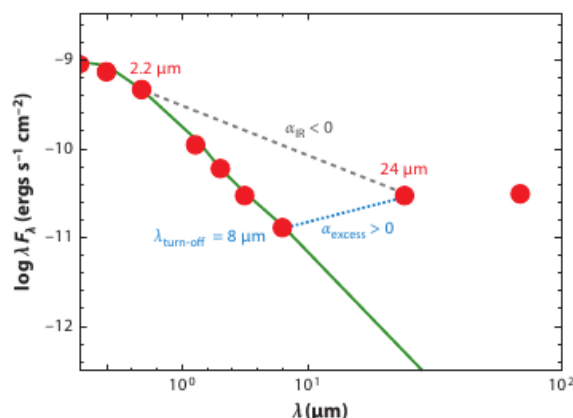


شکل ۴.۲.۱: دسته‌بندی اجرام ستاره‌ای جوان با توجه به شیب تپا در ناحیه‌ی فروسرخ. این دسته‌بندی با مراحل تحولی آن‌ها به خوبی تطابق دارد. این تصویر که از [۳] برگرفته شده است مؤلفه‌های مختلف تپا را نیز نشان می‌دهد.

می‌توان گفت که این تپاهای عجیب مطابق با قرص‌هایی هستند که قسمت درونی آنها از غبار خالی شده است. به دلیل اینکه ابتدا تصور می‌شد این عدم حضور قسمت درونی ناشی از نوربخار شدن نواحی نزدیک‌تر به ستاره است و چون این اتفاق زمانی می‌افتد که آهنگ برافزایش در قرص به خوبی پایین آمده و قرص پیر شده باشد، این اجرام را گذارقرص نامیدند به نشان اینکه قرص پیش‌سیاره‌ای در این مرحله در حال گذر از یک قرص معمولی به قرص نخاله است. اما با افزایش تعداد رصدهای این اجرام مشخص شد که گذارقرص‌ها بسیار متنوع هستند بطوریکه هنوز دسته‌بندی مشخص و پذیرفته‌شده‌ای برای این اجرام وجود ندارد.

افراد مختلف معیارهای متفاوتی برای مشخص کردن گذارقرص‌ها دارند. به عنوان مثال، معیاری

که سیزا در ۲۰۰۷ برای متمایز ساختن گذارقرص‌ها بر اساس تطای آن‌ها ارائه داد بر اساس دو پارامتر $\lambda_{turn-off}$ که بلندترین طول‌موجی است که تابش ستاره در تطای بر تابش قرص غالب است، و α_{excess} که شیب تطای در محدوده‌ی بین $\lambda_{turn-off}$ تا ۲۴ میکرومتر است، تعریف می‌شود [۱۶]. اگر $\alpha_{excess} > 0$ جرم را گذارقرص می‌نامند. این مفهوم در شکل ۱.۳.۱ نشان داده شده است. افراد دیگری تعریف گذارقرص‌ها را محدود می‌کنند به اجرامی با هیچ تابش اضافه‌ای در محدوده‌ی فروسرخ نزدیک (۵-۱ میکرومتر)، شیب تند در فروسرخ میانه (۲۵-۵ میکرومتر) و تابش اضافه‌ی بسیار زیاد در فروسرخ دور (۲۰۰-۲۵ میکرومتر) [۵۶، ۸۰]. این تعریف بسیار محدود کننده است و بسیاری از اجرام که نه دارای تطای کامل هستند و نه شامل این سه معیار، در هیچ طبقه‌بندی نمی‌گنجند. به همین دلیل بسیاری از افراد گذارقرص‌ها را اجرامی با کاهش قابل توجهی در تابش فروسرخ نسبت به ت-گاوهای کلاسیک تعریف می‌کنند [۵۷، ۱۷]. اگر این تعریف آخر را که تعداد زیادی از اجرام را در بر می‌گیرد به عنوان تعریف پایه بپذیریم، اسامی مختلفی را می‌توان به انواع مختلف گذارقرص‌ها نسبت داد:

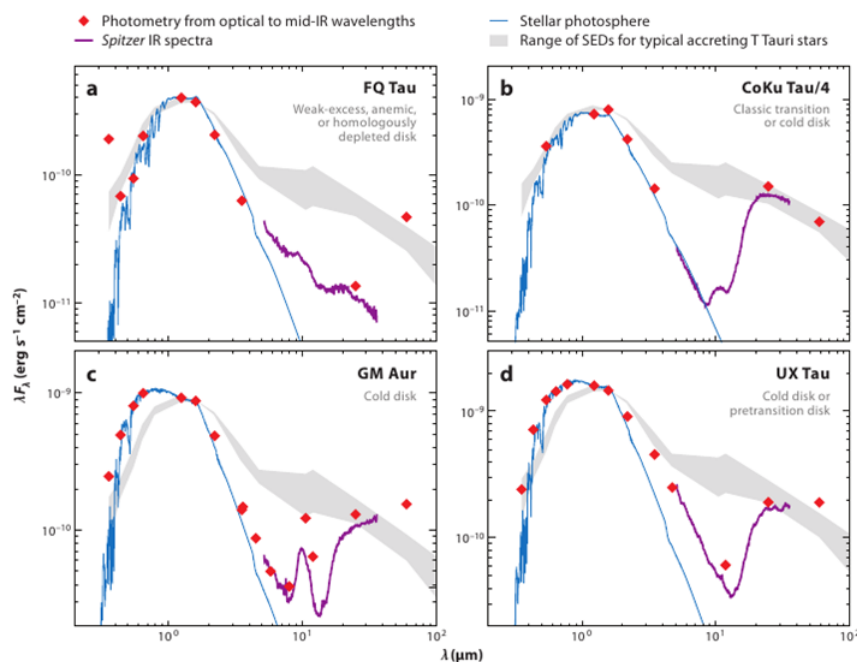


شکل ۱.۳.۱: الگوواره‌ای که مفهوم α_{excess} را نشان می‌دهد. خط ممتد (سبز) تطای فرضی است و نقاط (قرمز) نتایج مشاهدات فرضی هستند. اگر $\lambda_{turn-off}$ در ۲.۲ میکرومتر باشد، α_{excess} منفی و برای $\lambda_{turn-off}$ در ۸ میکرومتر، α_{excess} مثبت است و در نتیجه جرم را گذارقرص می‌گویند. تعیین $\lambda_{turn-off}$ توسط طیف و مشخصات ستاره تعیین می‌شود که این، اهمیت مطالعه برای تعیین دقیق‌تر تطای ستارگان این اجرام را مشخص می‌سازد. (شکل برگرفته از [۸۸])

- گذار قرص‌های کلاسیکی^{۱۶}: اجرامی با هیچ تابش اضافه در فروسرخ نزدیک و $\alpha_{excess} > 0$ [۵۶].
- قرص‌های سرد^{۱۷}: اجرامی با شیب افزایشی در محدوده‌ی فروسرخ میانه، بدون توجه به آهنگ تابش در فروسرخ نزدیک [۱۲].
- قرص‌های ضعیف، قرص‌های شبه‌خالی یا قرص‌های با تابش اضافه کم^{۱۸}: اجرامی که دارای افت شار در تمام طول‌موج‌های فروسرخ هستند و $\alpha_{excess} < 0$ (این قرص‌ها انطباق خوبی با الگوهای دارند که غبارها به طور قابل توجهی رشد کرده‌اند) [۴۱].
- پیش‌گذار قرص‌ها: اجرامی با تطای شبیه به قرص‌های سرد اما با آهنگ تابش اضافه‌ی بیشتر در فروسرخ نزدیک. الگوهای نظری این اجرام دارای یک شکاف بزرگ در قرص است که قرص داخلی را از خارجی جدا می‌کند [۲۵].

برای مشخص شدن تفاوت دسته‌بندی بالا، یک نمونه از هر کدام را در شکل ۲.۳.۱ آورده‌ایم. در کنار این تنوع بالا در نام‌گذاری و دسته‌بندی گذار قرص‌ها، بازه‌های گسترده‌ای برای جرم و آهنگ برافزایش این اجرام وجود دارد. ناجیتا و همکارانش در ۲۰۰۷ نمونه‌ای با ۶۰ ستاره‌ی پیش‌رشته‌ی اصلی در صورت‌های فلکی ثور-ارابه‌ران را مطالعه کردند و نشان دادند ۱۲ مورد (۵ درصد) گذار قرص هستند [۵۷]. آنها متوجه شدند که گذار قرص‌ها جرم بیشتر و آهنگ برافزایش کمتری از دیگر قرص‌ها دارند. تعداد گذار قرص‌ها با جرم‌های حدود ۰/۱ تا ۰/۰۱ جرم خورشید بیشتر از تعداد قرص‌های معمولی در همین بازه‌ی جرم است. همچنین آهنگ برافزایش آنها بین 10^{-8} تا 10^{-9} جرم خورشید در سال می‌باشد در حالیکه آهنگ برافزایش قرص‌های معمولی تا 10^{-6} جرم خورشید در سال هم می‌رسد. آنها پیشنهاد دادند که گذار قرص‌هایشان با الگوهای سیاره‌ای که صورت دینامیکی این حفره‌ها را ایجاد کرده منطبق می‌شوند. از طرف دیگر در اولین مقاله از سری سه‌گانه "طبیعت گذار قرص‌های پیش‌ستاره‌ای"، سیزا و همکارانش در ۲۰۱۰ تعداد ۲۶ گذار قرص را در ابر مولکولی صورت فلکی مارافسای بررسی کردند و مشخص ساختند که جرم این گذار قرص‌ها بین ۰/۶ تا ۴۰ جرم مشتری (۰/۰۰۰۶ تا ۰/۰۴ جرم خورشید) و آهنگ برافزایش آنها بین 10^{-7} تا 10^{-11} جرم خورشید در سال قرار دارند. ۹ مورد از ۲۶ تا که دارای

^{۱۶}classical transition discs^{۱۷}cold discs^{۱۸}anemic, homologously or weak-excess transition discs



شکل ۲.۳.۱: دسته‌بندی گذارقرص‌ها. نوار خاکستری روشن تطای نوعی برای ت-گاوهای کلاسیکی را نشان می‌دهد که با توجه به الگوهای مختلف قرص‌های پیش‌سیاره‌ای ساخته شده است. a نمونه‌ای از تطای یک قرص ضعیف را نشان می‌دهد که تابش فروسرخ آن در تمام محدوده‌ی فروسرخ بسیار کمتر از تطای نوعی ت-گاوهای کلاسیکی است. این اجرام شبیه به الگوهایی هستند که دانه‌های غبار در آنها رشد کرده‌اند و بنابراین به جای ناحیه‌ی فروسرخ در طول موج‌های بلندتر تابش می‌کنند. b یک گذارقرص کلاسیکی را نشان می‌دهد که البته در محدوده‌ی قرص‌های سرد نیز قرار می‌گیرد. این قرص‌ها هیچ تابش اضافی در فروسرخ نزدیک ندارند که حاکی از خالی بودن قسمت درونی قرص می‌باشد. c نمونه‌ای از یک قرص سرد است با یک قله کوچک در ۱۰ میکرومتر که به ویژگی سیلیکات معروف است و نشانه‌ی وجود غبارهای سیلیکات بی‌شکل است. d یک پیش‌گذارقرص که دارای مقداری تابش اضافه در فروسرخ دور، افت شار در فروسرخ نزدیک و تابش قابل توجه منطبق با الگوهای ت-گاو در فروسرخ دور است. وجود تابش اضافه در محدوده‌ی فروسرخ نزدیک و دور نشانی از حضور قرص به ترتیب در نواحی نزدیک به ستاره و نواحی خارجی قرص است. به عبارت دیگر این اجرام دارای یک شکاف بزرگ در محدوده‌ی میانی هستند (شکل برگرفته از [۸۸]).

جرم کمتر از ۲/۵ برابر جرم مشتری هستند هیچ اثری از برافزایش نشان نمی‌دهند و مطابق با الگوهایی هستند که تبخیرنوری در حال تبدیل آنها به قرص‌های نخاله است [۱۷]. در دو مقاله‌ی بعدی که در

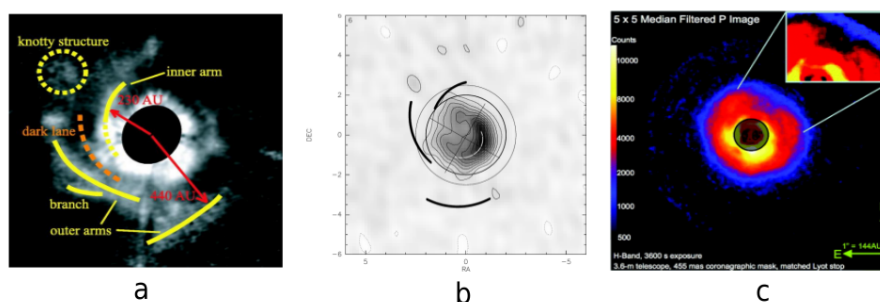
۲۰۱۲ و با داده‌های بیشتر و کامل‌تری انجام شده است نتایج مشابهی به دست آمد. آنها همچنین تخمینی برای عمر گذارقرص‌ها بدست آوردند که مقدار آن بین ۲-۳ میلیون سال است. تنوع بالا در خواص فیزیکی و انواع مختلف گذارقرص‌ها حاکی از وجود سازوکارهای متفاوتی در شکل‌گیری آنهاست. سازوکارهایی همچون حضور سیاره یا سیاراتی پرجرم، رشد غبار و تبخیرنوری قادر هستند حفره‌هایی در قرص‌ها ایجاد کنند ولی هنوز هیچ الگوی پذیرفته شده‌ای از یک نوع سازوکار یا ترکیبی از آنها وجود ندارد.

۴.۱ تصاویر گذارقرص‌ها و ساختارهای نامتقارن

توزیع طیفی انرژی اگرچه اولین وسیله کشف گذارقرص‌ها بوده و همچنین اطلاعات بسیار ارزشمندی درباره‌ی این اجرام تا کنون در اختیار ما گذاشته است، اما احتمال اشتباه در آنها وجود دارد. به عنوان مثال تطای یک قرص معمولی و کامل که از پهلوی رصد می‌شود شبیه یک قرص سرد به نظر می‌رسد [۵۴] و یا یک مشاهده‌ی جدید بر روی یک ستاره‌ی جوان که تا کنون یک گذارقرص تصور می‌شد نشان داد که تابش فروسرخ دور در تطای این جرم نشأت گرفته از یک توده‌ی ابر در نزدیکی آن است و این جرم، یک منبع نقطه‌ای و یا یک قرص پیر بدون حفره داخلی است [۵۰]. از طرف دیگر برای توضیح تنوع زیاد گذارقرص‌ها و سازوکار شکل‌گیری آنها نیاز داریم که این قرص‌ها - به خصوص نواحی داخلی آنها - را "بینیم" به این معنا که در طول موج‌های مناسب و با تفکیک بالا تصاویری از این اجرام تهیه کنیم. در دهه‌ی اخیر با پیشرفت ابزار و افزایش قدرت تفکیک تلسکوپ‌های فروسرخ تعداد تصاویر گرفته شده از گذارقرص‌های نزدیک بسیار افزایش یافته و امید است با انتشار نتایج طرح‌های آینده، معمای گذارقرص‌ها حل شود. اما تا کنون نتایج تصاویری که بدست آمده نکته بسیار جالبی را آشکار ساخته است که این قرص‌ها معمولاً ساختارهای نامتقارن دارند.

یکی از اجرامی که بسیار مورد توجه است AB Aur می‌باشد که در فاصله‌ی ۱۴۴ پارسی از ما قرار گرفته و عمری حدود ۴ میلیون سال دارد. فوکوگاوا و همکارانش در ۲۰۰۴ تصویری با تفکیک ۰/۱ ثانیه قوسی با تلسکوپ سوبارو تهیه کردند [۲۹]. در تصاویر آنها پدیده‌ی بسیار جالبی وجود داشت که اهمیت تهیه تصاویر از گذارقرص‌ها را بیشتر نمود. این پدیده‌ی جالب حضور ساختاری نامتقارن و شبیه به دو بازوی مارپیچی در فاصله‌ی بین ۲۰۰ تا ۴۵۰ واحد نجومی بود. سال بعد در ۲۰۰۵ پیتو و همکارانش مشاهدات دقیق‌تر و در طول موج‌های متفاوت CO و همچنین تابش پیوسته بین ۳ تا ۱/۳ میلی‌متر انجام

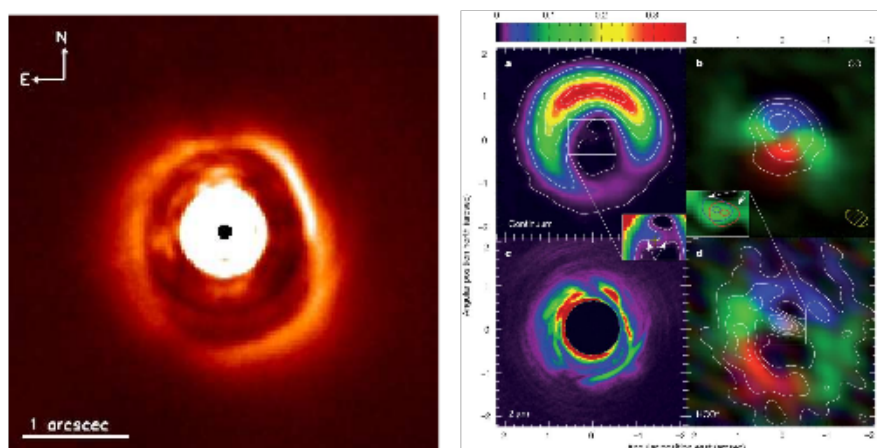
دادند. آنها توانستند نواحی داخلی‌تر قرص را مشاهده کنند و متوجه شدند علاوه بر ساختارهای قبلی، یک ساختار نامتقارن دیگر در فاصله ۱۴۰ واحد نجومی واقع شده در حالیکه لبه‌ی حفره‌ی داخلی قرص در فاصله ۷۰ واحد نجومی است. آنها این ساختار را یک بازو در نظر گرفتند در صورتیکه همانطور که در تصویر میانی شکل ۱.۴.۱ دیده می‌شود این ساختار بیشتر شبیه ”بادام زمینی“ است [۶۸]. در سال ۲۰۰۸ *آپنهاایمر* و همکارانش با استفاده از روش‌های قطبش‌سنجی از غبار ناحیه‌ی بین ۴۳ تا ۳۰۲ واحد نجومی این جرم، تصویر تهیه کردند. آنها حضور یک شکاف را در ۱۲۰ واحد نجومی گزارش کردند و همچنین خبر از احتمال وجود یک منبع نقطه‌ای در ناحیه‌ی خارجی این نوار دادند. هرچند سطح اطمینان رصدی این منبع نقطه‌ای بسیار پایین است [۶۰].



شکل ۱.۴.۱: تصاویر گرفته شده از AB Aur. **a** تصویر تهیه شده در نوار H (۱/۵ تا ۱/۸ میکرومتر). تمایل حدوداً ۳۰ درجه قرص در این تصویر تصحیح شده و ساختارهای اصلی قابل تشخیص نیز مشخص شده‌اند. **b** این تصویر در طول موج ۱/۴ میلی‌متر پیوسته تهیه شده است. ساختارهای کشف شده قبلی (که در تصویر **a** نشان داده شده است) با رنگ سیاه و ساختار نامتقارن جدید با خط سفید مشخص گردیده است. **c** تصویری با نور قطبیده از نواحی داخلی این جرم. جعبه‌ی سمت راست بالا بزرگ شده ناحیه‌ای است که احتمال حضور یک منبع نقطه‌ای در آنجا می‌رود.

جرم دیگری که بازهم ساختاری نامتقارن دارد $HD 142527$ است که در فاصله‌ی ۱۴۵ پارسی قرار دارد. رامیو و همکارانش در ۲۰۱۲ تصویری در طول موج ۳/۸ میکرومتر از نواحی داخلی این جرم منتشر کردند که در آن باز هم ساختارهای نامتقارن دیده می‌شود. این تصویر نشان می‌دهد که قرص در فاصله‌ی ۳۰ تا ۱۴۵ واحد نجومی به صورت بیضی و دارای مارپیچ‌های کوچک است [۷۱]. در ۲۰۱۳ کاسشوس و همکارانش مطالعه‌ی جالبی در طول موج‌های مختلف و با ابزار متفاوت از این جرم ارائه کردند. آنها با استفاده از خطوط CO و HCO^+ شارش‌هایی از گاز را در درون حفره‌ی داخلی این جرم

آشکار کردند و نشان دادند که این شارش‌ها می‌توانند آهنگ برافزایش مشاهده شده روی ستاره‌ی مرکزی را تأمین کنند. الگوهای عددی که این گروه برای توضیح این شارش‌ها ساختند نشان می‌دهند که این مشاهدات می‌توانند توسط دو سیاره در داخل حفره توضیح داده شوند. از طرف دیگر، مشاهدات آنها با تلسکوپ آلمان در طول موج (تقریباً) $0.8/\mu$ میکرومتر ساختاری نعل‌اسبی (شبه بادام زمینی) در لبه‌ی قرص خارجی - که از ۱۴۰ واحد نجومی آغاز می‌شود - آشکار ساخت. این ساختار نشانه‌ی تمرکز و جمع شدن غبار در این ناحیه است [۱۴].



شکل ۲.۴.۱: تصاویر گرفته شده از HD ۱۴۲۵۲۷. تصویر سمت چپ که در سال ۲۰۱۲ گرفته شده است بیضی بودن قرص را به خوبی نشان می‌دهد. در تصویر سمت راست مشاهدات انجام شده در سال ۲۰۱۳ نمایش داده شده است: a تصویر تهیه شده در طول موج $0.8/\mu$ میکرومتر پیوسته. تمایل این جرم ۲۰ درجه و به سمت شرق است و بنابراین این جرم تقریباً رو به ما قرار گرفته است. شکل نعل‌اسبی به وضوح در این تصویر دیده می‌شود. b شدت خطوط CO برای انتقال ۳ به ۲ را نشان می‌دهد. رنگ‌های زمینه مطابق با انتقال به آبی و انتقال به سرخ انتخاب شده‌اند. c نور بازتاب شده‌ی ستاره از قرص را نشان می‌دهد که در طول موج ۲ میکرومتر توسط تلسکوپ جمنی گرفته شده است. برخلاف تصویر a که لایه‌های درونی قرص را نشان می‌دهد، این تصویر توزیع غبار در لایه‌های روبی را آشکار می‌کند. d مشابه با b است اما برای HCO^+ . جعبه‌های کوچک میانی نیز بزرگ‌شده‌ی قسمت‌های داخل حفره‌ی میانی را در گاز (سمت راست) و غبار (سمت چپ) نشان می‌دهد.

به نظر می‌رسد که ساختارهای نعل‌اسبی پدیده‌ی متداولی در گذار قرص‌ها باشند. براون و همکارانش در سال ۲۰۰۹ سه مورد دیگر از چنین ساختارهایی را در اطراف $\text{Lk H}\alpha 330$ ، SR ۲۱N، و HD ۱۳۵۳۴۴B و به ترتیب در فواصل ۴۰، ۲۷ و ۳۷ واحد نجومی گزارش کردند [۱۳]. مشاهدات آنها که در طول موج

۸۸۰ میکرومتر پیوسته انجام شده است، نشان می‌دهد که داخل حفره‌ی میانی این اجرام تقریباً خالی از غبار است در حالیکه مشاهدات خط $4/7$ میکرومتر CO وجود گاز در داخل این حفره‌ها را تأیید می‌کند.

۵.۱ نکات کلیدی این فصل

- قرص‌های پیش‌سیاره‌ای دارای زیرمجموعه‌ی خاصی به نام گذار قرص‌ها هستند که مشخصه‌ی آنها وجود یک حفره در قسمت میانی قرص است،
- گذار قرص‌ها با وجود اینکه مرحله‌ای از مراحل تحولی قرص‌های پیش‌سیاره‌ای هستند، اما هنوز سازوکار پذیرفته شده‌ای نمی‌تواند شکل‌گیری آنها را توضیح دهد،
- تصاویر با تفکیک بالا از این اجرام عدم تقارن‌های مشخصی را نشان می‌دهد،
- تعدادی از این عدم تقارن‌ها توزیع‌های نعل‌اسبی شکل در غبار هستند که در لبه‌ی خارجی حفره واقع شده‌اند.

فصل ۲

الگوهای نظری که می‌توانند گذار قرص‌ها را بسازند

۱.۲ داستان یک قرص پیش‌سیاره‌ای معمولی

اگرچه هنوز نظریات مربوط به قرص‌های پیش‌سیاره‌ای که به دلیل داشتن غبار دارای پیچیدگی‌های بیشتری هستند کامل نشده‌اند، اما می‌توان یک داستان تحول کلی برای آنها در نظر گرفت. در ابتدا قرص از لحاظ اپتیکی ضخیم و دارای مقدار زیادی گاز و غبار است. در این مرحله سطح قرص به صورت کاسه‌ای است و تقریباً تمام قرص به دلیل اینکه در معرض نور ستاره است در محدوده‌ی فروسرخ تابش می‌کند. کاهش جرم قرص در این مرحله هم از طریق برافزایش روی ستاره‌ی مرکزی و هم از طریق تبخیر نوری مواد از سطح قرص انجام می‌شود. تابش‌های فرابنفش دور که از رنگین‌کمره‌ی ستاره و یا از ستاره‌های پر جرم اطراف به قرص می‌رسند، مواد را از لایه‌های سطحی و نواحی خارجی‌تر قرص که دارای چگالی کمتری هستند بخار می‌کنند. همین تبخیر نواحی خارجی توسط تابش‌های فرابنفش است که مرز خارجی و در نتیجه ابعاد قرص را تعیین می‌کند. در غیر این صورت بنابر نظریه‌های پایه‌ی قرص‌های برافزایشی، ابعاد قرص تا بینهایت ادامه پیدا می‌کند. در طی همین مرحله که چندین میلیون سال طول می‌کشد، ذرات غبار رشد می‌کنند و به سمت صفحه‌ی میانی ته‌نشین می‌شوند. این رشد و ته‌نشینی

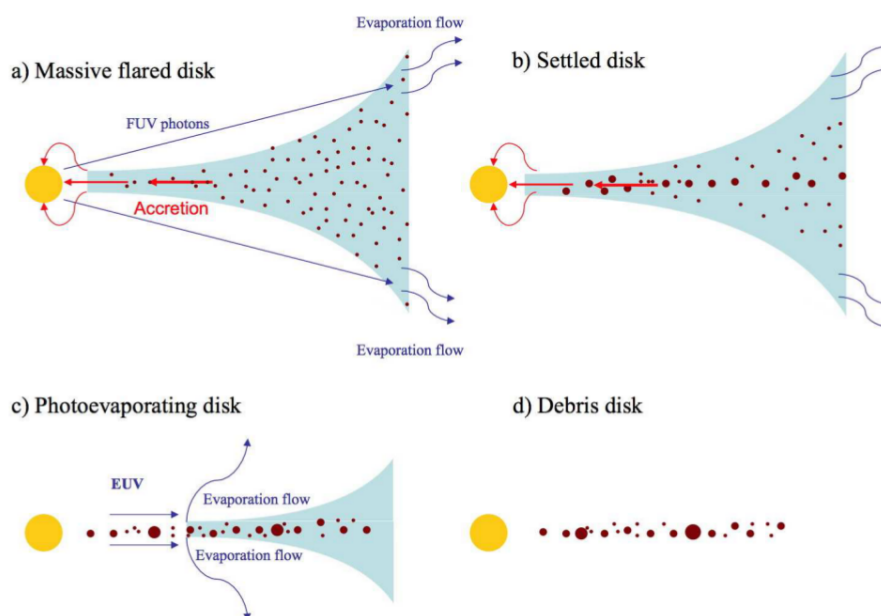
باعث دو مؤلفه‌ای شدن قرص می‌شود: یک قرص کاسه‌ای شکل گازی و یک قرص تخت غباری. در این حال غبارهای نواحی میانی و خارجی نور کمتری از ستاره دریافت می‌کنند و در نتیجه تابش قرص در ناحیه فروسرخ دور و میانی کاهش می‌یابد در حالیکه نمایه‌ی قرص غباری درونی و نزدیک به ستاره تغییر چندانی نکرده و بنابراین تابش فروسرخ نزدیک به همان میزان قبلی باقی می‌ماند.

با گذر زمان، جرم و آهنگ برافزایش قرص کاهش می‌یابد تا جاییکه آهنگ برافزایش در شعاع خاصی از قرص با آهنگ تبخیرنوری مساوی می‌شود. در این شعاع، گاز به جای برافزایش به سمت داخل، بخار می‌شود و باعث شکل‌گیری یک شکاف در قرص می‌شود. این شکاف، ارتباط قرص بیرونی و درونی را قطع می‌کند و قرص بیرونی دیگر نمی‌تواند نواحی داخلی را تغذیه کند. بنابراین قرص داخلی در طی مقیاس زمانی برافزایش (حدود ۱۰۰ هزار سال) روی ستاره برافزایش می‌کند و حفره‌ای را در قرص ایجاد می‌کند. با خالی شدن قرص میانی، لبه درونی قرص خارجی در معرض تابش مستقیم ستاره قرار می‌گیرد و تبخیرنوری به پدیده‌ی غالب تبدیل می‌شود. تبخیرنوری، قرص را به سرعت از درون به بیرون ناپدید می‌کند و آنچه باقی می‌گذارد قرصی از ذرات غبار با ابعاد مختلف، پیش‌سیارات یا سیارات، است.

پس از اینکه قرص گازی در اثر تبخیرنوری از بین رفت، دینامیک ذرات غبار توسط تابش ستاره تعیین می‌شود. ذرات کوچک‌تر (در حد میکرون و کوچک‌تر) با فشار تابشی ستاره به بیرون رانده می‌شوند، ذرات کمی بزرگ‌تر در نتیجه‌ی اثر پوینتینگ-رابرتسون^۱ با حرکتی مارپیچی به سمت داخل می‌روند و در نواحی نزدیک به ستاره نابود می‌شوند. آنچه در نهایت باقی می‌ماند یک قرص حاوی مقدار کمی گاز، ذرات غبار بسیار بزرگ، پیش‌سیاره و (شاید) سیاره است. این آغاز مرحله‌ای برای قرص است که به آن قرص نخاله می‌گویند.

مراحل بیان شده در بالا را در شکل ۱.۱.۲ نشان داده‌ایم. ممکن است این تصور به وجود آید که با توضیحات داده شده معمای گذار قرص‌ها حل شده است اگرچه تبخیرنوری قادر است یک حفره میانی در قرص ایجاد کند. اما باید در نظر داشته باشیم که عوامل دیگری هم هستند که می‌توانند حفره‌های مشاهده شده را توضیح دهند. ما در این فصل به نظریات مختلفی که می‌توانند گذار قرص‌ها را توضیح دهند خواهیم پرداخت و در قسمت‌های انتهایی نگاهی به عوامل مختلفی که می‌توانند عدم‌تقارن را در گذار قرص‌ها ایجاد کنند خواهیم داشت.

^۱ اثری نسبیتی که به دلیل حرکت ذره اتفاق می‌افتد. در چارچوب متصل به ذره، تابش دریافتی از ستاره با زاویه‌ای بسیار کوچک نسبت به جهت عمود بر مدار ذره (یا خط بین ذره و ستاره در دستگاه ساکن) دریافت می‌شود در حالیکه تابش ذره همسانگرد است. بنابراین تابش رسیده از ستاره دارای مؤلفه‌ای خلاف جهت حرکت ذره است و مانند یک نیروی مقاوم تکانه‌ی ذره را کاهش داده و ذره به مدار پایین‌تر می‌رود.



شکل ۱.۱.۲: الگوواره‌ای از مراحل تحولی یک قرص پیش‌سیاره‌ای معمولی که از [۸۸] برداشته شده است. a یک قرص پیش‌سیاره‌ای جوان را نشان می‌دهد که برافزایش بر تبخیرنوری غالب است، b قرصی دو مؤلفه‌ای که غبار در آن به سمت صفحه میانی ته‌نشین کرده و بنابراین مؤلفه‌ی غباری تخت‌تر شده است، در c قسمت میانی قرص روی ستاره برافزایش کرده و نواحی خارجی نیز به سرعت در حال بخار شدن توسط نور از درون به بیرون است، d قرص نخاله که مجموعه‌ای از غبارهای بزرگ، پیش‌سیارات و سیارات است. قرص نخاله بسیار کم جرم است و هنوز قابلیت رصد دقیق آن وجود ندارد.

۲.۲ عواملی که می‌توانند حفره در قرص‌های پیش‌سیاره‌ای ایجاد کنند

سه عامل اصلی وجود دارد که می‌توانند در قرص‌های پیش‌سیاره‌ای حفره ایجاد کنند: تبخیرنوری، یک سیاره‌ی پرجرم و رشد دانه‌های غبار. در این قسمت درباره‌ی هرکدام توضیح مختصری خواهیم داد و درباره‌ی توانایی آنها در توضیح گذار قرص‌ها بحث خواهیم کرد.

۱.۲.۲ تبخیرنوری

اساس تبخیرنوری بسیار ساده است و تفاوت آن با تبخیر در این است که انرژی ذراتی که تبخیر می‌شوند توسط تابش فراهم می‌شود. هنگامی که دمای ذرات موجود در سطح یک قرص به اندازه‌ای بالا برود طوریکه سرعت گرمایی ذرات (= سرعت صوت) از سرعت فرار در محلی که قرار دارند بیشتر شود، ذرات می‌توانند از قرص فرار کنند و "تبخیرنوری" شوند. به عبارت دقیق‌تر، فوتون‌های با انرژی مناسب گاز لایه‌ی سطحی را گرم می‌کنند و فشار در این لایه افزایش می‌یابد. در اثر شیب فشار ایجاد شده، مواد به سوی سطح قرص که کم‌فشار است منبسط می‌شود و در فاصله‌ای از قرص که شیب فشار بر گرانش غالب می‌شود، مواد تبخیر می‌شوند. با کمک مفهوم تبخیرنوری، شعاع گرانشی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$r_g = \frac{GM_\star}{c_s^2} \sim 100 AU \left(\frac{T}{1000 K} \right)^{-1} \left(\frac{M_\star}{M_\odot} \right) \quad (1.2.2)$$

که G ثابت گرانش، $M_\star$ جرم ستاره و c_s سرعت صوت است که توسط دمای ذرات تعیین می‌شود و به نوع تابش دریافتی ذرات بستگی دارد. رابطه‌ی فوق نشان می‌دهد که شعاع گرانشی و به دنبال آن تبخیرنوری از طریق c_s به دمای قرص وابسته است. دمای قرص در لایه‌ها و در دوره‌های تحولی مختلف توسط فرآیندهای متفاوتی تعیین می‌شود. به عنوان مثال دمای لایه‌های داخلی در یک قرص جوان بوسیله‌ی برافزایش تعیین می‌شود درحالی‌که در لایه‌های رویی و یا در قرص‌های مسن‌تر دما توسط تابش‌های دریافتی معین می‌گردد. اگر در رابطه‌ی ۱.۲.۲ دمای لازم تبخیرنوری برای یک قرص هیدروژنی را در فاصله‌ی ۱۰۰ واحد نجومی تخمین بزنیم بیشتر از ۱۰۰۰ کلوین خواهد شد. از طرف دیگر محاسبات دقیق‌تر نشان می‌دهند که تبخیرنوری نه در r_g بلکه در فواصل حدود $0.1 r_g$ هم می‌تواند اتفاق بیفتد [۲۷]. بنابراین کافی است دما در سطح قرص در فواصل حدود ۱۰ واحد نجومی به حدود ۱۰۰۰ کلوین برسد تا تبخیرنوری فعال شود. چنین دمایی می‌تواند توسط تابش‌های فرابنفش شدید (EUV)^۲، فرابنفش دور (FUV)^۳ و پرتوهای ایکس (X-Ray) بدست آید.

- **فرابنفش دور** با انرژی $13.6 \text{ eV} < h\nu < 6 \text{ eV}$ می‌تواند به لایه‌های زیرین سطح نفوذ کند و با شکستن پیوند مولکول هیدروژن و تبدیل آن به اتمهای هیدروژن دما را با توجه به شار تابش، ترکیبات و چگالی محیط به حدود ۱۰۰ تا ۵۰۰۰ کلوین برساند [۲۳].

^۲Extreme Ultraviolet^۳Far Ultraviolet

- فوتون‌های فرابنفش شدید که انرژی بین $100\text{eV} < h\nu < 13.6\text{eV}$ دارند قادر هستند هیدروژن را یونیده کنند و بدون توجه به شار تابش، دما را تا 10000 کلوین افزایش دهند،
- پرتوهای ایکس دارای فوتون‌های با انرژی بیشتر از 1KeV هستند ولی به دلیل اینکه نمی‌توانند به راحتی در قرص نفوذ کنند به تنهایی چندان مؤثر نیستند [۱].

این تابش‌ها می‌توانند از ستاره‌ی مرکزی و یا از ستارگان اطراف به قرص برسند. برای ستارگانی که در خوشه‌های فشرده و داغ هستند، منابع خارجی اهمیت بیشتری دارند و تأثیر این تابش‌ها بیشتر در نواحی خارجی قرص که از لحاظ اپتیکی نازک هستند می‌باشد. برای ستارگان تنها، تابش خود ستاره و بیشتر در نواحی داخلی تأثیرگذار است.

با توجه به مطالبی که بیان شد و استفاده از رابطه‌ی ۱۰.۲.۲، شکاف ایجاد شده در اثر تبخیرنوری اگر ناشی از فرابنفش دور باشد می‌تواند حفره‌ای بین ۱ تا ۱۰۰ واحد نجومی و اگر توسط فرابنفش شدید بوجود آمده باشد حفره‌ای در حدود ۱۰ واحد نجومی شکل دهد. بنابراین به نظر می‌رسد که تبخیرنوری نمی‌تواند سازوکار شکل‌دهنده‌ی گذار قرص‌ها باشد. هرچند مطالعات کامل‌تر اخیر که در آنها عواملی مانند هیدرودینامیک قرص در الگوهای ۲ یا ۳ بعدی به همراه تابش در قرص و جو آن در نظر گرفته شده است نشان می‌دهند همراهی تابش‌های ایکس و فرابنفش می‌تواند مؤثر باشد و دسته‌ای از مشاهدات که دارای آهنگ برافزایش بسیار کم هستند را توضیح دهد [۶۱، ۶۲، ۶۳]. به دلیل پیچیدگی الگوهای دارای تابش، شبیهی محیط و هیدرودینامیک قرص‌ها، هنوز با اطمینان نمی‌توان پاسخ این پرسش را داد که در چه مواردی تبخیرنوری عامل شکل‌دهنده‌ی شکاف گذار قرص‌ها است و مطالعات بر روی این موضوع هنوز ادامه دارد.

۲.۲.۲ سیارات پرجرم

گرانش سیاره‌ای که در یک قرص قرار دارد مانند یک پتانسیل اختلالی در برابر پتانسیل گرانشی ستاره است. اگر قرصی را در نظر بگیریم و فرض کنیم در دستگاه متصل به سیاره قرار داریم، مدار عناصر قرص (ذرات یا بسته‌های گاز) هنگام عبور از نزدیکی سیاره مختل می‌شود. این اختلال باعث اضافه شدن یک حرکت پیراچرخه‌ای^۴ با بسامد $\kappa(r)$ به حرکت مداری ذرات می‌شود. در شرایطی که بسامد پیراچرخه‌ای

^۴epicyclic

ذرات برابر با مضرب صحیحی از بسامد حرکت مداری آنها در دستگاه هم-حرکت شود، دامنه نوسان ذرات افزایش می‌یابد و در مکان‌های دارای این شرایط تشدید رخ می‌دهد. این شرط به زبان ریاضی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$m(\Omega(r) - \Omega_p(r)) = 0 \text{ or } \pm \kappa(r) \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (2.2.2)$$

برای مکان‌هایی که سمت راست رابطه‌ی بالا برابر صفر است، عناصر قرص دارای بسامد دورانی یکسان با سیاره هستند. این اتفاق برای نواحی نزدیک مدار سیاره می‌افتد و به این قسمت از قرص ناحیه‌ی هم-چرخش می‌گویند که در تشدید هم-چرخش با سیاره قرار گرفته‌است. برای مقادیر غیر صفر سمت راست رابطه‌ی ۲.۲.۲، عناصر قرص در نواحی تشدید لیبلا^۵ قرار گرفته‌اند. علامت + برای تشدیدهای داخلی و علامت - برای تشدیدهای خارجی است. به عنوان مثال، برای یک قرص کپلری که بسامد پیراچرخه‌ای برابر با بسامد دورانی قرص است $\kappa(r) = \Omega(r) = \Omega_{Kepler}(r)$ مکان تشدیدها به راحتی به دست می‌آیند:

$$r_L = \left(\frac{m}{(m \mp 1)} \right)^{\frac{1}{m-1}} r_p \quad (3.2.2)$$

برای قرصی که از فشار در آن نمی‌توان صرف‌نظر کرد و حرکت‌ها کمی از حالت کپلری خارج شده‌اند، رابطه‌ی ۲.۲.۲ و در نتیجه مکان تشدیدهای لیبلا^۵ اندکی تغییر می‌کند

$$m(\Omega(r) - \Omega_p(r)) = \pm \sqrt{\kappa^2(r)(1 + (mc_s/\Omega r)^2)} \quad (4.2.2)$$

که c_s سرعت صوت در محیط است [۴].

در اثر اندرکنش گرانشی سیاره با مواد قرص در محل تشدیدها، عناصر قرص به سیاره گشتاور وارد می‌کنند و به عکس. به عنوان مثال تشدیدهای لیبلا^۵ خارجی (تشدیدهایی که در ناحیه‌ی خارجی مدار سیاره رخ می‌دهند) به سیاره گشتاور منفی وارد می‌کنند و باعث کاهش تکانه‌ی زاویه‌ای سیاره می‌شوند و در مقابل، سیاره با وارد کردن گشتاور مثبت به تشدیدهای لیبلا^۵ خارجی باعث افزایش تکانه‌ی زاویه‌ای آنها می‌شود. از طرف دیگر، تشدیدهای لیبلا^۵ داخلی بر سیاره گشتاور مثبت وارد می‌کنند و تکانه‌ی زاویه‌ای آن را افزایش می‌دهند. سیاره نیز با وارد کردن گشتاور منفی بر تشدیدهای داخلی، تکانه‌ی زاویه‌ای آنها را کاهش می‌دهد. به دلیل نامتقارن بودن مکان تشدیدها نسبت به مدار سیاره، گشتاور خالص وارد به سیاره از طرف تشدیدها صفر نمی‌شود و در نتیجه مدار سیاره تغییر می‌کند و سیاره در قرص مهاجرت می‌کند. نکته‌ی مهم دیگری که در این فرآیند مطرح است، نحوه‌ی انتقال تکانه‌ی زاویه‌ای منتقل شده از

^۵Lindblad

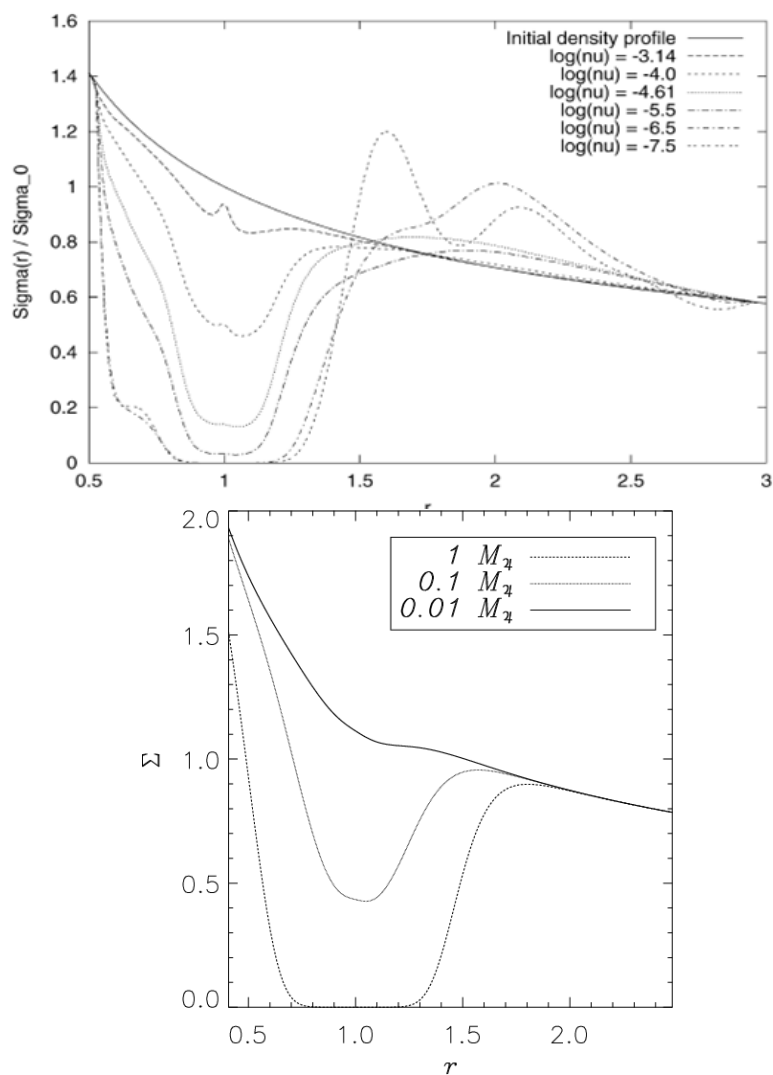
سیاره به نواحی خارجی قرص می‌باشد. اندرکنش گرانشی سیاره با تشدیدها باعث شروع شدن امواج چگالی در محل تشدیدها می‌شود که به دلیل چرخش قرص، برهم‌نهی این امواج بازوهای مارپیچی را که از سیاره خارج شده‌اند شکل می‌دهد. این بازوها شبیه بازوهای کهکشانی هستند و می‌توانند تا حدی تکانه را به بیرون قرص منتقل کنند [۳۳]. در صورتیکه که قرص وشکسان باشد این انتقال تکانه توسط وشکسانی نیز انجام می‌شود.

برای سیاره‌های پرجرم، میزان تکانه‌ی زاویه‌ای تبادل شده بیشتر است. در حالیکه گشتاور خالص وارد بر سیاره از طرف قرص چندان تغییر نمی‌کند، اندازه‌ی گشتاور یک‌طرفه از سوی سیاره بر تشدیدهای داخلی و خارجی افزایش می‌یابد تا حدی که وشکسانی و مارپیچ‌ها نمی‌توانند تکانه‌ی دریافتی از سیاره را منتقل کنند و امواج نزدیک به سیاره به ضربه تبدیل می‌شوند. در این حالت نمایه‌ی قرص به شدت تغییر می‌کند. مواد واقع در تشدیدهای خارجی که تکانه از سیاره گرفته‌اند به سرعت به مدارهای خارجی‌تر می‌روند و مواد موجود در تشدیدهای داخلی نیز به دلیل مقدار زیاد تکانه از دست داده به مدارهای داخلی‌تر حرکت می‌کنند. این حالت شبیه به این است که سیاره مواد را از اطراف خود دفع می‌کند و شکافی در اطراف خود به وجود می‌آورد. پهنای این شکاف به عوامل مختلفی مانند جرم سیاره، وشکسانی محیط، ضخامت قرص و فشار بستگی دارد. *کریدا* و همکارانش به جزئیات چگونگی باز شدن شکاف و ارتباط آن با وشکسانی و فشار پرداختند و در نهایت رابطه‌ی زیر را ارائه دادند که تطابق بسیار خوبی با نتایج شبیه‌سازی‌ها دارد [۱۸]

$$\frac{3}{4} \frac{H}{R_H} + \frac{5\sigma}{qa_p^2 \Omega_p} \lesssim 1. \quad (5.2.2)$$

در این رابطه H مقیاس ارتفاع قرص، q و a_p به ترتیب نسبت جرم سیاره به ستاره و شعاع مداری سیاره و R_H شعاع هیل^۶ سیاره است که برابر با $a_p (q/3)^{1/3}$ می‌باشد. آنها همچنین نشان دادند که پهنای و عمق شکاف با کاهش وشکسانی زیاد می‌شود. جرم سیاره نیز عاملی مهم در تعیین پهنای شکاف است. یکی از نتایج *دآنجلو* و همکارانش این بود که افزایش جرم سیاره نیز باعث افزایش پهنای و عمق شکاف می‌شود (شکل ۱۰.۲.۲ [۱۹]). بنابراین انتظار می‌رود که یک سیاره بسیار پرجرم در یک قرص با وشکسانی پایین بتواند شکاف بزرگی ایجاد کند بطوریکه حفره‌ی میانی گذار قرص‌ها را توضیح دهد. مزیت شکاف‌های ایجاد شده توسط سیارات این است که مواد از طریق جریان‌های اطراف سیاره می‌توانند از قرص خارجی به قرص داخلی منتقل شوند و آهنگ برافزایش مشاهده شده روی ستاره را توضیح دهند مگر اینکه سیاره آنقدر پرجرم باشد که شکافی بسیار بزرگ و خالی بسازد، که در این صورت آهنگ

^۶Hill radius



شکل ۱۰.۲.۲: تصویر بالایی تغییر پهنای شکاف اطراف یک سیاره با جرم مشتری را در اثر تغییر وشکسانی نشان می‌دهد. محور عمودی نسبت چگالی سطحی را بعد از ۱۰۰۰ دور نسبت به چگالی سطحی اولیه نشان می‌دهد. در این نمودار چگالی سطحی روی زاویه‌ی سمتی میانگین گرفته شده است. محور افقی نشان‌دهنده‌ی فاصله از ستاره است (تصویر برگرفته از [۱۸]). تصویر پایینی پهنای شکاف را برای سیاراتی با جرم ۰/۱، ۰/۰۱ و ۱ جرم مشتری نشان می‌دهد. محورها همانند بالایی هستند (تصویر از [۱۹]).

برافزایش بسیار کم می‌شود.

۳.۲.۲ رشد غبار

همانطور که در فصل اول درباره‌ی گذارقرص‌ها توضیح دادیم، حفره‌ی گذارقرص‌ها در غبار است و احتمال وجود گاز در این حفره‌ها به دلیل (۱) وجود برافزایش روی ستاره‌ی مرکزی و (۲) مشاهده‌ی گاز درون این حفره‌های غباری [۷۰، ۷۶]، بسیار بالاست. به همین دلیل رشد غبار نظریه‌ی دیگری است که درباره‌ی حفره‌ی گذارقرص‌ها مطرح می‌شود. در این نظریه، غبارهای قسمت داخلی قرص سریع‌تر رشد می‌کنند و توسط دو عامل راندگی^۷ و کاهش کدری قسمت داخلی قرص را خالی می‌کنند و در نتیجه یک حفره ایجاد می‌شود.

توصیف رشد دانه‌های غبار اگرچه بسیار پیچیده است و هنوز کارهای نظری و آزمایشگاهی روی این موضوع انجام می‌شوند، اما فرآیند اساسی آن بسیار ساده است. دانه‌ی غباری را در نظر بگیرید که با سرعت متوسط σ نسبت به دیگر ذرات حرکت می‌کند. به این سرعت اصطلاحاً پاشندگی سرعت^۸ می‌گویند. اگر نسبت غبار به گاز در قرص Z باشد، جرم ذره با رابطه‌ی زیر تغییر می‌کند:

$$\frac{dm}{dt} = \pi s^2 \rho_g Z \sigma, \quad (۶.۲.۲)$$

که در این رابطه دانه را کروی در نظر گرفتیم. اگر چگالی دانه ρ_d و شعاع آن s باشد، آهنگ رشد دانه به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{4}{3} \frac{\rho_g}{\rho_d} Z \sigma. \quad (۷.۲.۲)$$

قسمت مشکل محاسبه آهنگ رشد ذرات، بدست آوردن σ است. این سرعت می‌تواند تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار گیرد، مانند حرکت براونی ذرات، تلاطم محیط و یا ته‌نشین شدن ذرات به سمت لایه‌ی میانی. از طرف دیگر، این محاسبه‌ی ساده برای ذرات بسیار کوچکی است که به خوبی به گاز جفت شده‌اند. برای ذرات کمی بزرگتر، جفت شدگی ذرات با گاز کمتر است و نیروی کششی^۹ گاز سرعت ذرات را تغییر می‌دهد. با رشد ذرات، احتمال برخورد آنها به هم بیشتر می‌شود و ذرات یا کاملاً به ذرات کوچک شکسته می‌شوند و یا قسمتی از جرم خود را از دست می‌دهند که این می‌تواند در رشد غبارها بسیار مهم باشد. پیچیدگی دیگری که در آهنگ رشد مؤثر است، چسبندگی ذرات است. در رابطه‌ی ۲

^۷drift

^۸velocity dispersion

^۹drag

۷.۲۰ ما فرض کردیم تمام غبارهای جارو شده به ذره می‌چسبند در حالیکه جنس و ترکیبات ذره بسیار در چسبندگی مهم است. به عنوان مثال ذراتی که لایه‌ای از یخ سطحی دارند، به خوبی در اثر برخورد به هم می‌چسبند اما ذرات سخت سیلیکات می‌توانند بسیار مخرب باشند. وارد کردن تمام این عوامل در یک الگوی کامل هنوز امکان‌پذیر نیست اما گروه‌های بسیاری روی چنین موضوعاتی کار می‌کنند (مقاله مروری [۱۰] را ببینید). وارد کردن عوامل مختلف در الگوهای رشد غبار نشان داده است که مقیاس زمانی رشد ذرات غبار از مرتبه‌ی زمان مداری آنهاست [۵۹، ۷، ۱۱]. بنابراین ذرات موجود در نواحی داخلی‌تر سریع‌تر از غبارهای خارجی قرص رشد می‌کنند.

رشد غبارها باعث رانده شدن آنها به سمت ستاره می‌شود. هنگامی که ابعاد ذره افزایش می‌یابد، نیروی کششی از سوی گاز بر آن افزایش می‌یابد و از آنجا که نیروی کششی در خلاف جهت حرکت ذره و به صورت یک نیروی اتلافی است، باعث کاهش سرعت ذره می‌گردد. ذره برای حفظ تکانه‌ی زاویه‌ای‌اش به مدار داخلی‌تر می‌رود و کم‌کم به سوی ستاره حرکت می‌کند. محاسبات نشان می‌دهند در یک سحابی خورشیدی (سحابی که خورشید و سیارات از آن شکل گرفته‌اند) ذرات با ابعاد حدود متر در فاصله‌ی ۱ واحد نجومی دارای بیشترین سرعت راندگی هستند [۸۶] و در مدت زمان کوتاهی (از مرتبه ۱۰۰ سال) روی ستاره می‌ریزند. این مسئله اگرچه برای سیاره‌سازی مشکل بزرگی است و به "سد در اندازه‌ی متر"^{۱۰} مشهور شده است، اما برای توضیح گذار قرص‌ها مناسب است. زیرا ذرات داخلی‌تر سریع‌تر رشد می‌کنند و همراه با افزایش اندازه‌ی آنها، سرعت راندگی‌شان نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه نواحی داخلی قرص خالی از غبار می‌شود.

کمک دیگری که رشد غبار در توضیح گذار قرص‌ها می‌کند به ارتباط بین اندازه‌ی دانه‌ها و کدروی برمی‌گردد. با رشد یک دانه، نسبت سطح به حجم آن کاهش می‌یابد بنابراین تابش کمتری از محیط اطراف جذب می‌کند و در نتیجه دمای داخلی آن پایین‌تر می‌آید. با کاهش دمای داخلی دانه، تابش گرمایی آن نیز در طول موج‌های بلند انجام می‌شود و طول موج تابش آنها از مرتبه‌ی ابعاد دانه می‌گردد. پس با رشد دانه‌ها و رسیدن آنها به ابعاد حدود سانتی‌متر، تابش آنها از محدوده‌ی میلیمتری خارج می‌شود و برای ابزارهای رصدی فعلی شفاف می‌شوند. بنابراین حتی اگر عاملی از راندگی ذرات به سوی ستاره جلوگیری کند، با رشد سریع‌تر ذرات در نواحی داخلی، قسمت درونی قرص برای تلسکوپ‌های ما شفاف می‌شود. برای آزمودن این نظریه نیاز به تلسکوپ‌های رادیویی با تفکیک بسیار بالا داریم.

^{۱۰} meter-size barrier

۴.۲.۲ سازوکار برنده کدام است؟

با توجه به اطلاعات فعلی هیچ سازوکاری به تنهایی قادر به توضیح گذارقرص‌ها نیست. تبخیرنوری از لحاظ مقیاس زمانی ایجاد حفره و آهنگ برافزایش بسیار پایین می‌تواند تعدادی از مشاهدات را توضیح دهد اما هنوز پاسخی برای گذارقرص‌های با آهنگ برافزایش بالا و یا پیش‌گذارقرص‌ها ندارد. از طرف دیگر تبخیرنوری می‌تواند گاز را تا فواصل زیاد بخار کند و تأثیری بر غبار ندارد و این بدین معناست که درون حفره‌ی گذارقرص‌های با برافزایش ناچیز باید بتوانیم غبارهای بزرگ را مشاهده کنیم که البته نیازمند ابزارهای آینده است.

رشد غبار نیز در الگوهای بسیار دقیق و با تنظیمات اولیه خاص قادر است افت شار در محدوده‌ی میلیمتر را که در گذارقرص‌ها مشاهده می‌شود توضیح دهد [۷، ۸]. مزیت الگوهای رشد غبار در این است که اجازه‌ی حضور گاز در درون حفره و در نتیجه برافزایش حتی با آهنگ‌های زیاد را می‌دهند.

سیارات پرجرم نیز می‌توانند با ایجاد شکافی بزرگ در اطراف مدارشان، گذارقرص‌ها و همچنین پیش‌گذارقرص‌ها را توضیح دهند. اما در صورتیکه جرم سیاره بسیار زیاد شود، آهنگ عبور گاز از قرص خارجی به داخلی کم می‌شود و آهنگ برافزایش روی ستاره کاهش می‌یابد. بنابراین جرم سیاره‌ی داخل شکاف باید به نحوی در الگوها انتخاب شود که آهنگ برافزایش با مشاهدات مورد نظر تطبیق داشته باشد.

نکاتی در مشاهدات گذارقرص‌ها وجود دارد که اهمیت الگوهای دارای سیاره را بیشتر می‌کند: (۱) شیب تغییر کدری در لبه‌ی حفره‌های گذارقرص‌ها بسیار شدید است که نشان می‌دهد چگالی غبار به صورت ناگهانی و در فاصله‌ی بسیار کوچک افزایش می‌یابد [۳۵]. این شیب توسط هیچ کدام از الگوهای تبخیرنوری و رشد غبار نمی‌تواند توضیح داده شود در حالیکه تغییر ناگهانی چگالی در لبه‌ی شکاف سیارات بسیار واضح است. (۲) به دلیل متقارن بودن الگوهای تبخیرنوری و رشد غبار، این الگوها برای توضیح گذارقرص‌های نامتقارن (فصل اول قسمت ۴.۱) مناسب نیستند در صورتیکه مطالعات نظری نشان داده‌اند که سیارات پرجرم می‌توانند عدم‌تقارن‌های بزرگ مقیاسی را در قرص‌ها ایجاد کنند. ما درباره‌ی این ساختارهای نامتقارن ناشی از سیارات در قسمت بعد بیشتر توضیح خواهیم داد.

۳.۲ سازوکارهایی که در گذار قرص‌ها عدم تقارن می‌سازند

سازوکارهای مختلفی می‌توانند باعث برهم زدن ساختار متقارن قرص‌ها شوند مانند گرداب‌ها یا شکافی بیضی شکل که توسط یک سیاره پر جرم ایجاد می‌شود.

۱.۳.۲ گرداب‌ها

ناپایداری‌ها عامل ایجاد گرداب‌ها هستند. در قرص‌های پیش‌سیاره‌ای ناپایداری‌های مختلفی می‌توانند رخ دهند مانند ناپایداری گرانشی، ناپایداری باروکلینیک^{۱۱}، ناپایداری چرخشی مغناطیسی^{۱۲} (در شرایطی که محیط به اندازه‌ی کافی یونیده است) و ناپایداری امواج روزبی^{۱۳}. اما گرداب باید به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد تا در مشاهدات به صورت یک ساختار نامتقارن دیده شود. تا کنون تنها ناپایداری که در الگوهای نظری توانسته گرداب‌های بزرگ مقیاس تولید کند ناپایداری امواج روزبی است.

ناپایداری امواج روزبی را می‌توان نسخه‌ی چرخان ناپایداری کلونین-هلمهولتز دانست. در ناپایداری کلونین-هلمهولتز هنگامی که سرعت دو لایه از شاره با هم با اندازه‌ی کافی متفاوت باشند، در مرز جداکننده‌ی دو لایه امواجی شکل می‌گیرند که در نهایت به ناپایداری و شکل‌گیری گرداب‌ها منجر می‌شود. در یک قرص که دارای سرعت چرخشی تفاضلی است، لایه‌های مجاور دارای تفاوت سرعت هستند اما این تفاوت بسیار کم است و برای اینکه ناپایداری در قرص ایجاد شود نیازمند این هستیم که عاملی سرعت را در فاصله‌ی بسیار کوچک تغییر دهد. این شیب سرعت چرخشی می‌تواند توسط نیروهای مختلفی ایجاد شود، مثلاً در جو سیارات نیروی کوریولیس نمایه‌ی سرعت را تحت تأثیر قرار می‌دهد و امواج روزبی را شکل می‌دهد. در قرص‌ها اگر شیب فشار در قسمتی از قرص به اندازه‌ی کافی زیاد باشد (مثل یک برآمدگی یا جهش در نمایه‌ی فشار) ناپایداری روزبی می‌تواند شکل گیرد. مطالعات اولیه روی این نوع ناپایداری در قرص‌های پیش‌سیاره‌ای توسط لاولیس و همکارانش و لی و همکارانش انجام شد [۴۵، ۴۲]. اگرچه هدف آنها از مطالعه‌ی این ناپایداری پیدا کردن سازوکاری برای انتقال تکانه‌ی زاویه‌ای در قرص‌های برافزایشی بود، اما بعدها این ناپایداری و گرداب‌های ناشی از آن به شدت در الگوهای قرص‌های پیش‌سیاره‌ای به دلیل اهمیت گرداب‌های بزرگ مقیاس در تولید پیش‌سیارات مورد توجه قرار گرفت. آنها نشان دادند که تغییر ۱۰ تا ۲۰ درصدی چگالی سطحی در فاصله‌ای کمی بزرگتر

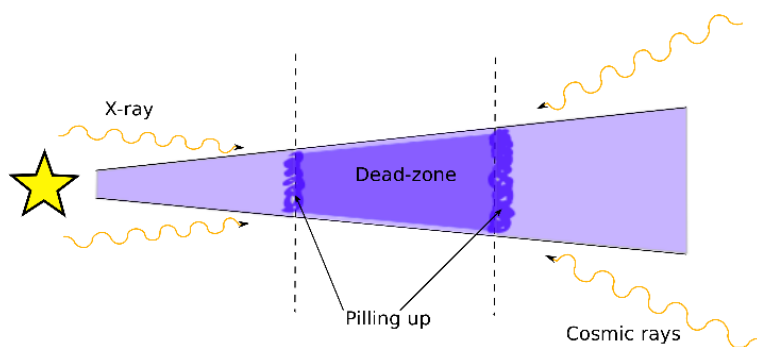
^{۱۱}Baroclinic instability

^{۱۲}Magnetorotational instability

^{۱۳}Rossby wave instability

از ضخامت قرص می‌تواند ناپایداری ایجاد کند. در چنین شرایطی یک اغتشاش سمتی در قرص، امواج روزبی را ایجاد می‌کند و در شرایطی که امکان رشد اغتشاشات باشد، آنها تبدیل به ناپایداری و در نهایت گرداب می‌شوند.

تغییر چگالی لازم برای شکل‌گیری ناپایداری امواج روزبی می‌تواند توسط فرایندهای مختلفی در قرص‌های پیش‌سیاره‌ای فراهم شود. تلنبار شدن جرم در مرزهای یک ناحیه‌ی مرده می‌تواند برآمدگی فشار لازم را بسازد و در نهایت باعث شکل‌گیری گرداب شود. ناحیه‌ی مرده در یک قرص پیش‌سیاره‌ای ناحیه‌ای است که به دلیل دریافت نکردن تابش‌های پرانرژی، دارای درجه‌ی یونیدگی پایین‌تر از بقیه‌ی مناطق قرص است (شکل ۱.۳.۲). در اثر پایین‌تر بودن درجه یونیدگی، تلاطم ناشی از ناپایداری چرخشی مغناطیسی که مؤثرترین فرآیند شناخته شده در تولید وشکسانی تلاطمی است، در ناحیه‌ی مرده کمتر است. بنابراین در ناحیه‌ای از قرص وشکسانی کمتر و در نواحی اطراف وشکسانی بیشتر است. در مرز بین این دو ناحیه، آهنگ برافزایش متفاوت خواهد بود. به عنوان مثال اگر مرز خارجی ناحیه مرده را در نظر بگیریم، در قسمت زنده‌ی این مرز آهنگ برافزایش $(\dot{M} \simeq 3\pi\nu\Sigma)$ بالاتر از ناحیه‌ی مرده است و در نتیجه مقداری از ماده امکان انتقال به نواحی داخلی را نخواهد داشت و در مرز تلنبار می‌شود. زمانی که مقدار کافی جرم در این منطقه جمع شود، شرط لی و همکارانش برآورده شده و گرداب‌ها شکل می‌گیرند.



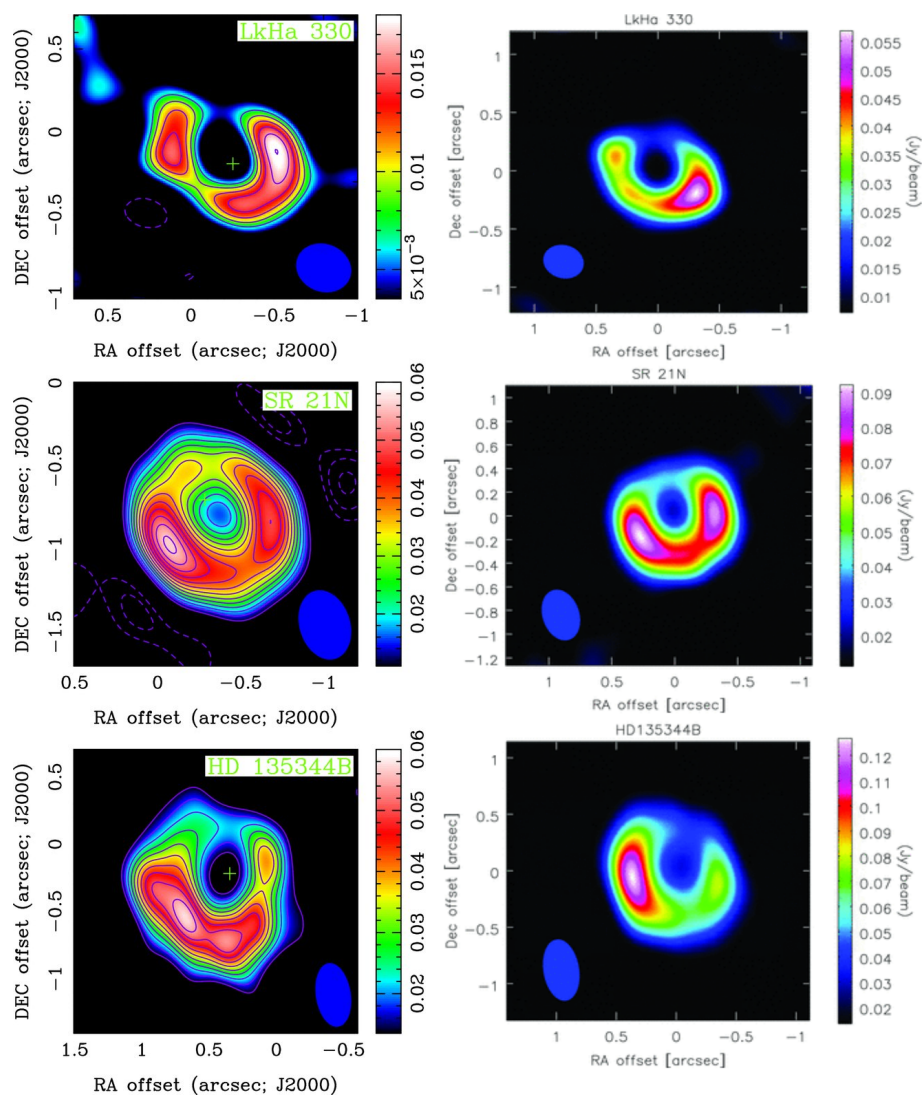
شکل ۱.۳.۲: الگوواره‌ی قرصی با منطقه‌ی مرده. نواحی خارجی و داخلی قرص با کمک پرتوهای پرانرژی یونیده می‌شوند و انتقال تکانه و در نتیجه آهنگ برافزایش در این مناطق بیشتر هستند. اما در نواحی میانی درجه یونیدگی و به تبع آن آهنگ برافزایش نیز کمتر است. در مرزهای بین این دو لایه به دلیل تفاوت آهنگ برافزایش، مواد تلنبار می‌شوند.

رگالی و همکارانش نشان دادند که گرداب‌های بزرگ‌مقیاسی که در مرزهای ناحیه‌ی مرده شکل می‌گیرند قادر هستند عدم‌تقارن‌های مشاهده شده در گذار قرص‌ها را توضیح دهند. آنها حتی با انتخاب

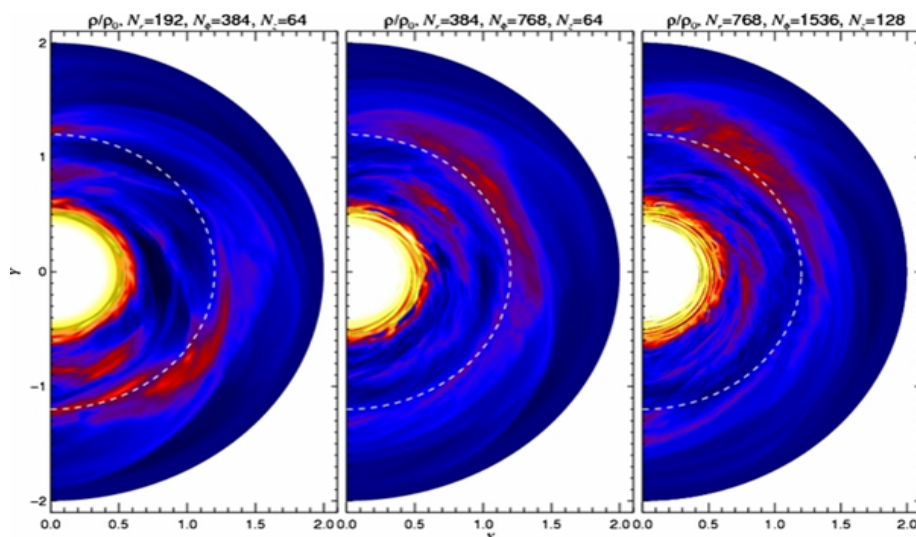
تمایل مداری و جهت‌گیری مناسب الگوهایشان توانستند تصاویر گرفته شده توسط براون و همکارانش را به زیبایی توضیح دهند (شکل ۲.۳.۲) [۷۲].

اگرچه منطق شکل‌گیری ناپایداری روزی صحیح است و گرداب‌های ناشی از آن در شبیه‌سازی‌های هیدرودینامیکی - که منطقه مرده را با کاهش و شکسانی می‌سازند- تایید شده است، اما هنوز این سوال باقی است که آیا شبیه‌سازی‌ها و الگوهای واقعی چنین ساختارهایی را نشان می‌دهند. برای پاسخ به این سوال، لایرا و همکارش ناحیه مرده را با کاهش مقاومت ویژه‌ی شاره شبیه‌سازی کردند و تحول میدان مغناطیسی را در الگویشان دنبال کردند. به عبارت دیگر آنها یک مرز داخلی ناحیه‌ی مرده‌ی واقعی با تلاطم ناشی از ناپایداری چرخشی مغناطیسی را ساختند. آنها متوجه شدند که بدون توجه به تفکیک عددی به کار رفته در شبیه‌سازی‌ها، گرداب‌های بزرگ در منطقه‌ی مرده‌ی قرص شکل می‌گیرند (شکل ۳.۳.۲ را ببینید) [۴۹].

عامل دیگری که می‌تواند تغییر چگالی مورد نیاز ناپایداری روزی را بوجود بیاورد یک سیاره‌ی پرجرم است. همانطور که در زیرقسمت ۲.۲.۲ اشاره شد، سیارات پرجرم می‌توانند اطراف مدارشان شکاف بوجود آورند. شکل‌گیری این شکاف میزان انتقال ماده از قرص خارجی به قرص داخلی را محدود می‌کند. به عبارت ساده‌تر، سیاره مانند سدی در برابر انتقال مواد عمل می‌کند و مواد نمی‌توانند به آسانی یک قرص مشابه بدون سیاره برافزایش کنند. در نتیجه چگالی در لبه‌ی خارجی شکاف افزایش می‌یابد و یک برآمدگی فشار را می‌سازد که می‌تواند در شرایط مناسب منجر به تشکیل گرداب شود. لی و همکارانش در ۲۰۰۵ نشان دادند که سیاره‌ای به جرم 10^{-4} برابر جرم ستاره‌ی مرکزی (۱/۰ جرم مشتری) در یک قرص غیروشکسان می‌تواند شکاف باز کند و بعد از ۵۰۰ دور، در لبه‌ی خارجی‌اش یک گردابه‌ی بزرگ شکل دهد (شکل ۴.۳.۲) [۴۳]. این نتیجه در ۲۰۰۷ توسط دِ فِل بورو و همکارانش با استفاده از کدهای متفاوت نیروانا (NIRVANA) و فلش (FLASH) با شرایط مرزی مختلف مورد آزمایش قرار گرفت [۲۲]. آنها نشان دادند که گرداب‌های کوچکی در ابتدا در لبه‌ی خارجی شکاف یک سیاره با جرم مشتری ظاهر می‌شوند که تا دور صدم سیاره به همدیگر می‌پیوندند و یک گرداب بزرگ را شکل می‌دهند. نتیجه مهم آنها این بود که کدهای مختلف که دارای روش‌های متفاوت برای حل معادلات هستند، نتایج یکسانی تولید می‌کنند و بنابراین گرداب‌ها یک اثر مصنوعی عددی نیستند.



شکل ۲.۳.۲: تصویر سمت راست تصاویر ساخته شده در طول موج‌های میلی‌متری از شبیه‌سازی‌های رگالی و همکارانش [۷۲] است که بسیار شبیه تصاویر تهیه شده توسط براون و همکارانش از سه گذارقرص متفاوت می‌باشند [۱۳] که در سمت چپ نشان داده شده‌اند. نام هر جرم در بالای تصاویر آمده است و بیضی‌ها در کنار هر تصویر ابعاد پرتو دریافت شده توسط تلسکوپ را مشخص می‌کنند.

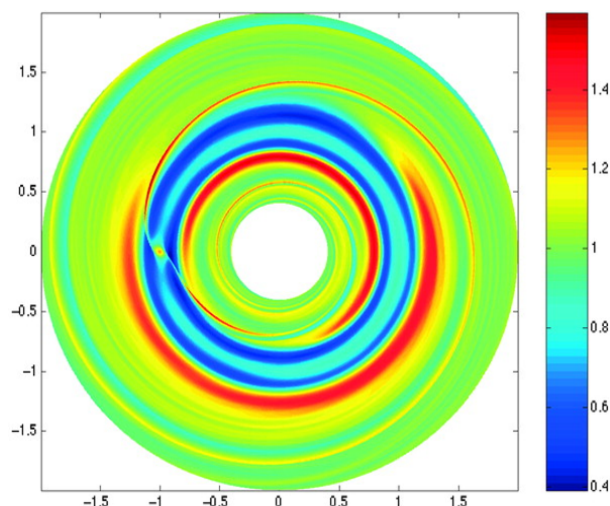


شکل ۳.۳.۲: چگالی یکی از شبیه‌سازی‌های لایرا و همکارانش که نشان می‌دهد حضور گرداب‌های بزرگ مقیاس تحت تأثیر تفکیک عددی قرار نمی‌گیرند و بنابراین گرداب‌ها، ساختارهای مصنوعی ناشی از محدودیت کدهای عددی نیست. این شبیه‌سازی‌ها سه بعدی است و این تصویر چگالی در صفحه‌ی میانی قرص را نشان می‌دهد. مرز بین نواحی مرده و زنده توسط یک خط‌چین مشخص شده است و گرداب‌ها نواحی قرمز با چگالی بالا هستند (تصویر از [۴۹]).

۲.۳.۲ شکاف بیضی‌شکل

پاپالویزو و همکارانش در ۲۰۰۱ اندرکنش بین یک سیاره و قرص نوعی پیش‌سیاره‌ای با وشکسانی $\nu = 10^{-5}$ را مطالعه کردند. آنها جرم سیاره را بین ۱ تا ۳۰ جرم مشتری تغییر دادند و تحول خروج از مرکز سیاره و قرص را برای حدود ۸۰۰ دور دنبال کردند [۶۷]. یکی از نتایج آنها این بود که برای سیارات با جرم بیشتر از ۲۰ جرم مشتری، لبه‌ی خارجی شکاف بیضی می‌شود. چندسال بعد کلای و همکارانش نشان دادند در صورتیکه به اندازه‌ی کافی (حدود ۲۰۰۰ دور) صبر کنیم، حتی برای سیاراتی با ۵ جرم مشتری نیز لبه‌ی خارجی شکاف بیضی می‌شود (شکل ۵.۳.۲). کلای و همکارانش در مقاله‌شان دلیل بیضی شدن قرص را انگیزش خروج از مرکز قرص از طریق برهمکنش بین تشدیدهای قرص و مؤلفه‌های پتانسیل سیاره می‌دانند. اگر پتانسیل سیاره Φ_p را بسط فوریه بدهیم

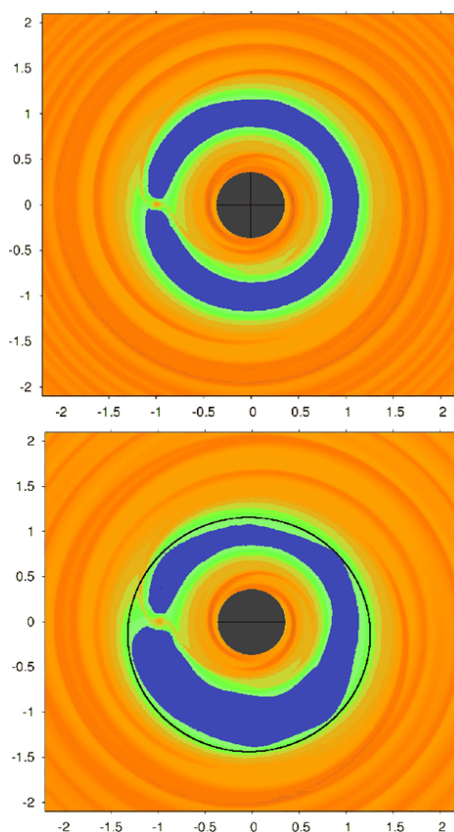
$$\Phi_p = \sum_{m=0}^{m=\infty} \Phi_m(r) \cos[m(\phi - \Omega_p t)] \quad (1.3.2)$$



شکل ۴.۳.۲: گرداب در لبه‌ی خارجی یک شکاف شکل گرفته توسط یک سیاره با جرم 0.1 جرم مشتری در یک قرص غیروشکسان (تصویر از [۴۳]).

که در آن Ω_p سرعت زاویه‌ای سیاره، ϕ مختصه‌ی سمتی و t زمان هستند، اختلال ایجاد شده در قرص از طریق سیاره را می‌توان متناسب با $\exp[i(k\phi - l\Omega_p t)]$ در نظر گرفت. مؤلفه‌ی m پتانسیل سیاره، خروج از مرکز قرص را در محل تشدید $\Omega = \frac{m}{m+1}\Omega_p$ تحریک می‌کند. این تشدید مطابق با مد اختلالی $(k, l) = (m+1, m)$ است [۴۶]. از طرفی دیگر تشدیدهایی نیز هستند که خروج از مرکز قرص را می‌میرانند. بنابر لیست ارائه شده در مقالات [۷۸، ۳۲] مؤثرترین تشدیدها در میراندن خروج از مرکز، تشدیدهای هم‌چرخش و لیندبلاد $1:2$ هستند. بنابراین اگر شکاف سیاره به اندازه‌ی کافی عمیق و پهن باشد که محدوده‌ی هم‌چرخش سیاره و تشدید لیندبلاد خارجی $1:2$ را خالی از ماده کند، عاملی برای میراندن خروج از مرکز باقی نمی‌ماند و قرص می‌تواند بیضی شود. برای تشدید لیندبلاد $1:2$ داریم $\Omega = \frac{1}{4}\Omega_p$ و با استفاده از $\Omega \simeq \sqrt{GM_*/r^3}$ محل تشدید میراکنده $1:2$ حدوداً در $r \sim 1/58 r_p$ واقع می‌شود. پس اگر سیاره بتواند تا این فاصله شکاف را خالی از مواد کند، لبه‌ی خارجی شکاف می‌تواند بیضی شود.

بیضی شدن لبه‌ی خارجی شکاف، مواد را در نقطه‌ی اوج بیضی فشرده‌تر می‌کند و در نتیجه چگالی را افزایش می‌دهد. این فشردگی نوعی عدم‌تقارن در قرص است که اگر بیضی به اندازه‌ی کافی کشیده باشد می‌تواند در مشاهدات آشکار شود.



شکل ۵.۳.۲: چگالی سطحی لگاریتمی قرصی با وشکسانی $\nu = 10^{-5}$ بعد از ۲۰۰۰ دور برای سیاره‌ای با جرم ۳ (بالا) و ۵ جرم مشتری (پایین). دایره‌ی سیاه لبه‌ی خارجی شکاف را نشان می‌دهد. خروج از مرکز دایره سیاه برای تصویر پایین ۰.۲ است که نشان‌دهنده‌ی بیضی بودن شکاف است. لازم به ذکر است که سیاره در این الگوها بر روی یک مدار دایره‌ای ثابت شده است. (تصویر از [۳۷]).

۴.۲ دام‌های غبار

بزرگترین تفاوت قرص‌های پیش‌سیاره‌ای با قرص‌های برافزایشی دیگر در دارا بودن مؤلفه‌ی جامد یا غبار است که اتفاقات جالبی مانند سیاره‌سازی را بوجود می‌آورد. حرکت ذرات غبار در قرص بسیار به اندازه‌ی

آنها وابسته است. نیروی کششی گاز F_D بر ذره‌ای به شعاع s که با سرعت v نسبت به گاز با چگالی ρ_g حرکت می‌کند، برابر است با

$$F_D = -\frac{1}{2} C_D \pi s^2 \rho_g v^2 \quad (۱.۴.۲)$$

که πs^2 سطح مقطع ذره، $\rho_g v^2$ فشار لبه و C_D ضریب کشش است. ضریب کشش به سرعت نسبی ذره به گاز و اندازه‌ی ذره وابسته است [۸۶، ۸۷]. ذراتی که اندازه‌ی آنها کمتر از مسیر آزاد میانگین ذرات گاز (λ) باشند، در رژیم اپشتاین^{۱۴} هستند و

$$C_{D,Epstein} = \frac{8}{3} \frac{v_{th}}{v}. \quad (۲.۴.۲)$$

که v_{th} سرعت گرمایی متوسط گاز است. برای ذرات بزرگتر، ضریب کشش به عدد رینولدز محیط $Re = \frac{\rho_g s v}{\eta}$ وابسته می‌شود و ذره در رژیم استوکس^{۱۵} قرار دارد. در این رژیم، ضریب کشش به صورت تابع پله‌ای از عدد رینولدز است

$$C_D \simeq 24 Re^{-1}, \quad Re < 1 \quad (۳.۴.۲)$$

$$C_D \simeq 24 Re^{-0.6}, \quad 1 \leq Re < 100 \quad (۴.۴.۲)$$

$$C_D \simeq 0.44, \quad Re > 100. \quad (۵.۴.۲)$$

گذار از رژیم اپشتاین به استوکس برای ذره‌ای با ابعاد $s = \frac{9\lambda}{4}$ اتفاق می‌افتد (برای جزئیات بدست آوردن روابط می‌توانید به [۸۶] مراجعه کنید). با استفاده از نیروی کشش گاز می‌توانیم زمان توقف ذره را بدست آوریم. زمان توقف، مدت زمانی است که طول می‌کشد تا تکانه‌ی ذره توسط نیروی کشش به اندازه‌ی یک واحد کاهش یابد یا به زبان ریاضی

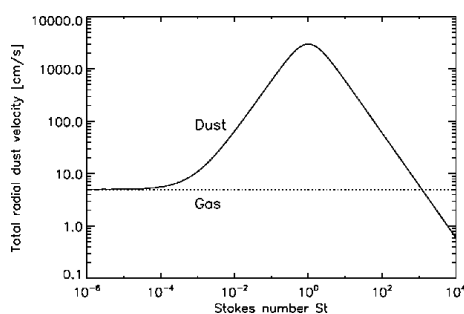
$$t_s = \frac{mv}{|F_D|}. \quad (۶.۴.۲)$$

به عنوان مثال برای ذره‌ای که در رژیم اپشتاین است $t_s = \frac{\rho_d s}{\rho_g v_{th}}$ که ρ_d چگالی ذره‌ی غبار است. زمان توقف برای ذره‌ای با شعاع ۱ میکرون که در یک قرص معمولی قرار دارد ($\rho_g \simeq 10^{-9} gcm^{-3}$ ، $\rho_d \simeq 1 gcm^{-3}$ و $v_{th} \simeq 1 Kms^{-1}$) از مرتبه ثانیه است که در مقایسه با زمان مداری ذره Ω^{-1} بسیار ناچیز است. این مقایسه نشان می‌دهد که ذره قبل از اینکه یک دور بزند کاملاً به گاز جفت و سرعت نسبی آن به گاز صفر می‌شود. به دلیل اینکه مقایسه‌ی زمان توقف با زمان مداری ذرات بسیار معنادارتر

^{۱۴}Epstein

^{۱۵}Stokes

است کمیت جدیدی به نام عدد استوکس^{۱۶} به صورت $St = t_s/\Omega_p^{-1}$ تعریف می‌شود. برای ذراتی که $St \gg 1$ نیروی کشش گاز نمی‌تواند تأثیری بر سرعت آنها بگذارد و بنابراین تکانه‌ی آنها چندان تغییر نمی‌کند و در نتیجه سرعت راندگی آنها (قسمت ۳.۲.۲) زیاد نیست، در حالیکه برای ذرات با $St \sim 1$ تکانه‌ی آنها در هر دور یک واحد کم می‌شود و بنابراین بسیار سریع به سمت ستاره رانده می‌شوند. همین‌طور ذرات با $St \ll 1$ به دلیل جفت شدن سریع به گاز نیروی کشش را احساس نمی‌کنند و میزان راندگی آنها به سوی ستاره بسیار ناچیز است. شکل ۱.۴.۲ سرعت راندگی را برای ذرات غبار با عددهای استوکس متفاوت نشان می‌دهد. اهمیت این تصویر در این است که با رشد ذرات، عدد استوکس آنها تغییر می‌کند و بنابراین وقتی به اندازه‌ی خاصی می‌رسند با سرعت بالایی به سمت ستاره حرکت می‌کنند و این سؤال بوجود می‌آید که پس سیارات چگونه رشد می‌کنند و به ابعاد چند ده کیلومتر می‌رسند؟ برای رسیدن به ابعاد کیلومتر و بالاتر نیاز داریم ذرات در محلی به دام افتند. یکی از راه‌حل‌هایی که می‌تواند جلو رانده شدن ذرات به سمت ستاره را بگیرد، وجود برآمدگی‌های فشار و گرداب‌ها است.



شکل ۱.۴.۲: سرعت راندگی برای ذرات با عددهای استوکس متفاوت در قرصی با وشکسانی آلفا و $\alpha = 10^{-3}$. خط‌چین، سرعت برافزایش گاز است. (تصویر از [۱۱])

نیروهایی مانند کوریولیس، گریز از مرکز و گرانش بر هر دو مؤلفه‌ی قرص، گاز و غبار، تأثیر می‌کنند اما غبار نیروهای ناشی از فشار (چه گرمایی و چه مغناطیسی) را متوجه نمی‌شود مگر به صورت نیروی

^{۱۶}Stokes number

کشش. بنابراین معادلات حرکت غبار و گاز به صورت زیر می‌شوند

$$\frac{\partial \vec{v}_g}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_g} \vec{\nabla} P + \vec{forces} \quad (۷.۴.۲)$$

$$\frac{\partial \vec{v}_d}{\partial t} = -\frac{\vec{v}_g - \vec{v}_d}{t_s} + \vec{forces} \quad (۸.۴.۲)$$

$$(۹.۴.۲)$$

که $\vec{v}_d$ و $\vec{v}_g$ به ترتیب سرعت گاز و غبار است. اگر فرض کنیم تغییر سرعت‌ها در طول زمان توقف ناچیز است، از دو رابطه‌ی بالا بدست می‌آوریم

$$\vec{v}_d = \vec{v}_g + t_s \frac{1}{\rho_g} \vec{\nabla} P. \quad (۱۰.۴.۲)$$

این رابطه نشان می‌دهد که ذرات به سمت مکانی که فشار در آن بیشتر است حرکت می‌کنند. بنابراین اگر در فشار در قرص به طور محلی افزایش یابد و شیب فشار مثبت شود، غبار به سوی این منطقه حرکت می‌کند. این منطقه می‌تواند یک برآمدگی فشار باشد که از طریق یک سیاره ایجاد شده و یا گرداب باشد. در هر صورت چنین برآمدگی‌های فشاری می‌توانند محل‌های بسیار مناسبی برای رشد سیارات باشند.

۵.۲ نکات کلیدی این فصل

- تبخیرنوری، شکاف یک سیاره پرجرم و رشد دانه‌ها سازوکارهایی هستند که می‌توانند در قرص‌ها حفره ایجاد کنند اما هیچ کدام به تنهایی برای توضیح تمام گذار قرص‌های مشاهده شده کافی نیست،
- تنها سازوکاری که می‌تواند عدم تقارن در گذار قرص‌ها ایجاد کند یک سیاره پرجرم است،
- یک سیاره پرجرم می‌تواند هم از طریق تولید گرداب و هم از طریق بیضی کردن لبه‌ی خارجی شکاف، عدم تقارن در قرص بوجود بیاورد،
- برآمدگیهای فشاری و گرداب‌ها مکان‌های مناسبی برای به دام انداختن غبار هستند.

فصل ۳

چگونه در مشاهدات یک گرداب را از شکاف بیضی شکل تشخیص دهیم؟

۱.۳ یادآوری و طرح مسأله

در فصل ۱ توضیح دادیم که مشاهدات قرص‌های پیش‌سیاره‌ای دسته‌ی جدیدی از قرص‌ها را آشکار ساخته‌اند که دارای حفره‌ای غباری در ناحیه‌ی داخلی هستند. این قرص‌ها که به گذارقرص معروف شده‌اند، در نقشه‌های مشاهدات میلیمتری به صورت حلقه‌ای از غبار دیده می‌شوند. با پیشرفت ابزار و افزایش قدرت تفکیک تلسکوپ‌ها در طول موج‌های بلند مشخص شده است که این حلقه‌ها نامتقارن هستند و یک سوی این حلقه‌ها دارای غبار بیشتری از سوی دیگر هستند. علاوه بر این، مشاهدات آشکار کرده‌اند که ساختار گذارقرص‌ها اغلب بسیار به هم ریخته و حتی دارای ساختارهایی شبیه بازوهای مارپیچی هستند. اگرچه سازوکارهای متفاوتی برای توضیح گذارقرص‌ها وجود دارند، اما تنها وجود یک سیاره‌ی پرجرم است که می‌تواند ساختارهای نامتقارن و حضور بازوهای مارپیچی را در لبه‌ی شکاف بوجود آورد (فصل ۲).

همانطور که در قسمت ۳.۲ توضیح داده شد، یک سیاره‌ی پرجرم می‌تواند دو نوع عدم تقارن بوجود

آورد: گرداب و شکاف بیضی شکل. اما تشکیل هر دو آنها به عوامل یکسانی بستگی دارد. وشکسانی زیاد می‌تواند با کم کردن عرض شکاف ایجاد شده توسط سیاره، باعث حضور ماده در مکان تشدیدهایی شود که خروج از مرکز قرص را میرا می‌کنند و عدم تقارن شکاف را کاهش دهد، از طرف دیگر وشکسانی زیاد، شیب چگالی سطحی را در لبه‌ی خارجی شکاف کاهش می‌دهد و احتمال تشکیل گرداب را کم می‌کند. جرم سیاره نیز عامل تأثیرگذاری در شکل‌گیری عدم تقارن‌ها است. با افزایش جرم سیاره، پهنای شکاف بیشتر می‌شود و تشدیدهای میراکننده‌ی خروج از مرکز قرص، خالی از ماده می‌شوند و بنابراین لبه‌ی خارجی شکاف می‌تواند بیضی شود، همچنین شیب چگالی سطحی در لبه‌های شکاف بیشتر می‌شود و احتمال شکل‌گیری گرداب زیادتر می‌گردد [۳۷، ۱۸]. با توجه به مطالب بیان شده، کاهش وشکسانی و افزایش جرم سیاره هر دو در یک سو عمل می‌کنند و باعث افزایش احتمال تشکیل ساختارهای نامتقارن در قرص می‌شوند.

اکنون این سؤال مطرح می‌شود که اگر قرص نامتقارنی را مشاهده کردیم، در صورتیکه فرض کنیم این عدم تقارن ناشی از حضور یک سیاره‌ی پرجرم است، چگونه تشخیص دهیم که این عدم تقارن گرداب است یا شکاف بیضی شکل؟

پاسخ این سؤال بسیار مهم است زیرا گرداب‌ها محل تجمع و رشد ذرات غبار هستند و می‌توانند پیش‌سیارات را شکل دهند [۴۷] در حالیکه شکاف بیضی شکل مانند بازوهای مارپیچی در کهکشان هستند و ذرات غبار فقط از آنها عبور می‌کنند. به عبارت دیگر یک قرص دربردارنده‌ی گرداب دارای دو دام برای غبار است: گرداب و لبه‌ی خارجی شکاف که یک برآمدگی فشار است، اما قرصی با شکاف بیضی شکل تنها یک دام غبار دارد که لبه‌ی شکاف می‌باشد. بنابراین اگرچه در نگاه گازی به قرص شاید تفاوت چندانی بین این دو نوع عدم تقارن نباشد اما در دید غباری، ساختار قرصی با گرداب بسیار متفاوت از قرصی با شکاف بیضی شکل خواهد بود. در این فصل ما با انجام شبیه‌سازی‌های عددی هم برای گاز و هم برای غبار تلاش می‌کنیم تا پاسخ این سؤال را بدهیم که یک مشاهده‌گر چگونه می‌تواند این دو ساختار نامتقارن را از یکدیگر تشخیص دهد؟

۲.۳ چگونه به این سؤال پاسخ دهیم؟

برای پاسخ به سؤال مطرح شده، قرص وشکسانی را در نظر می‌گیریم که دارای یک سیاره‌ی پرجرم است و این سامانه به دور یک ستاره‌ی مرکزی خورشید مانند می‌چرخد و سپس تحول آن را بررسی می‌کنیم. از

آنجا که هنوز سازوکار قطعی برای شکل گیری سیارات وجود ندارد می توانیم فرض کنیم که این سیاره در مراحل اولیه زندگی قرص که جرمش بیشتر است توسط فروریزش گرانشی شکل گرفته است. چون مقیاس زمانی شکل گیری سیارات از طریق ناپایداری گرانشی از مرتبه ۱۰۰۰ سال است و عمر گذار قرص ها حدود ۱ میلیون سال می باشد، فرض حضور سیاره ی پر جرم در یک گذار قرص منطقی است [۸۸].

معادلات این سامانه شامل معادله ی پیوستگی، پایداری تکانه (ناویر-استوکس) و معادله ی انرژی یا حالت است. پتانسیل گرانشی سیاره در برابر پتانسیل گرانشی ستاره مانند یک اختلال است و در نتیجه باید برای بررسی سامانه ی فرض شده معادلات اختلالی را حل کنیم. گلدریچ و ترمین [۳۰، ۳۱] و وارد [۸۵] با حل معادلات اختلالی مرتبه ی اول باز شدن شکاف در اطراف سیاره و مهاجرت سیاره را مورد مطالعه قرار دادند. اما برای مطالعه ی دقیق ساختار قرص نیاز به حل معادلات اختلالی با مرتبه ی بالاتر است که تقریباً با روش های تحلیلی غیر ممکن است. به همین دلیل به شبیه سازی های عددی متوسل می شویم و معادلات شاره را با استفاده از روش های عددی حل می کنیم.

۱.۲.۳ قرص گازی

فرض می کنیم که قرص گازی نازک است و می توانیم معادلات را در راستای عمود بر صفحه ی قرص انتگرال بگیریم. سپس معادلات انتگرال گیری شده را در مختصات قطبی (r, ϕ) در هر زمان t حل می کنیم تا تحول زمانی قرص را مطالعه کنیم. برای بررسی تأثیر وشکسانی و جرم سیاره بر ساختار قرص، این دو کمیت را در الگوهای مختلف تغییر می دهیم و عدم تقارن ایجاد شده را دنبال می کنیم. برای انجام شبیه سازی ها از کد فارگو^۱ که توسط ماسِت نوشته شده است استفاده می کنیم^۲. این کد به دلیل روش خلاقانه ای که در حل معادلات به کار می برد بسیار سریع است و نتایج آن نیز به خوبی با دیگر کدهای متداول برای حل معادلات قرص ها تطابق دارد و بنابراین، سرعت این روش از دقت محاسبات نمی کاهد [۲۱]. ما در قسمت بعد توضیح مختصری درباره ی کد می دهیم و سپس به توضیح درباره ی آماده سازی پارامترهای فیزیکی مورد نیاز مسئله مان خواهیم پرداخت.

^۱FARGO

^۲<http://fargo.in2p3.fr/>

فارگو

فارگو که مخفف Fast Advection in Rotating Gaseous Objects می‌باشد هم نام الگوریتمی است که سرعت حل معادلات شاره را در یک قرص افزایش می‌دهد و هم نام کدی است که برای اولین بار این الگوریتم در آن به کار رفت و توسط ابداع‌کننده‌ی آن منتشر شد [۵۱]. این کد معادلات پیوستگی، ناویر-استوکس و حالت یک قرص کپلری را در دستگاه قطبی و در شبکه‌ی اوپلری^۳ دو بعدی حل می‌کند. در شبیه‌سازی‌های عددی، گام زمان توسط شرط CFL^۴ تعیین می‌شود تا مانع از بروز ناپایداری‌های عددی گردد. بر اساس این شرط، مسافتی که شاره در هر نقطه از شاره در طی یک گام زمانی طی می‌کند نباید بیشتر از ابعاد سلول در آن مکان باشد. در غیر این صورت شاره به دلیلی غیرفیزیکی (گام زمانی بزرگ) وارد سلول بعدی می‌شود و باعث بروز نوسان در کمیت‌ها می‌شود که این نوسانات با زمان به طور نمایی رشد می‌کنند و ناپایداری بوجود می‌آورند.

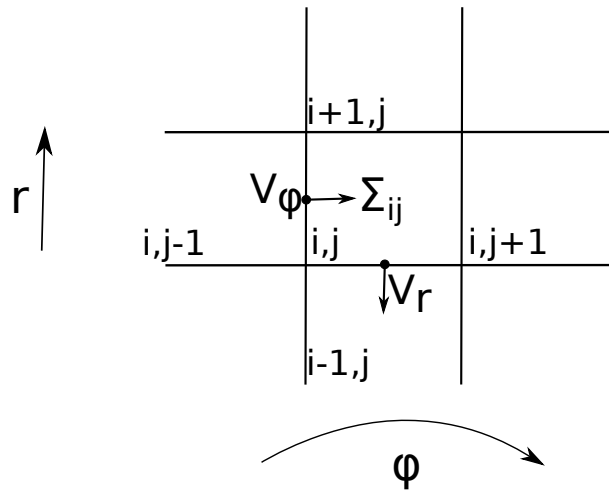
معمولاً سرعت کدی که معادلات یک قرص را حل می‌کند توسط شرط CFL در مرز داخلی تعیین می‌شود چون سرعت شاره بیشتر از دیگر نقاط است. از طرف دیگر، اغلب اوقات به آنچه در نواحی خارجی قرص‌ها اتفاق می‌افتد بیشتر علاقه‌مندیم. این بدین معناست که زمان توسط نواحی که مورد علاقه‌ی ما نیست تلف می‌شود. الگوریتم فارگو با دوران سلول‌ها با سرعت متوسط در هر حلقه، سرعت محاسبات را می‌تواند تا ۱۷ برابر افزایش دهد. در ادامه به توضیح بیشتر درباره‌ی چگونگی این روش خواهیم پرداخت.

قرصی را در نظر می‌گیریم که در راستای شعاعی به N_r حلقه و در راستای سمتی به N_s قسمت تقسیم شده است. قسمت‌های سمتی با هم برابر هستند و در هر قطعه $\Delta\theta = \frac{2\pi}{N_s}$ اما قسمت‌های شعاعی می‌توانند مساوی، لگاریتمی و یا با تقسیم‌بندی دلخواه باشند. مرز خارجی در R_{N_r} و مرز داخلی در R_{N_s} قرار دارد. چگالی $\rho_{ij} \in [0, N_r - 1][0, N_s - 1]$ (که تعیین‌کننده‌ی دیگر کمیت‌ها مانند فشار نیز هست) در مرکز هر سلول، سرعت شعاعی v_{ij}^r در مرکز هر قطعه‌ی سمتی و نیم-مرکز قطعه‌ی شعاعی در دیواره بین سلول $[i, j]$ و $[i - 1, j]$ و سرعت سمتی v_{ij}^θ در نیم-مرکز هر قطعه‌ی سمتی و مرکز هر قطعه‌ی شعاعی محاسبه می‌شوند (شکل ۱.۲.۳). روش حل معادلات فن لیر^۵ است که توضیح این روش خارج از حوصله‌ی این پایان‌نامه است و خواننده‌ی علاقه‌مند می‌تواند به [۸۴] مراجعه کند.

^۳ منظور از شبکه اوپلری، شبکه‌ی متصل به دستگاهی است که در آن حرکت شاره در نقطه‌ی خاصی از فضا بررسی می‌شود و شاره در هر سلول شبکه جریان دارد.

^۴Courant Friedrich Levy

^۵van Leer



شکل ۱.۲.۳: محل محاسبه‌ی کمیت‌ها در هر سلول شبکه.

تفاوت این الگوریتم با دیگران در نحوه‌ی انتقال سمتی کمیت‌ها است. به عنوان مثال معادله‌ی تکانه‌ی زاویه‌ای را در نظر می‌گیریم:

$$\frac{\partial J}{\partial t} + \underbrace{\frac{1}{r} \frac{\partial (v^\theta J)}{\partial \theta}}_{\text{azim. transport}} + \underbrace{\frac{1}{r} \frac{\partial (rv^r J)}{\partial r}}_{\text{rad. transport}} = \text{Source terms} \quad (1.2.3)$$

که $J = \rho r v^\theta$ تکانه‌ی زاویه‌ای است. برای هر کمیت فیزیکی دیگر معادله‌ی پایستگی مشابهی مانند بالا را می‌توان نوشت. حال اگر u مقدار ثابتی باشد، می‌توانیم معادله‌ی ۱.۲.۳ را به صورت زیر تغییر دهیم:

$$\frac{\partial J}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial [(v^\theta - u)J]}{\partial \theta} + \frac{u}{r} \frac{\partial J}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial (rv^r J)}{\partial r} = \text{Source terms}. \quad (2.2.3)$$

این رابطه دقیقاً با رابطه‌ی ۱.۲.۳ برابر است اما از لحاظ عددی کمک بسیار بزرگی می‌کند. اگر u را برابر با سرعت سمتی متوسط $\bar{v}^\theta$ بگیریم، رابطه‌ی ۲.۲.۳ شامل جملات

- منبع که برای تکانه‌ی زاویه‌ای شامل تمام نیروها است،

- انتقال شعاعی،

• انتقال سمتی با سرعت $(v^\theta - \bar{v}^\theta)$ ،

• و گامی اضافی مطابق با

$$\frac{\partial J}{\partial t} + \frac{\bar{v}^\theta}{r} \frac{\partial J}{\partial \theta} = 0 \quad (۳.۲.۳)$$

است. رابطه‌ی فوق شبیه معادله‌ی پیوستگی کمیت J است که با سرعت ثابت $\bar{v}^\theta$ حرکت می‌کند.

بنابراین جواب این معادله در زمان t برابر است با جواب این معادله در $t = 0$ ولی با انتقال سمتی

$$J(\theta, t) = J \left(\theta - \frac{\int_0^t \bar{v}^\theta dt}{r} \right). \quad (۴.۲.۳)$$

به زبان ریاضی $-\int_0^t \bar{v}^\theta dt/r$.

در هر گام زمانی فارگو، پس از به‌روز کردن جملات منابع، انتقال شعاعی و انتقال سمتی با سرعت $(v^\theta - \bar{v}^\theta)$ ، مقادیر به اندازه‌ی $-\int_0^t \bar{v}^\theta dt/r$ انتقال می‌یابند. برای واضح شدن مطلب لازم است بیشتر به جزئیات بپردازیم.

در هر گام زمانی Δt سرعت متوسط سمتی در هر شعاع R_i محاسبه می‌شود

$$\bar{v}_i^\theta = \frac{1}{N_s} \sum_{j=0}^{N_s-1} v_{ij}^\theta. \quad (۵.۲.۳)$$

سپس نزدیک‌ترین عدد صحیح به مقدار انتقال لازم تعیین می‌شود. اگر یافتن این عدد صحیح را با عملگر

E نشان دهیم، عدد انتقال در هر شعاع برابر است با

$$n_i = E \left[\bar{v}_i^\theta \frac{\Delta t}{\Delta y_i} \right] \quad (۶.۲.۳)$$

که $\Delta y_i = \frac{R_i + R_{i+1}}{2} \Delta \theta$. سرعت باقیمانده و سرعت ثابت باقیمانده را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$v_{ij}^{\theta_{res}} = v_{ij}^\theta - \bar{v}_i^\theta \quad (۷.۲.۳)$$

$$v_i^{\theta_{cr}} = \bar{v}_i^\theta - v_i^{\theta_S}. \quad (۸.۲.۳)$$

که $v_i^{\theta_S} = n_i \frac{\Delta y_i}{\Delta t}$ سرعت انتقال است. سرعت باقیمانده‌ی (i, j) تفاوت سرعت سلول (i, j) با سرعت متوسط در حلقه‌ی i است و هر سلول با این سرعت باید به طور مجزا انتقال پیدا کند. اما برای انتقال تمام سلول‌های حلقه‌ی i یکبار آنرا با سرعت ثابت باقیمانده به اندازه‌ی کسری از یک سلول منتقل می‌کنیم و یکبار با سرعت انتقال به اندازه‌ی تعداد صحیحی از سلول‌ها. شاید تقسیم سرعت‌ها از نظر تحلیلی

بیهوده به نظر برسد اما از لحاظ عددی مهم است و باعث کاهش خطای عددی می شود ([۵۱] را ببینید).
با توجه به تعریف های انجام شده، سرعت سمتی کل برابر است با

$$v_{ij}^{\theta} = v_i^{\theta S} + v_i^{\theta cr} + v_{ij}^{\theta res}. \quad (9.2.3)$$

فارگو مانند کدهای هیدرودینامیک متداول (مثلاً [۸۱]) در هر گام زمانی، ابتدا جملات منابع را به روز می کند و سپس کمیت ها را در راستای شعاعی منتقل می کند. اما در قسمت انتقال سمتی، نخست کمیت هیدرودینامیکی هر سلول با سرعت باقیمانده ی آن سلول انتقال پیدا می کند، بعد کمیت ها با سرعت ثابت باقیمانده منتقل می شوند و در نهایت کل کمیت های هر حلقه به n_i سلول جلوتر منتقل می شوند.

به عنوان مثال اگر حلقه ای با سرعت متوسط v^{θ} در مدت Δt به اندازه ی $4/7$ سلول دوران کند، پس از انتقال با سرعت باقیمانده، کمیت ها به اندازه ی $5/3 -$ سلول منتقل می شوند. در نهایت، مقادیر محاسبه شده ی هر سلول در 5 سلول بعد کپی می شوند. در حقیقت همین عمل باعث سریع تر بودن فارگو نسبت به دیگر کدها می شود. در کدهایی که از الگوریتم فارگو استفاده نمی شود، مدت زیادی صرف انتقال کمیت ها با سرعت متوسط می شود که این زمان در فارگو صرفه جویی می گردد.

استفاده از الگوریتم فارگو، شرط جدیدی را نیز در انتخاب گام زمانی اضافه می کند. شرایط مختلفی گام زمانی را تعیین می کنند. یکی از آنها (δt_1) این است که جبهه ی موج هر موجی که در سیستم ایجاد می شود نباید در یک گام زمانی بیش از یک سلول جابه جا شود [۷۴]. شرط دوم (δt_2) و سوم (δt_3) با استفاده از شرط CFL در راستای شعاعی و سمتی تعیین می شوند با این تفاوت که δt_3 در فارگو بسیار بزرگتر از دیگر کدهاست. چون در فارگو $\delta t_3 = \frac{\Delta y_i}{v_{ij}^{\theta res}}$ و $v_{ij}^{\theta res}$ بسیار کوچک تر از v_{ij}^{θ} است. شرط بعدی (δt_4) پایداری ناشی از وشکسانی (عددی یا فیزیکی) را تأمین می کند به این صورت که پخش ناشی از وشکسانی در هر گام زمانی نباید بیشتر از ابعاد سلول باشد. در نهایت، شرطی که روش فارگو اضافه می کند δt_{shear} است که مانع از جدا شدن مواد دو سلول همسایه در اثر بُرش^۶ می شود و برابر است با

$$\delta t_{shear}^{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{v_{ij}^{\theta}}{\Delta y_i} - \frac{v_{i+1,j}^{\theta}}{\Delta y_{i+1}} \right) \quad (10.2.3)$$

سرانجام با در نظر گرفتن تمام این شروط، گام زمانی مناسب به صورت زیر انتخاب می شود

$$\Delta t = C_0 / \{ \max_{i,j=0}^{N_r, N_s} [(\delta t_1^{ij})^{-2} + (\delta t_2^{ij})^{-2} + (\delta t_3^{ij})^{-2} + (\delta t_4^{ij})^{-2} + (\delta t_{shear}^{ij})^{-2}]^{1/2} \} \quad (11.2.3)$$

^۶ shear

که در هر مرحله مقدار بیشینه از میان کل سلول‌ها انتخاب می‌گردد. در این رابطه C به ضریب امنیت مشهور است و معمولاً برابر 0.5 در نظر گرفته می‌شود. این ضریب در حقیقت تضمین می‌کند که در هر گام زمانی مواد حداکثر به اندازه‌ی نصف سلول جابه‌جا می‌شوند.

آنچه تا اینجا گفته شد مربوط به ساختار داخلی کد است و استفاده‌کننده‌ی معمولی نیازی به تغییر آنها ندارد. آنچه برای تعیین تنظیمات^۷ الگوها لازم داریم دو پرونده با پسوندهای `par` و `cfg` است که اولی حاوی مقادیر مورد نیاز اولیه‌ی قرص و دومی حاوی مقادیر مورد نیاز سیاره است. جزئیات این پرونده‌ها در تارنمای کد آمده است.

تنظیمات اولیه

قرص را به صورت کاسه‌ای شکل^۸ و با نسبت ظاهری^۹ $h = 0.05(r/r_p)^{0.25}$ در نظر می‌گیریم که r_p فاصله‌ی سیاره تا ستاره است و در کد به عنوان مقیاس طول به کار می‌رود. با توجه به تعریف نسبت ظاهری $h = H/r$ که $H = c_s/\Omega_K$ مقیاس ارتفاع و Ω_K سرعت زاویه‌ای کپلری است، نمایه‌ی دما متناسب با عکس جذر فاصله $T \propto r^{-1/2}$ تغییر می‌کند. این مقادیر طوری انتخاب شده‌اند که مطابق با مشاهدات باشند [۸۸]. نمایه‌ی چگالی را به صورت $\Sigma = \Sigma_0 r^{-1}$ با $\Sigma_0 = 2 \times 10^{-4} M_\star / r_p^2$ در نظر گرفتیم که $M_\star$ جرم ستاره است. هرچند خودگرانش در نسخه‌ی کد مورد استفاده وارد نشده است و با توجه به استقلال معادلات از چگالی سطحی، نگرانی بابت بروز ناپایداری گرانشی در قرص وجود ندارد، اما انتخاب چگالی سطحی مناسب از لحاظ عددی مهم است. زیرا اگر این عدد بسیار کوچک باشد، ماده‌ی کافی در قرص برای مطالعه‌ی ساختار قرص بعد از 1000 زمان مداری^{۱۰} نخواهیم داشت و اگر بسیار بزرگ انتخاب شود، امواج قوی ناشی از سیاره مقدار زیادی از ماده را از مرزها خارج می‌کنند و قرص نیاز به زمان طولانی برای رسیدن به حالت نسبتاً پایدار دارد که این سبب اتلاف زمان و هزینه‌ی محاسبات می‌شود.

شرط پایا بودن یک قرص و شکسان منجر می‌شود به شرط $\dot{M} = 3\pi\Sigma\nu$ [۲۸] که بیان می‌کند اگر بخواهیم آهنگ و شکسانی در تمام قرص مقدار ثابتی باشد باید داشته باشیم $\nu \propto 1/\Sigma \propto r$. با توجه

^۷setup

^۸flared

^۹aspect ratio

^{۱۰}واحد اندازه‌گیری زمان در فارگو زمان مداری اولین سیاره است.

به نمایه‌ی در نظر گرفته شده برای نسبت ظاهری، الگوی آلفای وشکسانی [۷۹] نمایه‌ی مناسب را تولید می‌کند. بنابراین وشکسانی را به صورت وشکسانی آلفا $\nu = \alpha c_s H$ در نظر می‌گیریم که مقدار آلفا 10^{-2} ، 10^{-3} و 10^{-4} در الگوهای مختلف می‌باشد [۷۹].

مرز داخلی قرص را در $0.1 r_p$ و مرز خارجی را در $7 r_p$ قرار می‌دهیم. تقسیم‌بندی‌ها در راستای شعاعی لگاریتمی و در راستای سمتی یکنواخت هستند. قرص را با $512 \times 757 N_r \times N_s$ سلول می‌پوشانیم که در آن N_r به گونه‌ای انتخاب شده است که از بروز مشکلات عددی به خاطر شیب زیاد چگالی در لبه‌ی شکاف سیاره جلوگیری شود و N_s را به نحوی محاسبه کردیم که سلول‌ها همگی مربعی شکل باشند تا خطای عددی را به حداقل کاهش دهیم. ما برای مرزها از شرط مرزی نابازتاب‌کننده^{۱۱} موجود در کد استفاده کردیم تا بازتاب امواج از مرزها را به حداقل برسانیم.

سیاره را بسیار پرجرم انتخاب می‌کنیم تا پهنای شکاف تولید شده در حد شکاف مشاهده شده در گذار قرص‌ها باشد. جرم سیاره را به ترتیب ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ جرم مشتری قرار می‌دهیم که هر جرم مشتری برابر است با $10^{-3} M_{Jup} = 10^{-3} M_*$. سیاره را در $r_p = 1$ می‌گذاریم و به آن اجازه مهاجرت نمی‌دهیم. پتانسیل سیاره Φ را به خاطر جلوگیری از ایجاد تکینگی در محاسبات توسط پارامتر $\epsilon = 0.06 R_H$ ، که

$$R_H \text{ شعاع هیل سیاره}^{12} \text{ است، به صورت زیر ملایم کردیم}$$

$$\Phi = \frac{GM_p}{\sqrt{r^2 + \epsilon^2}}. \quad (12.2.3)$$

لازم به ذکر است که جرم ستاره‌ی مرکزی در فارگو به عنوان واحد جرم و برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود و بقیه‌ی جرم‌ها به صورت کسری از جرم ستاره‌ی مرکزی بیان می‌شوند.

برای اینکه بتوانیم نتایجی را که به دست می‌آوریم با مشاهدات مقایسه کنیم، لازم است که اعداد بدون بُعد کد را به اعداد معنادار فیزیکی تبدیل کنیم. برای انجام این کار تنها کافی است که برای جرم ستاره و فاصله‌ی مداری سیاره مقادیر فیزیکی انتخاب کنیم و بقیه‌ی کمیت‌ها با کمک این دو تبدیل می‌شوند. به دلیل اینکه اغلب گذار قرص‌ها تا کنون در اطراف ستارگان خورشیدمانند کشف شده‌اند، جرم ستاره را برابر جرم خورشید می‌گیریم $M_* = 1 M_\odot$ و فاصله‌ی مداری سیاره را مساوی با $20 AU$ قرار می‌دهیم. با این انتخاب‌ها، قرص دارای نمایه‌ی چگالی $g \text{ cm}^{-2} \sim 4/44 (r/20 AU)^{-1}$ و Σ و جرم $0.008 M_\odot$ می‌شود که از $2 AU$ تا $140 AU$ گسترده شده است. این نشان می‌دهد که ما در این کار تقریباً یک قرص واقعی را شبیه‌سازی کرده‌ایم.

^{۱۱}non-reflecting

^{۱۲} $R_H = r_p \left(\frac{M_p}{r M_*} \right)^{1/3}$

با توجه به سه مقدار برای وشکسانی و چهار مقدار برای جرم سیاره، ۱۲ الگو داریم که برای هر کدام یک شبیه‌سازی طولانی مدت (۱۰۰۰ زمان مداری) انجام دادیم و نتایج را در هر ۱۰۰ زمان مداری ذخیره کردیم.

تشخیص گرداب از شکاف بیضی شکل

در اغلب الگوهای ما، ساختارهای نامتقارن مشاهده می‌شود و باید روشی برای تشخیص گرداب از شکاف بیضی شکل داشته باشیم. ما راههای مختلفی مانند رسم توزیع سرعت‌های سمتی و شعاعی یا چگالی گردابه را آزمودیم، ولی به دلیل پیچیدگی سامانه و گاهی حضور همزمان هر دو ساختار نامتقارن در قرص، امکان تعیین معیاری برای تمیز این دو ساختار از یکدیگر ممکن نبود. در نهایت به روشی ساده رسیدیم که به ماهیت این دو ساختار برمی‌گردد. همانطور که در قبل گفتیم حرکت گرداب به دور ستاره در یک بازه‌ی کوتاه زمانی (مثلاً ۲ زمان مداری) بسیار محسوس است اما مکان شکاف بیضی شکل به دلیل حرکت بسیار آرامش، در بازه‌ی زمانی مشابه تغییر نمی‌کند. ما از این تفاوت استفاده کردیم تا گرداب را از شکاف بیضی شکل مشخص کنیم. به همین منظور، هر خروجی شبیه‌سازی‌های اصلی را به اندازه‌ی ۲ زمان مداری و با تفکیک زمانی بالا دوباره ادامه دادیم و در این مرحله خروجی‌های کد را هر ۱۰۰/۱۱ ام زمان مداری ذخیره کردیم. این کار ۱۲۰ شبیه‌سازی به ۱۲ تایی قبلی اضافه کرد. با انجام این کار قادر شدیم ساختار نامتقارن را در زمان دنبال کنیم و اگر ساختار در طی ۲ زمان مداری جابه‌جا شد، آن را گرداب و اگر ثابت ماند، آن را شکاف بیضی شکل نامیدیم.

۲.۲.۳ قرص غباری

برای مطالعه‌ی چگونگی تشخیص گرداب از شکاف بیضی شکل در مشاهدات نیاز به دانستن ساختار قرص غباری داریم زیرا (۱) غبار به دلیل نداشتن فشار، متفاوت از گاز رفتار می‌کند، (۲) آنچه در مشاهدات میلیمتری می‌بینیم تابش ناشی از غبار است و (۳) حفره‌ی گذار قرص‌ها در غبار است نه گاز. اما باید در نظر داشته باشیم که گاز از طریق نیروی کشش بر روی غبار تأثیر می‌گذارد و بنابراین باید آن را در هر مرحله از شبیه‌سازی‌های غبار منظور کرد.

برای بدست آوردن ساختار قرص غباری، ما از کدی که توسط ژروم نوشته و توسعه داده شده بود استفاده کردیم [۹۲]. این کد اطلاعات گاز را از خروجی‌های فارگو می‌خواند و سپس معادلات حرکت را

در مختصات قطبی برای هر دانه‌ی غبار با در نظر گرفتن کشش گاز حل می‌کند. این معادلات عبارتند از

$$\frac{dr}{dt} = v_r \quad (۱۳.۲.۳)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{L}{r^2} \quad (۱۴.۲.۳)$$

$$\frac{dv_r}{dt} = \frac{L^2}{r^3} - \frac{\partial\Phi}{\partial r} + f_{d,r} + f_{in,r} \quad (۱۵.۲.۳)$$

$$\frac{dL}{dt} = -\frac{\partial\Phi}{\partial\phi} + f_{d,\phi} + f_{in,\phi} \quad (۱۶.۲.۳)$$

که L تکانه‌ی زاویه‌ای خاص، $\Phi = -GM_*/r - GM_p/r_s$ پتانسیل گرانشی در فاصله‌ی r از ستاره و r_s از سیاره است. $\vec{f}_d$ نیروی کشش گاز بر واحد جرم ذره است که از رابطه‌ی

$$\vec{f}_d = -\frac{\Omega_K}{T_s} \Delta v \quad (۱۷.۲.۳)$$

بدست می‌آید که T_s زمان توقف بدون بعد است. این رابطه معادل با رابطه‌ی ۶.۴.۲ است برای حالتیکه که زمان بر حسب زمان‌مداری (2π) بیان شود. Δv نیز سرعت ذره نسبت به گاز است. در این کد زمان توقف برای ذرات با اندازه‌ی متوسط از طریق برونیابی بین رژیم اپشتاین و رژیم استوکس بدست می‌آید. در معادلات حرکت ۱۵.۲.۳ و ۱۶.۲.۳ شامل نیروهای لختی است که به دلیل ثابت بودن مرکز مختصات در کد فارگو بر روی ستاره است در حالیکه مرکز جرم سیستم به دلیل حضور سیاره‌ی پرجرم و عدم تقارن در سیستم اندکی خارج از ستاره قرار می‌گیرد. این نیرو برای سادگی ابتدا در مختصات کارتزین محاسبه می‌شود و سپس در مختصات قطبی تصویر می‌گردد. مؤلفه‌های x و y این نیرو از روابط زیر بدست می‌آیند

$$f_{in,x} = \ddot{R}_c \cos \phi_c + 2\dot{R}_c \dot{\phi}_c \sin \phi_c - \dot{\phi}_c^2 R_c \cos \phi_c - \ddot{\phi}_c R_c \sin \phi_c \quad (۱۸.۲.۳)$$

$$f_{in,y} = \ddot{R}_c \sin \phi_c - 2\dot{R}_c \dot{\phi}_c \cos \phi_c - \dot{\phi}_c^2 R_c \sin \phi_c + \ddot{\phi}_c R_c \cos \phi_c. \quad (۱۹.۲.۳)$$

در روابط فوق، R_c و ϕ_c به ترتیب مختصه‌ی شعاعی و قطبی مرکز جرم سیستم است. برای آگاهی از جزئیات کد می‌توانید به [۶۴] و [۹۲] مراجعه کنید.

وشکسانی تلاطمی با هم زدن شاره باعث پخش شدن غبار به طور محلی می‌شود و می‌تواند مانع از جمع شدن غبار در دام‌های غبار گردد. برای وارد کردن تأثیر وشکسانی، در هر گام زمانی Δt به ذره اجازه دادیم تا یک گام اضافی به اندازه‌ی l در جهتی تصادفی بردارد. طول این گام به وشکسانی گاز و زمان

توقف بدون بُعد ذره به صورت زیر وابسته است

$$l = \sqrt{D_p \Delta t} = \sqrt{\frac{\nu}{(1 + T_s^2)} \Delta t} \quad (20.2.3)$$

که D_p ضریب پخش ذره است [۹۰]. در هر شبیه‌سازی، وشکسانی مطابق با همان الگو انتخاب شده است. چون ما به توزیع ذرات علاقه‌مند بودیم محاسبات مربوط به لختگی^{۱۳} و تکه شدن^{۱۴} را در کد فعال نکردیم.

ما برای بدست آوردن ساختار قرص غباری، برای هر الگوی منتخب قرص گازی دو دسته شبیه‌سازی غبار انجام دادیم یکی برای ذراتی با جرم $0.5g$ و دیگری برای ذراتی با جرم $0.5g$. این دو جرم متناظر با ابعاد تقریباً ۲ و ۵ میلی‌متر برای چگالی غبار $\rho_d = 2g\ cm^{-3}$ و ضریب پرتشدگی ۶۰٪ است [۱۰]. انتخاب این دو اندازه برای ذرات به این دلیل است که می‌خواهیم ذرات به‌ترتیب دارای رانش متوسط و بیشینه در فاصله‌ی $50\ AU$ ، که حدوداً محل تشکیل ساختار نامتقارن است، باشند. توضیح بیشتر درباره‌ی دلیل این انتخاب‌ها را در بخش ۳.۳ خواهیم آورد.

در ابتدای هر شبیه‌سازی ۱۰۰۰۰ ذره با جرم یکسان را مطابق با چگالی سطحی گاز در دور ۱۰۰۰ام در قرص توزیع کردیم و اجازه دادیم قرص غباری برای ۲۰۰ دور متحول شود.

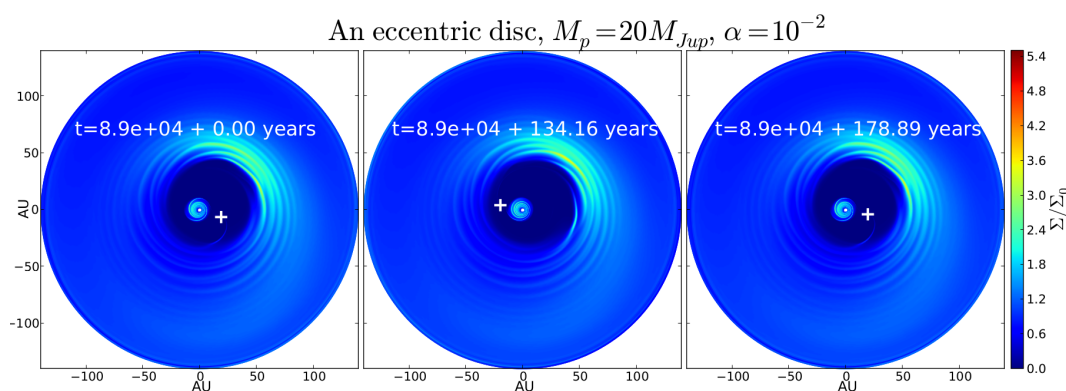
۳.۳ نتایج

همان‌طور که در قسمت‌های قبل بیان شد، هدف اصلی، یافتن شرایطی است که قرص دارای شکاف بیضی شکل یا گرداب قابل تشخیص در مشاهدات است. بنابراین در هر ۱۰۰ دور، نقشه‌ی چگالی سطحی را برای قرص رسم و در صورت مشاهده‌ی عدم تقارن در قرص، آن را برای ۲ دور دیگر دنبال کردیم. شکل ۱.۳.۳ قرصی با ساختار بیضی شکل را نشان می‌دهد و آشکارا ساختار نامتقارن در طی ۲ زمان‌مداری ثابت است. در میان دیگر الگوها، این شبیه‌سازی دارای خروج از مرکز بزرگ‌تری ($0.35 \sim$) است و هیچ گونه ساختار متحرک دیگری در قرص مشاهده نمی‌شود. به عبارت دیگر ساختار نامتقارن در این الگو یک "شکاف بیضی شکل خالص" است.

^{۱۳}coagulation

^{۱۴}fragmentation

برای بدست آوردن خروج از مرکز لبه‌ی خارجی شکاف، از روش استفاده شده در [۳۷] کمک گرفتیم. فرض کردیم هر سلول از قرص یک ذره است که تحت تأثیر گرانش ستاره‌ی مرکزی حرکت می‌کند و از اثر فشار نیز صرف‌نظر کردیم. سپس با استفاده از سرعت و مکان عنصر، خروج از مرکز آن را بدست آوردیم. در نهایت میانگین خروج از مرکز عناصر روی حلقه i ام را به عنوان خروج از مرکز قرص در R_i در نظر گرفتیم. محاسبات را می‌توانید در پیوست آ مشاهده کنید.

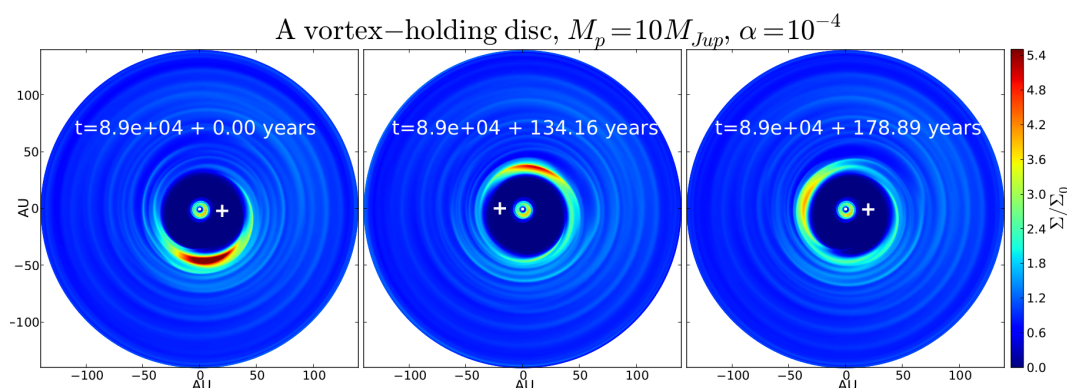


شکل ۱.۳.۳: تحول قرصی با وشکسانی $\alpha = 10^{-2}$ که دارای سیاره‌ای با جرم $M_p = 20M_{Jup}$ است از زمان $t = 1000$ تا $t = 1002$ مداری. ساختار نامتقارن ناشی از یک شکاف بیضی شکل کاملاً مشخص است و مشاهده می‌کنیم که این ساختار در طی ۲ دور ثابت است. علامت + نشان‌دهنده‌ی مکان سیاره است.

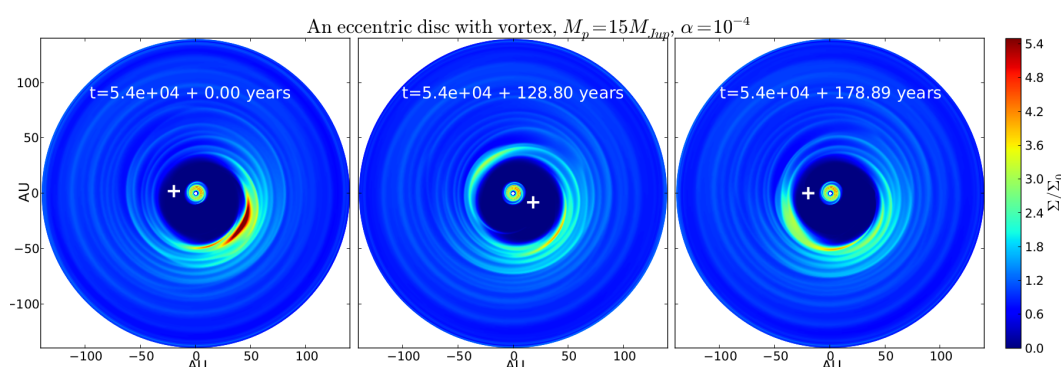
در شکل ۲.۳.۳ وجود یک گرداب در قرص بسیار واضح است و ساختار نامتقارن غالب در قرص است. اما حتی با استفاده از این روش، در برخی از موارد تشخیص گرداب از شکاف بیضی شکل بسیار مشکل بود به این دلیل که هر دو ساختار در قرص وجود دارند و بسیار با هم مخلوط می‌شوند. تصویر ۳.۳.۳ مثال بسیار خوبی از این موارد پیچیده است.

عمر گرداب کمیتی مهم است زیرا در صورتیکه گرداب بتواند برای مدت طولانی در قرص بماند، می‌تواند مشاهده گردد. اگر گرداب در ۱۰۰ دور اول (تقریباً ۳۵۰ سال در فاصله‌ی ۵۰ AU) ناپدید شود احتمال اینکه در طی ۱ میلیون سال عمر یک گذار قرص مشاهده گردد تقریباً صفر است. برای تخمین زمان بقای گرداب، ما آخرین زمانی که ساختاری نامتقارن و چرخان در قرص تشخیص دادیم را به عنوان عمر گرداب انتخاب کردیم.

شکل ۴.۳.۳ خلاصه‌ی نتایج تمام الگوهایمان را نشان می‌دهد. در این تصویر تمام الگوهایی که در انتهای زمان شبیه‌سازی (۱۰۰۰ زمان مداری) دارای شکاف بیضی شکل بودند با نقطه‌ای مشکی مشخص



شکل ۲.۳.۳: تحول قرصی با وشکسانی $\alpha = 10^{-4}$ که دارای سیاره‌ای با جرم $M_p = 10M_{Jup}$ است از زمان $t = 1000$ تا زمان مداری $t = 1002$. یک گرداب در این قرص کاملاً مشخص است. گرداب در طی ۲ دور به وضوح به دور ستاره دوران می‌کند. علامت + نشان‌دهنده مکان سیاره است. همانطور که مشاهده می‌شود هیچ وابستگی بین مکان سیاره و موقعیت گرداب وجود ندارد.



شکل ۳.۳.۳: تحول قرصی با وشکسانی $\alpha = 10^{-4}$ که دارای سیاره‌ای با جرم $M_p = 15M_{Jup}$ است از زمان $t = 1000$ تا زمان مداری $t = 1002$. در حالیکه بیضی بودن شکاف کاملاً مشخص است، یک گرداب نیز در قرص وجود دارد. اگر چه گرداب از درون فشردگی ناشی از بیضی بودن لبه‌ی شکاف عبور می‌کند، اما همچنان پس از بیرون آمدن از آن ساختار خود را باز می‌یابد. چنین الگوهای پیچیده‌ای ممکن است بتوانند قرص‌های به هم ریخته‌ای مانند HD 142527 را توضیح دهند. علامت + نشان‌دهنده مکان سیاره است.

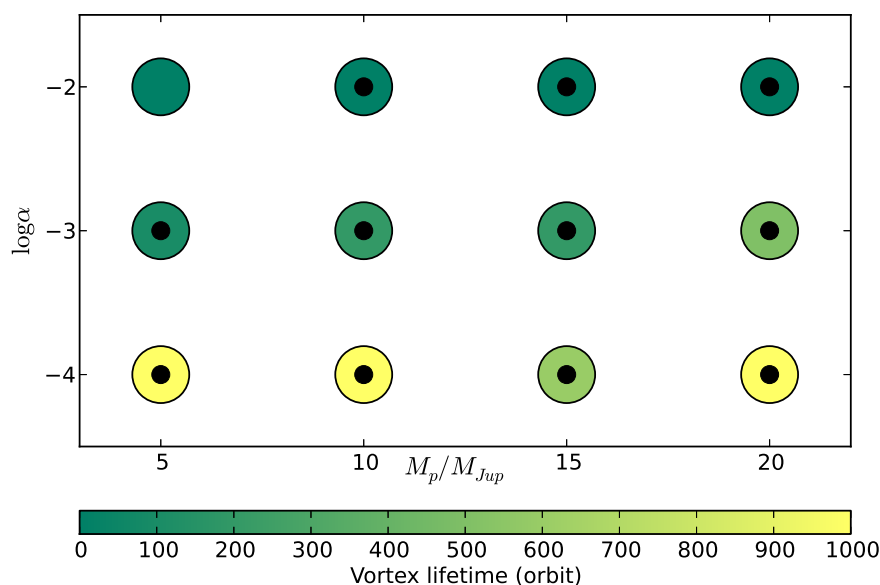
شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که تقریباً تمام الگوها در انتها توانستند شکاف بیضی شکل را بوجود آورند. اما حضور گرداب تا انتهای زمان شبیه‌سازی تنها در الگوهای با وشکسانی $\alpha = 10^{-4}$ اتفاق می‌افتد.

در هیچ کدام از الگوهای با شکسانی $\alpha = 10^{-2}$ گردابی مشاهده نمی‌شود. در الگوی با $M_p = 5M_{Jup}$ ، یک شکاف دایروی در ۱۰۰ دور ابتدایی تشکیل می‌شود و تا انتها نیز دایروی می‌ماند. سیاره‌ی با جرم بیشتر $M_p = 10M_{Jup}$ از دور ۲۰۰ام شروع به بیضی کردن شکاف می‌کند و در دور ۴۰۰ام شکل شکاف کاملاً بیضی است. بین این دو زمان درون شکاف به شدت به هم ریخته و آشفته است. برای دو الگوی دیگر حتی در دور ۲۰۰ام، شکاف به طور واضح بیضی است.

برای مقدار متوسط شکسانی $\alpha = 10^{-3}$ ، تحول قرص دارای ۳ مرحله است. در مرحله‌ی اول یک گرداب در لبه‌ی شکاف تشکیل می‌شود و تا زمان مداری ۲۰۰ یا ۳۰۰ در قرص باقی می‌ماند. طول عمر گرداب به شدت وابسته به جرم سیاره است. هر چه جرم سیاره بیشتر باشد، گرداب مدت طولانی‌تری از نابود شدن نجات پیدا می‌کند. در مرحله‌ی بعدی که تا زمان مداری ۸۰۰ برای $M_p = 5M_{Jup}$ و زمان مداری ۵۰۰ برای دیگر جرم‌ها ادامه دارد، ساختارها در قرص چنان پیچیده و درهم‌آمیخته هستند که تشخیص آنها از یکدیگر امکان‌پذیر نیست. در این مرحله حتی اگر ما ساختار متحرک یا عدم تقارنی در قرص مشاهده کردیم، آن را نه به عنوان شکاف بیضی شکل و نه به عنوان گرداب در نظر گرفتیم. در مرحله‌ی سوم، سیاره موفق می‌شود که شکافی بیضی شکل را شکل دهد و این ساختار تا انتهای زمان شبیه‌سازی باقی می‌ماند.

ردیف سوم در شکل ۴.۳.۳ که نتایج الگوهای با $\alpha = 10^{-4}$ را نشان می‌دهد، جالب‌ترین نتایج را از نظر بقای گرداب در قرص داراست. برای الگوهای با $M_p = 5M_{Jup}$ و $M_p = 10M_{Jup}$ ، گرداب ساختار غالب تا انتهای شبیه‌سازی است. اگر چه شکاف کمی بیضی است اما عدم تقارن ایجاد شده در چگالی سطحی توسط گرداب بسیار بیشتر از شکاف بیضی شکل است. از طرف دیگر، در الگوهای با جرم‌های $M_p = 15M_{Jup}$ و $M_p = 20M_{Jup}$ ، ساختار ناشی از بیضی بودن شکاف آنقدر قوی است که اصلاً تحت تأثیر گرداب قرار نمی‌گیرد و هر دو ساختار به خوبی در قرص قابل تشخیص هستند. در زمان‌هایی که این دو ساختار روی هم می‌افتند بیشترین عدم تقارن در چگالی مشاهده می‌شود.

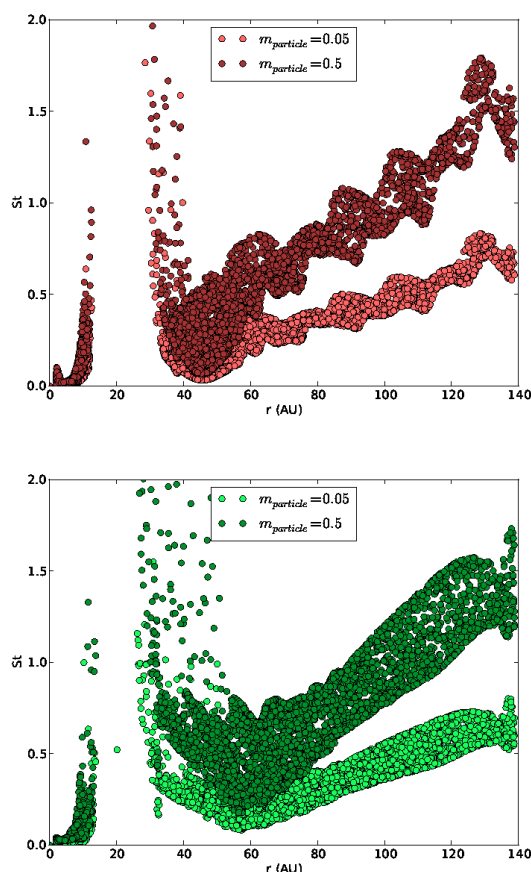
برای مقایسه‌ی توزیع غبار بین قرصی دارای گرداب و قرصی دارای شکاف بیضی شکل، از دو الگوی نشان داده شده در شکل‌های ۱.۳.۳ و ۲.۳.۳ که به ترتیب دارای "شکاف بیضی شکل خالص" و "گرداب خالص" هستند استفاده کردیم. این دو الگو را برای ۲۰۰ دور دیگر با تفکیک زمانی بالا ادامه دادیم و خروجی‌های فارگو این الگوها را به کد غبار وارد کردیم و با تنظیمات بیان شده در قسمت ۲.۲.۳ شبیه‌سازی‌های غبار را انجام دادیم. همانطور که شکل ۵.۳.۳ نشان می‌دهد، عدد استوکس ذرات با جرم $0.5g$ تقریباً ۱ و ذرات با جرم $0.5g$ حدود 0.5 است که بنابراین به ترتیب دارای سرعت رانش بیشینه و متوسط در این قرص‌ها هستند. انتخاب ذرات با عدد استوکس مناسب بسیار مهم است زیرا اگر



شکل ۴.۳.۳: در این تصویر بیضی بودن شکاف در انتهای شبیه‌سازی‌ها با نقطه‌ای مشکی مشخص شده است. رنگ‌ها نیز طول عمر گرداب را نشان می‌دهند. محور عمودی لگاریتم و شکسانی و محور افقی جرم ستاره است. برای $M_p = 15 M_{Jup}$ و $\alpha = 10^{-4}$ ساختارهای نامتقارن بعد از دور ۶۰۰ چنان با هم مخلوط شدند که غیر قابل تشخیص بودند. به همین دلیل ما عمر گرداب را برای این مورد ۶۰۰ دور در نظر گرفتیم.

عدد استوکس خیلی بزرگ یا خیلی کوچک باشد، برای دنبال کردن تحول قرص باید مدت بسیار طولانی شبیه‌سازی‌ها را ادامه دهیم. از طرف دیگر، بنابر امکانات و نتایج رصدی موجود، ذرات با ابعاد میلی‌متر برای ما جالب هستند.

شکل ۶.۳.۳ نتایج شبیه‌سازی‌های غبار را برای الگوهای منتخب نشان می‌دهد. ردیف اول این تصویر، توزیع غبار را در قرص دارای گرداب نشان می‌دهد. ذرات غبار در طی ۲۰۰ زمان مداری به سوی مرکز گرداب حرکت کرده و در آن به دام می‌افتند. در ردیف دوم، توزیع غبار برای قرص با شکاف بیضی شکل نشان داده شده است. علیرغم قرص دارای گرداب، ذرات غبار فقط در لبه‌ی شکاف به دام افتاده‌اند و حلقه‌ای غباری را شکل داده‌اند که به دلیل پخش مؤثر ناشی از و شکسانی زیاد ($\alpha = 10^{-2}$) پهن شده است.



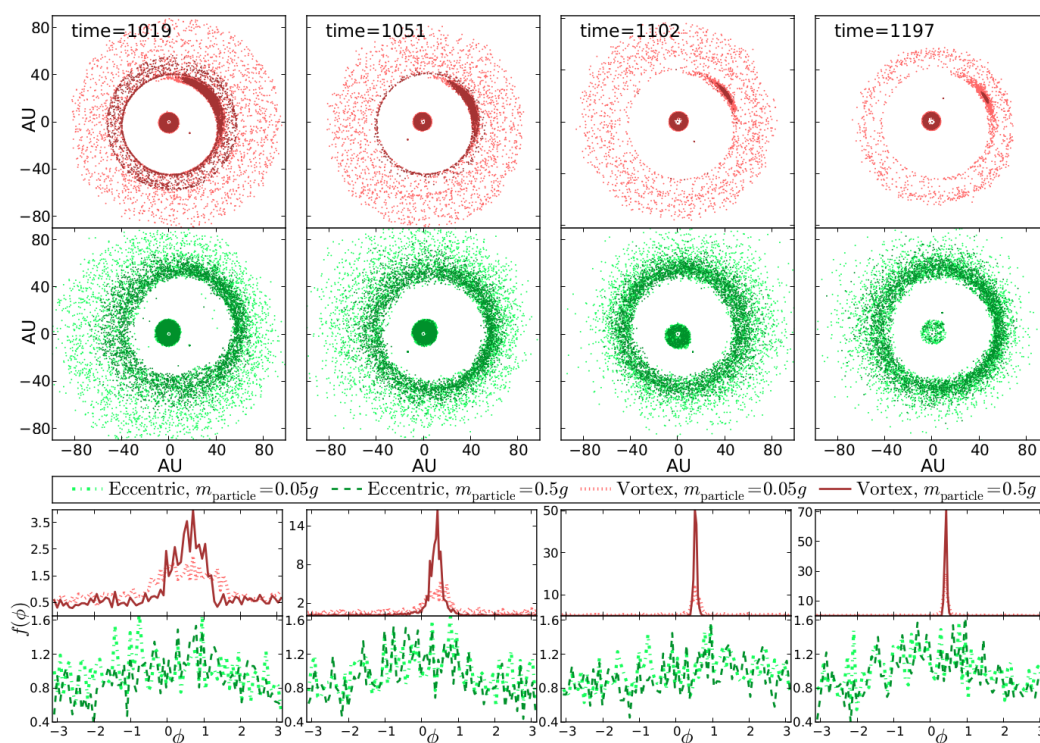
شکل ۵.۳.۳: عدد استوکس برای ذرات با جرم $0.05g$ و $0.5g$ برای الگوی دارای شکاف بیضی (بالا) و الگوی دارای گرداب (پایین) در ابتدای شبیه‌سازی‌های غبار.

برای مقایسه‌ی عدم‌تقارن ایجاد شده، ضریب افزایش غبار را به صورت زیر تعریف می‌کنیم

$$f(\phi) = \frac{(M_{dust}/M_{gas})_t}{(M_{dust}/M_{gas})_{t=1000}} \quad (1.3.3)$$

که برای $r \in [30, 140]$ محاسبه می‌شود. در حقیقت $f(\phi)$ نسبت جرم غبار به گاز موجود بین زاویه‌ی ϕ و $\phi + d\phi$ را در زمان t با این نسبت در آغاز شبیه‌سازی غبار مقایسه می‌کند. افزایش این عدد نشان‌دهنده‌ی تمرکز ذرات است. در ردیف‌های سوم و چهارم شکل ۶.۳.۳ ضریب افزایش غبار را بر حسب زاویه‌ی سمتی برای دو الگوی مورد نظر رسم کرده‌ایم. با مقایسه‌ی این دو ردیف متوجه می‌شویم که اگر چه در

هر دو الگو عدم تقارن وجود دارد اما ضریب افزایش غبار در قرص دارای گرداب بسیار بزرگتر از قرص دارای شکاف بیضی شکل است و این عدم تقارن در بازه‌ی زاویه‌ای بسیار کوچک‌تری اتفاق می‌افتد. این تفاوت، می‌تواند معیار بسیار خوبی برای تمیز این دو الگو از یکدیگر در مشاهدات باشد.



شکل ۶.۳.۳: توزیع غبار برای قرصی دارای گرداب و قرصی با شکاف بیضی شکل. ردیف‌های اول و دوم به ترتیب ساختار قرص غباری را برای الگوهای منتخب در زمان‌های ۱۰۱۹، ۱۰۵۱، ۱۱۰۲ و ۱۱۹۷ زمان مداری نشان می‌دهند. انتخاب این زمان‌ها به این دلیل است که گرداب در زاویه‌ی سمتی برابر با فشردگی ناشی از شکاف بیضی شکل قرار گیرد و مقایسه‌ی بین آنها آسان‌تر شود. ردیف‌های سوم و چهارم ضریب افزایش غبار را در زوایای سمتی مختلف برای قرص دارای گرداب و قرص دارای شکاف بیضی شکل نشان می‌دهند. نقاط روشن نمایانگر ذرات با جرم $0.05g$ و نقاط تیره نمایانگر ذرات با جرم $0.5g$ هستند.

۴.۳ تعبیر رصدی نتایج و مقایسه با آخرین نتایج رصدی

تفاوت بین اختلاف^{۱۵} سمتی چگالی بین قرص دارای گرداب و قرص با شکاف بیضی شکل وسیله‌ی مناسبی برای تشخیص آنها در مشاهدات است. همانطور که نتایج ما نشان می‌دهد اگر بخواهیم آنها را با توجه به تغییر مکان ساختار نامتقارن از یکدیگر تشخیص دهیم، باید به اندازه‌ی $(R_s/20AU)^{1/5} \times 50$ سال (که R_s مکان ساختار نامتقارن است) صبر کنیم که زمانی بسیار طولانی است. اما روش مناسب‌تر استفاده از اختلاف چگالی سمتی است. هنگامی که یک سیاره‌ی پرجرم شکافی در اطراف خود باز می‌کند، ذرات غبار در راستای شعاعی و در برآمدگی فشار لبه‌ی شکاف به دام می‌افتند (مثلاً [۶۹])، اما به دام افتادن در راستای سمتی فقط می‌تواند در حضور یک گرداب رخ دهد. ذرات در قرصی که دارای شکاف بیضی شکل است به دام نمی‌افتند بلکه به دلیل کاهش سرعت‌شان در قسمت اوج مدار، در یک "راهبندان"^{۱۶} گیر می‌کنند و در نتیجه چگالی در سمت اوج بیضی بیشتر می‌شود. چون ذرات در این منطقه به دام نمی‌افتند، اختلاف سمتی چگالی غبار با گاز برابر است که تصاویر ۱.۳.۳ و ۶.۳.۳ (ردیف پایین) نیز این مطلب را تأیید می‌کنند. اختلاف سمتی چگالی در الگوهای ما برای یک قرص با شکاف بیضی شکل می‌تواند حداکثر به $\Sigma/\Sigma_0 \sim 3$ برسد.

بر خلاف قرص با شکاف بیضی شکل، گرداب یک دام غبار حقیقی است و تا زمانی که شیب فشار مناسب برای باقی ماندن ناپایداری روزی مهیا باشد، گرداب می‌تواند در قرص بماند. طبق نتایج ما، این شرایط برای قرصی با سیاره‌ی پرجرم ($20M_{Jup} - 15$) و مقادیر معمولی وشکسانی ($\alpha = 10^{-4}$) [۵۵]^{۱۷} می‌تواند دست‌کم تا ۱۰۰۰ دور ($10^5 \sim$ سال) فراهم باشد. از طرف دیگر، اختلاف سمتی چگالی کوچکی در گاز که ناشی از یک دام غبار است می‌تواند اختلاف چگالی بسیار بزرگی را در غبار بوجود آورد [۹]. همانطور که در شکل ۶.۳.۳ دیده می‌شود، عدم تقارنی که در تصاویر میلی‌متری مشاهده می‌شود در قرص دارای گرداب بسیار بیشتر (تقریباً ۷۰ برابر) و فشرده‌تر از قرص دارای شکاف بیضی شکل است. از طرف دیگر، به دلیل تجمع ذرات غبار در گرداب، انتظار داریم ذرات داخل گرداب بزرگتر از ذرات بقیه‌ی نقاط قرص باشند. همچنین، ذرات کوچک‌تر در نتیجه‌ی هم‌زدگی ناشی از تلاطم می‌توانند به بیرون از گرداب راه پیدا کنند، در حالیکه این هم‌زدگی برای ذرات بزرگتر چندان مؤثر نیست. بنابراین،

^{۱۵}contrast^{۱۶}traffic jam

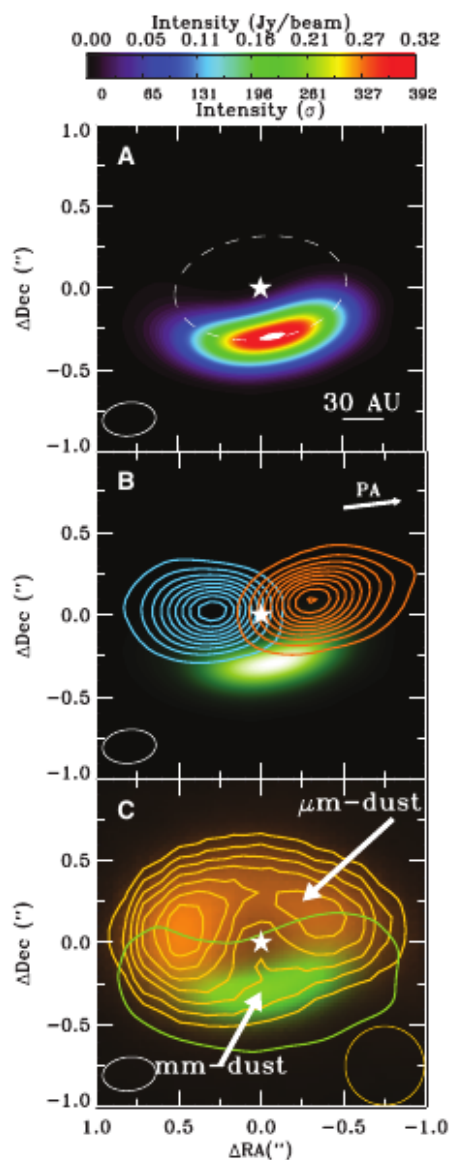
^{۱۷}طبق نتایج حاصل از مشاهدات، برای توزیع استاندارد غبار در قرص‌های پیش‌سیاره‌ای پارامتر وشکسانی $\alpha = 10^{-4}$ مقاداری معمول و قابل قبول است.

یک گرداب علاوه بر اینکه یک دام غبار و محل رشد آنهاست، مانند یک صافی نیز رفتار می‌کند. نتایج و بحث‌های فوق توسط مشاهدات بسیار تازه‌ی *فن در مارل* و همکارانش تأیید شده است [۸۳]. مشاهدات آنها با آلما در طول موج‌های 0.44 میلی‌متر پیوسته و خط گسیلی $5 - 6$ منوکسیدکربن از گذار قرص $IRS48$ تجمع نامتقارن ذرات غبار را در یک سوی حفره‌ی داخلی این قرص نشان می‌دهد. $IRS48$ ستاره‌ای از نوع A است که در فاصله‌ی 120 پارسیکی از ما قرار گرفته و مطالعات زیادی که تا کنون روی آن انجام شده حاکی از وجود حفره‌ای تا فاصله‌ی $50 AU$ از ستاره است. تصویر $1.4.3$ مشاهدات اخیر را بر روی این جرم نشان می‌دهد. دو نقشه‌ی بالایی به ترتیب توزیع نامتقارن غبارهای میلی‌متری در فاصله‌ی تقریباً $60 AU$ و حضور متقارن گاز را در حفره تا فاصله‌ی حدود $20 AU$ نشان می‌دهند. تصویر پایینی نیز ترکیب نقشه‌ی غبارهای میلی‌متری و میکرونی (که از مشاهدات قبلی گرفته شده است) را نشان می‌دهد. این نقشه در حقیقت بیانگر وجود دسته‌ای از غبارهای بزرگ در میان توزیعی متقارن از غبارهای کوچک است. نویسندگان این مقاله نشان داده‌اند که این توزیع نامتقارن غبار با استفاده حضور گرداب در قرصی با وشکسانی $\alpha = 10^{-4}$ که دارای سیاره‌ای به جرم $10 M_{Jup}$ در $20 AU$ است، قابل توضیح می‌باشد. این مشاهدات به عنوان مثالی از کاربرد نتایج ما است و باید منتظر نتایج رصدهای آینده برای آزمودن بیشتر این نتایج باشیم.

۵.۳ نکات کلیدی این فصل

- در قرص‌های دارای یک سیاره‌ی پر جرم (بیش از $5 M_{Jup}$)، شکاف بیضی‌شکل پدیده‌ای متداول است ولی گرداب بزرگ مقیاس ماندگار تنها می‌تواند در قرص‌های با وشکسانی معمولی ($\alpha = 10^{-4}$) رخ دهد،
- اختلاف سمتی چگالی غبار در قرص دارای گرداب بسیار زیاد (بیش از 70 برابر بین مرکز گرداب و نواحی خارج گرداب) و فشرده است،
- اختلاف سمتی چگالی غبار در قرص با شکاف بیضی‌شکل در حد گاز است (حدود 3 برابر بین فشرده‌ترین منطقه در اوج و نواحی واقع در حوضیض بیضی)،

- تفاوت بین اختلاف توزیع غبار در قرص‌های دارای گرداب و شکاف بیضی شکل می‌تواند به توضیح مشاهدات گذار قرص‌ها کمک نماید.



شکل ۳.۴.۳: A) تابش پیوسته در 44% میلی متر. خط سفید فاصله 65 AU از ستاره مرکزی را نشان می دهد. همانطور که این نقشه نشان می دهد توزیع غبار میلی متری بسیار نامتقارن و اختلاف شدت تابش بین مرکز توزیع و خارج از آن بیش از 300 برابر است. B) تابش خط $5 - 6$ میکروسیدکربن که حرکت کپلری متقارن گاز را در لبه ی حفره نشان می دهد. پیش زمینه، توزیع غبار میلی متری است. C) تابش پیوسته در $18/7$ میکرون که توسط با نارنجی و تابش 44% میلی متری با سبز نشان داده شده است. اندازه ی پرتو آلفا با رنگ سفید در گوشه ی سمت چپ و اندازه ی پرتو VISIR با رنگ نارنجی در گوشه سمت راست نشان داده است. (تصویر از [۸۳])

فصل ۴

گرداب و رشد سیاره

در فصل قبل نشان دادیم که گرداب‌های بزرگ مقیاس می‌توانند در لبه‌ی خارجی شکاف یک سیاره‌ی پرجرم تشکیل شوند، برای مدت طولانی باقی بمانند و به طور مؤثری غبار را به دام اندازند. کارهای متعددی که تا کنون بر روی نقش گرداب‌ها در رشد سیارات انجام شده است نشان می‌دهند که پیش‌سیارات می‌توانند در گرداب‌ها بوجود آیند و رشد کنند [۵، ۱۵، ۲۰، ۳۶، ۳۴]. در مقاله‌های دوقلوی [۴۷، ۴۸] امکان شکل‌گیری پیش‌سیارات به ترتیب در گرداب‌های تشکیل شده در لبه‌ی خارجی شکاف سیاره‌ای مشتری‌گون و گرداب‌های بوجود آمده در لبه‌ی ناحیه‌ی مرده مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج این مقالات نشان می‌دهد که ابرزمین‌هایی با جرم حدود ۲ برابر زمین می‌توانند در گرداب‌ها در اثر تجمع ماده بوجود آیند.

از طرف دیگر، گرداب‌ها مانند بسته‌هایی پرجرم در قرص هستند که می‌توانند بر سیارات موجود در قرص گشتاور وارد کنند. در مطالعه‌ای که روی اثر طول ملایمت^۱ بر مهاجرت سیارات انجام شد، مشاهده شد که برای طول ملایمت کوچک در پتانسیل سیاره، گرداب‌های کوچکی در منطقه‌ی هم‌چرخش شکل می‌گیرند که گشتاور قابل توجهی بر سیاره وارد می‌کنند [۳۹]. کارهای دیگری مانند [۴۴، ۹۱] نشان دادند که گشتاور گرداب‌های موجود در لبه‌ی خارجی شکاف یک سیاره‌ی پرجرم می‌تواند باعث مهاجرت برون‌سوی اندک سیاره شوند.

با در نظر گرفتن گرداب‌ها به عنوان مکان مناسبی برای شکل‌گیری و رشد پیش‌سیارات و همچنین عامل مؤثری در کاهش آهنگ مهاجرت سیارات، این سؤال بوجود می‌آید اگر پیش‌سیاره‌ای درون یک

^۱smoothing length

گرداب شکل بگیرد و به حد جرمی برسد که با مواد اطراف اندرکنش گرانشی را آغاز کند، آیا باز هم می‌تواند درون گرداب بماند و رشد کند تا زمانی که شکافی اطرافش بگشاید؟ آیا حرکت گردابی مواد درون یک گرداب می‌تواند تشکیل سیارات بسیار پرجرم را تضمین کند؟ این سؤال را می‌توان به طرز دیگری هم پرسید: فرض کنیم پیش‌سیاره‌ای در ناحیه‌ی خارجی قرص شکل گرفته (با هر سازوکاری) و به سوی گردابی مهاجرت می‌کند، آیا پیش‌سیاره می‌تواند به درون گرداب وارد شود و این کارخانه‌ی سیاره‌سازی را برهم زند؟ شاید هم وارد گرداب شده و رشدش را ادامه دهد؟ پاسخ به این سؤالات بسیار مهم است زیرا اگر سیاره بتواند گرداب را به هم بزند، سیاره‌سازی می‌تواند برای مدت طولانی (تا شکل‌گیری دوباره‌ی گرداب) متوقف شود. اما اگر سیاره نتواند وارد گرداب شود، کارخانه‌ی سیاره‌سازی دست نخورده باقی می‌ماند.

ما در این فصل تلاش می‌کنیم با انجام شبیه‌سازی‌های عددی با کد فارگو^۲ به این سؤالات پاسخ دهیم. ما در این کار از نسخه‌ی کارت‌گرافیکی فارگو مشهور به جی‌فارگو^۲ استفاده کردیم و ساختار داخلی کد را با توجه به نیازمان طوری تغییر دادیم که بتوانیم (۱) سیاره را در زمان دلخواه در قرص وارد کنیم، (۲) یک برآمدگی چگالی پایدار در قرص ایجاد کنیم و (۳) اختلالات مورد نیاز برای برانگیختگی ناپایداری روزبی را ایجاد نماییم.

۱.۴ روش و تنظیمات اولیه

بررسی اندرکنش گرانشی بین یک گرداب و یک پیش‌سیاره (یا سیاره‌ی کم جرم) در یک قرص با شرایط واقعی برای تشکیل گرداب بسیار مشکل است. به عنوان مثال رگالی و همکارانش اندرکنش یک سیاره با جرم ۱۰ برابر جرم زمین را با گردابی که در لبه‌ی یک ناحیه‌ی مرده تشکیل شده است مورد مطالعه قرار دادند [۷۳]. این مقاله نشان می‌دهد که تحلیل چنین سامانه‌ای و گشتاورهای وارد به سیاره به دلیل وابسته بودن تمامی اعضا از لحاظ گرانشی به یکدیگر و پایا نبودن سامانه بسیار دشوار است. در این کار جرم سیاره در محدوده‌ای قرار دارد که شکافی جزئی باز می‌کند و قادر نیست شکاف اطرافش را از مواد پاک کند و در نتیجه بسته به مکانی که در قرص قرار می‌گیرد می‌تواند مهاجرت نوع یک، دو و یا سه داشته باشد (برای اطلاعات بیشتر درباره‌ی انواع مهاجرت‌ها به مقاله‌ی مروری [۳۸] مراجعه کنید). از طرف دیگر گرداب نیز به دلیل افزایش مداوم جرم در ناحیه‌ی مرده در طول زمان شبیه‌سازی در حال تغییر است.

^۲GFARGO

این عوامل باعث پیچیدگی بررسی اندرکنش بین سیاره و گرداب می‌شود. برای ساده‌تر کردن موضوع و به دنبال آن تحلیل دقیق اندرکنش بین سیاره و گرداب، ما یک برآمدگی فشار مصنوعی در قرص ایجاد می‌کنیم به طوری که یک گرداب بتواند در آن شکل بگیرد و سپس اندرکنش آن را با سیاره مورد مطالعه قرار می‌دهیم. در چنین شرایطی، تمام عوامل محیط در کنترل ما هستند و می‌توانیم تأثیر تغییر هر عامل را به تنهایی در سامانه مشاهده کنیم. به این منظور، یک برآمدگی چگالی با نمایه‌ی گاوسی در یک قرص همدمای محلی قرار می‌دهیم و عرض، ارتفاع و موقعیت برآمدگی را در تمام شبیه‌سازی‌ها ثابت در نظر می‌گیریم. به دلیل اینکه قرص همدمای محلی است، نمایه‌های چگالی و فشار با یکدیگر متناسبند و در نتیجه برآمدگی چگالی متناظر با برآمدگی فشار است. برای اینکه برآمدگی با زمان از بین نرود و قرص از لحاظ آهنگ وشکسانی در حال تعادل باشد، نمایه‌ی وشکسانی را نیز در برآمدگی متناسب با نمایه‌ی چگالی تغییر می‌دهیم. نمایه‌های چگالی و وشکسانی به کار رفته به صورت زیر هستند

$$\Sigma(r) = \Sigma_{BG}(r) \left(1 + a \exp \left(-\frac{(r-r_0)^2}{2c^2} \right) \right) \quad (1.1.4)$$

$$\nu = \frac{\nu_{BG}}{1 + a \exp \left(-\frac{(r-r_0)^2}{2c^2} \right)} \quad (2.1.4)$$

که Σ_{BG} و ν_{BG} به ترتیب چگالی سطحی و وشکسانی زمینه قرص هستند. a ارتفاع برآمدگی است و مقدار افزایش چگالی (یا متناظر با آن کاهش وشکسانی) را در قله‌ی برآمدگی تعیین می‌کند. r_0 مکان قله برآمدگی است و به عنوان مقیاس طول در الگوهایمان در نظر گرفته شده است و c نیز پهنای برآمدگی را کنترل می‌کند. در تمام الگوهای این فصل a برابر ۱ و $h = 0.05$ در نظر گرفته شده که $h = 0.05$ است.

ما برای تحریک گاز و تشکیل گرداب از دو روش ایجاد اختلال در شبیه‌سازی‌هایمان کمک گرفتیم. در شبیه‌سازی‌هایی که سیاره از ابتدا در قرص وجود دارد، اختلال مورد نیاز توسط اثر گرانشی سیاره ایجاد می‌شود. در مواردی که نیاز داشتیم سیاره را پس از تشکیل گرداب در قرص قرار دهیم، اختلال‌ها را با اضافه کردن اغتشاشات سینوسی در سرعت شعاعی گاز موجود در برآمدگی بوجود آوردیم. برای این کار، مشابه با روش استفاده شده در [۵۳]، اختلالی با نمایه‌ی

$$v_{pert} = 10^{-4} \sin(\theta) \exp \left(-\frac{(r-r_0)^2}{2c^2} \right) \quad (3.1.4)$$

به سرعت شعاعی، پس از رسیدن چگالی سطحی و سرعت‌ها به حالتی پایدار (حدود ۱۰۰ زمان مداری در r_0)، اضافه کردیم.

ما یک الگو را به عنوان الگوی اصلی در نظر می‌گیریم و بقیه را با آن مقایسه می‌کنیم. قرص در الگوی اصلی دارای چگالی سطحی زمینه‌ی ثابت $\Sigma_{BG} = 10^{-4} [M_{\star}/r_0^2]$ و وشکسانی سینماتیکی زمینه‌ی $\nu_{BG} = 10^{-5} [r_0^2 \Omega_k(r_0)]$ است. برای جلوگیری از بروز تکینگی در محاسبات، پتانسیل سیاره را با پارامتر $\epsilon = 0.06 H(r_0)$ به صورت زیر

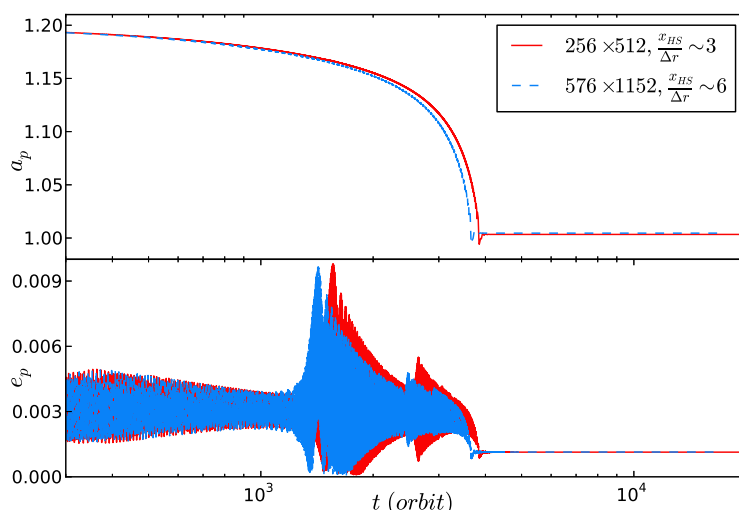
$$\Phi = \frac{GM_p}{\sqrt{r^2 + \epsilon^2}} \quad (4.1.4)$$

ملایم کردیم که $M_p = 5 \times 10^{-6} M_{\star}$ است. پتانسیل قرص به آهستگی در طی ۱۰ زمان مداری به قرص معرفی می‌شود تا از بروز امواج ناگهانی در قرص جلوگیری شود. گستره‌ی شعاعی قرص از $0.5r_0$ تا $1.5r_0$ است. ما از تنها شرط مرزی موجود در جی‌فارگو که شرط میراکننده‌ی امواج است برای هر دو مرز استفاده کردیم. در این شرط مرزی، دامنه‌ی امواج رسیده به مرزها در طول چند سلول میرا می‌شود [۲۱]. این شرط مرزی اگر چه به خوبی شرط نابازتاب‌کننده امواج را خنثی نمی‌کند، اما برای الگوهای ما که از سیارات کم جرم استفاده می‌کنیم مناسب است. ما شبیه‌سازی‌ها را تا زمانی که سیاره بیش از ۱۰۰۰ سال به دام افتاده باشد و یا کاملاً به مرز داخلی رسیده باشد ادامه می‌دهیم.

تقسیم‌بندی‌های قرص را در راستای شعاعی لگاریتمی و در راستای سمتی مساوی در نظر گرفتیم. برای بهینه کردن دقت و زمان شبیه‌سازی‌ها، ما الگوی اصلی را یکبار با تفکیک $N_r \times N_s = 256 \times 512^3$ و یکبار با تفکیک $N_r \times N_s = 576 \times 1152$ انجام دادیم. معیار انتخاب این مقادیر نسبت نیم‌پهنای ناحیه‌ی هم‌چرخش به ابعاد سلول‌ها در برآمدگی است. اگر این نسبت را با استفاده از رابطه‌ی ۴۴ موجود در [۶۵] محاسبه کنیم، این نسبت در الگوی با تفکیک پایین‌تر تقریباً برابر با ۳ و در الگوی با تفکیک بالاتر برابر با ۶ است. این نسبت در دقت محاسبه‌ی گشتاور هم‌چرخش تأثیر می‌گذارد (مثلاً [۶۵]). شکل ۱.۱.۴ تحول کمیت‌های مداری سیاره را در این دو الگو مقایسه می‌کند. تابلوی بالایی این شکل نشان می‌دهد که اگرچه آهنگ مهاجرت در این دو الگو متفاوت است اما به دام افتادن سیاره تحت تأثیر تفکیک قرار نمی‌گیرد. به همین دلیل ما از تفکیک پایین‌تر در تمام شبیه‌سازی‌ها استفاده می‌کنیم تا در کنار داشتن دقت کافی در مکان به دام افتادن سیاره، در زمان هم صرفه‌جویی کنیم.

مقادیر فیزیکی که تغییر می‌دهیم عبارتند از وشکسانی و چگالی زمینه (که بر جرم و شکل گرداب تأثیر می‌گذارند)، جرم و موقعیت‌های مختلف برای سیاره. وشکسانی زمینه را بین مقادیر 10^{-5} ، 10^{-6} و 10^{-7} تغییر می‌دهیم. برای چگالی زمینه نیز علاوه بر مقدار 10^{-4} که در الگوی اصلی انتخاب کردیم،

^۳resolution



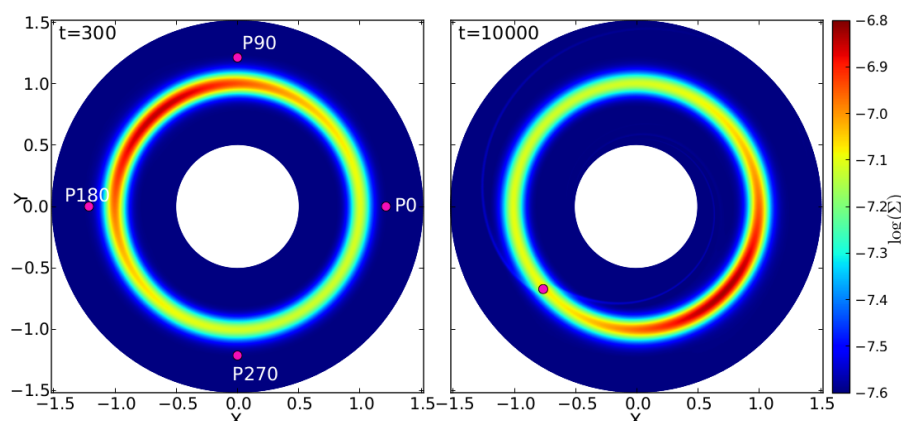
شکل ۱.۱.۴: مقایسه‌ی تحول نیم‌محور بزرگ (بالا) و خروج از مرکز (پایین) سیاره با جرم $M_p = 5 \times 10^{-6} M_*$ در دو الگوی با تفکیک $N_r \times N_s = 256 \times 512$ و $N_r \times N_s = 576 \times 1152$. در حالیکه به دام افتادن سیاره تحت تأثیر تفکیک قرار نمی‌گیرد، آهنگ مهاجرت برای دو الگو اندکی متفاوت است.

مقادیر 10^{-5} و 10^{-3} را می‌آزماییم. از آنجا که هدف ما بررسی ماندن پیش‌سیارات در داخل گرداب است، ما الگوهایی با سیاراتی با جرم کمتر 1×10^{-6} و 5×10^{-7} را نیز امتحان کردیم. چون فرض می‌کنیم این پیش‌سیارات در گرداب شکل گرفته‌اند، مکان اولیه‌ی آنها را در این الگوها در میان گرداب انتخاب کردیم. در این الگوها گستره‌ی شعاعی قرص را طوری تغییر دادیم که نسبت نیم‌پهنای ناحیه‌ی هم‌چرخش به ابعاد سلول‌ها در برآمدگی برابر با ۳ بماند. برای اینکه ببینیم آیا موقعیت به دام افتادن سیاره به مکان اولیه‌ی آن بستگی دارد، الگوی اصلی را با موقعیت‌های مختلف سیاره نسبت به گرداب نیز تکرار کرده‌ایم.

۲.۴ نتایج الگوی اصلی

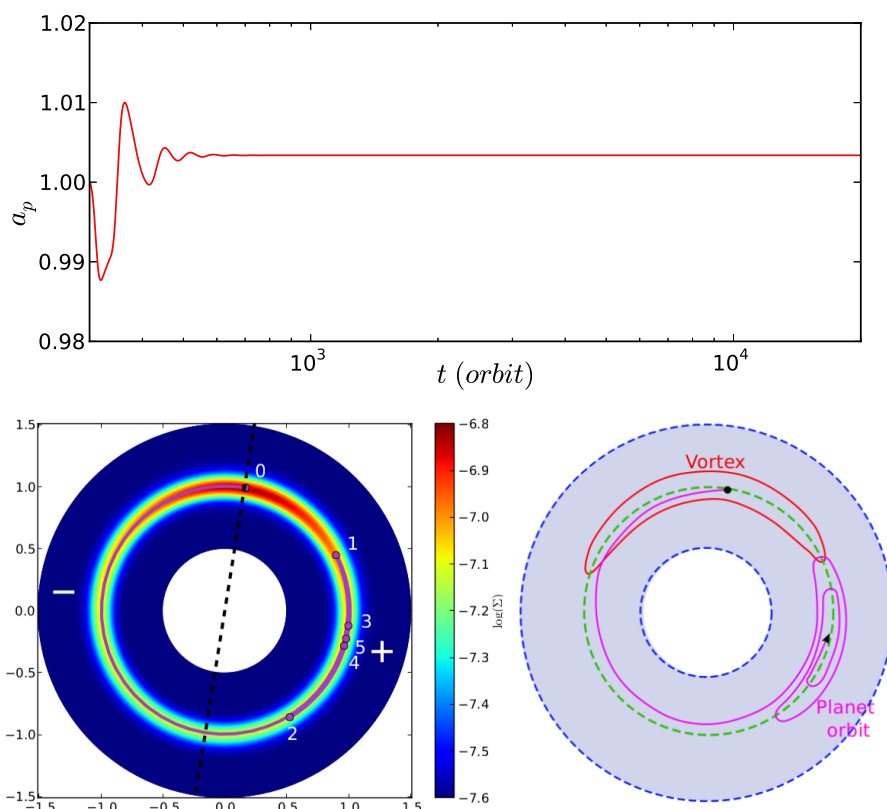
خط ممتد در تابلوی بالایی شکل ۱.۱.۴ مهاجرت سیاره را در الگوی اصلی نشان می‌دهد. سیاره در این شبیه‌سازی در موقعیت اولیه $r = 1/2$ قرار داشته و در طی زمان به سوی قسمت داخلی قرص حرکت

می‌کند. مهاجرت سیاره با نزدیک شدن آن به دیواره‌ی خارجی برآمدگی به دلیل افزایش چگالی سطحی، سریع‌تر می‌شود ولی تقریباً در ۳۰۰۰ زمان مداری متوقف می‌شود. از این زمان به بعد، سیاره در برآمدگی به دام می‌افتد. نکته‌ی قابل توجه این است که سیاره نه تنها به دام می‌افتد بلکه به یکی از دُم‌های گرداب قفل می‌شود و هرگز وارد گرداب نمی‌شود. ما برای اطمینان از وابسته نبودن این نتیجه‌ی جالب به شرایط اولیه، سیاره را در موقعیت‌های متفاوت نسبت به گرداب قرار دادیم. برای این کار، ابتدا گرداب را در قرص با روش اغتشاشات سینوسی تشکیل دادیم و سپس سیاره را در زاویه‌های سمتی ۰، ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه قرار دادیم. تمام این چهار شبیه‌سازی به نتیجه‌ی واحدی ختم شد. سیاره در تمام آنها به دام می‌افتد و به گرداب قفل می‌شود (شکل ۱۰.۲.۴).



شکل ۱۰.۲.۴: سیاره‌هایی با مکان اولیه‌ی متفاوت نسبت به گرداب، سرانجام در یک موقعیت به گرداب قفل می‌شوند. تابلوی سمت چپ، مکان‌های اولیه سیارات و تابلوی سمت راست، مکان سیاره را پس از قفل شدن به گرداب نشان می‌دهد.

قفل شدن سیاره به گرداب این سؤال را بوجود می‌آورد که آیا حرکت مواد در گرداب می‌تواند سیاره را در داخل گرداب نگه دارد، یا باز هم سیاره تمایل به قفل شدن به دُم گرداب را دارد؟ به همین منظور سیاره را به جای قرار دادن در قسمت خارجی قرص، در داخل گرداب قرار می‌دهیم. شکل ۲.۲.۴ نتیجه‌ی این شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. سیاره ابتدا از گرداب خارج می‌شود و پس از تعدادی نوسان در فاصله‌ی ثابتی از گرداب به آن قفل می‌شود. بنابراین سیاره‌ای که در گرداب به اندازه‌ی کافی پرچم می‌شود، در اثر اندرکنش گرانشی با قرص از آن خارج می‌شود و هرگز به گرداب باز نمی‌گردد.

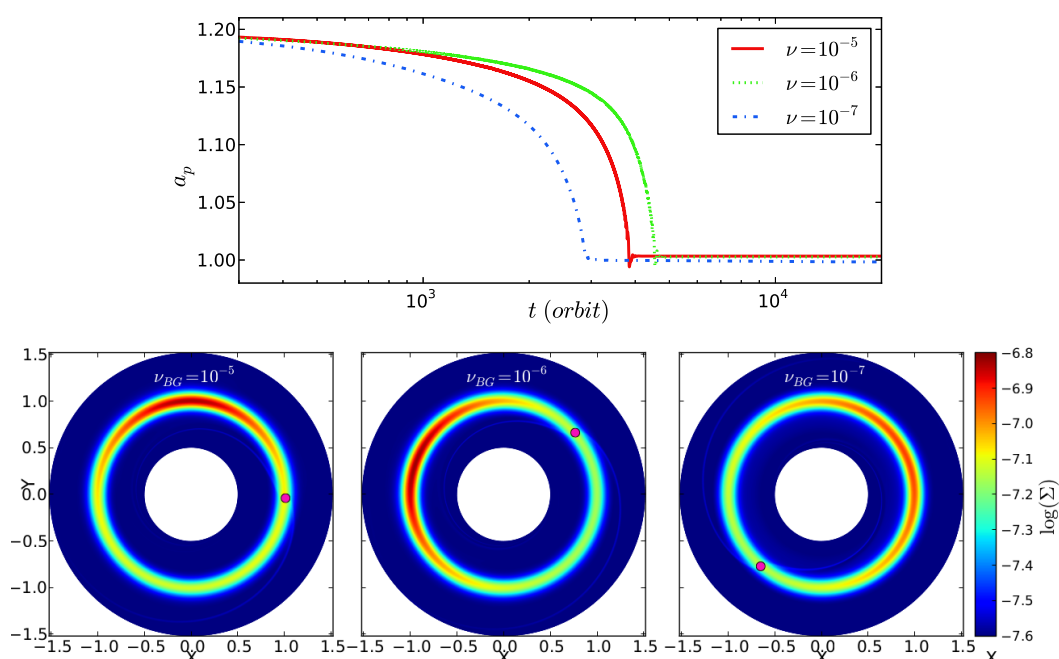


شکل ۲.۲.۴: مهاجرت سیاره‌ای که در درون گرداب شکل گرفته است. تابلوی بالایی تغییر نیم‌محور بزرگ سیاره را با زمان نشان می‌دهد. سیاره ابتدا به سمت داخل و سپس به سمت خارج مهاجرت می‌کند و پس از چندین نوسان در یک فاصله‌ی ثابت به دام می‌افتد. تابلوی پایینی سمت چپ، رفتار سیاره را در دو بُعد در دستگاه متصل به گرداب نشان می‌دهد. اعداد، موقعیت‌هایی است که سیاره در آنها جهت حرکت سمتی‌اش را پس از خارج شدن از گرداب عوض می‌کند. برای واضح‌تر شدن این حرکت، آن را در طرح‌واره‌ی سمت راست نشان داده‌ایم. در نشان دادن جابه‌جایی شعاعی در این طرح‌واره اغراق شده است تا دنبال کردن حرکت سیاره آسان‌تر باشد. علامت مثبت و منفی در تابلو سمت چپ، نشان‌دهنده‌ی علامت گشتاور وارد بر سیاره از طرف گرداب است.

۳.۴ مطالعه‌ی مقداری

شکل ۱.۳.۴ نتایج شبیه‌سازی‌ها را برای الگوهای با مقادیر وشکسانی مختلف نشان می‌دهد. در تابلوی بالایی این شکل، تغییر نیم‌محور بزرگ سیاره برحسب زمان رسم شده است. اگر چه آهنگ مهاجرت در

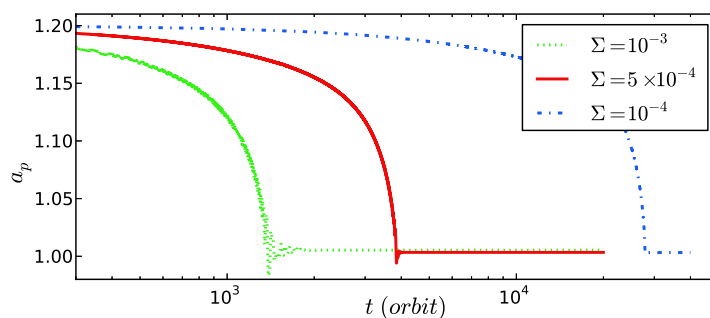
الگوهای مختلف متفاوت است اما مکان به دام افتادن سیاره در تمامی آنها تقریباً یکسان است. آهنگ متفاوت مهاجرت به این دلیل است که در وشکسانی‌های مختلف، بزرگی گشتاور هم‌چرخش متفاوت است. توضیح بیشتر این مطلب به اشباع گشتاور هم‌چرخش برمی‌گردد که در محدوده‌ی این پایان‌نامه نمی‌گنجد و افراد علاقه‌مند می‌توانند به مقالات مرتبط مانند [۳۸] مراجعه کنند. ردیف پایینی شکل ۳.۴ ۱. نشان می‌دهد که کشیدگی گرداب با کاهش وشکسانی بیشتر می‌شود ولی سیاره مشابه با الگوی اصلی به یکی از دُم‌های گرداب قفل شده است.



شکل ۳.۴: مهاجرت سیاره در قرص‌های با وشکسانی متفاوت. تابلوی بالایی تحول نیم‌محور بزرگ سیاره و تابلوهای پایینی مکان قفل شدن سیاره به گرداب را نشان می‌دهند.

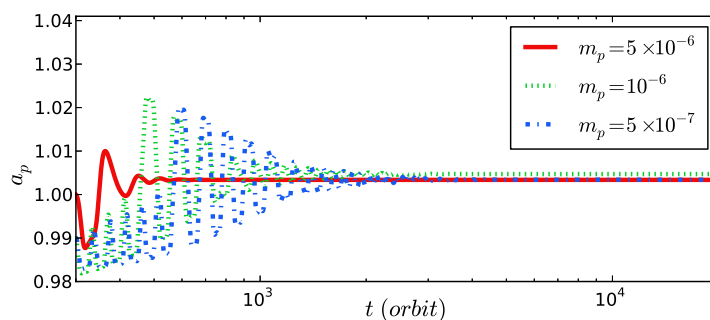
چگالی زمینه یکی دیگر از مقادیری است که مطالعه کردیم و با تغییر جرم داخل گرداب می‌تواند بر نتایج تأثیر بگذارد. شکل ۳.۴.۲ نشان می‌دهد که در قرص با چگالی زمینه بیشتر، مهاجرت سیاره سریع‌تر و اندرکنش سیاره نیز با گرداب شدیدتر است. دامنه‌ی نوسانات نیم‌محور بزرگ سیاره قبل از به دام افتادن این مطلب را نشان می‌دهد. اما باز هم سیاره در موقعیت یکسانی با الگوی اصلی به دام می‌افتد. در الگوی با چگالی زمینه کمتر، مهاجرت سیاره بسیار کند است و زمان به دام افتادن آن بسیار طولانی‌تر از بقیه

است.



شکل ۲.۳.۴: مهاجرت سیاره در قرص‌های با چگالی زمینه‌ی متفاوت.

جرم سیاره یکی از مقادیری است که بررسی آن بسیار مهم می‌باشد چون می‌توانیم برآوردی از جرم پیش‌سیاراتی که نمی‌توانند داخل گرداب باقی بمانند داشته باشیم. شکل ۳.۳.۴ نشان می‌دهد که حتی سیاراتی با جرم ده برابر کمتر از الگوی اصلی نیز از گرداب بیرون می‌آیند و سیارات پر جرم نمی‌توانند درون گرداب‌ها شکل بگیرند.



شکل ۳.۳.۴: اندرکنش سیارات کم جرم با گرداب.

۴.۴ تحلیل گشتاورهای وارد بر سیاره

برای توضیح رفتار سیارات در قسمت قبل نیاز به دانستن منشأ گشتاورهای وارد بر سیارات داریم. به دلیل اینکه رفتار سیارات در تمام موارد شبیه هم هستند، یکی از الگوها را انتخاب می‌کنیم و گشتاورهای آن را تحلیل می‌کنیم. بقیه‌ی الگوها را نیز مانند این الگو می‌توان توضیح داد.

ما الگوی با وشکسانی $\nu = 10^{-6}$ را انتخاب کردیم و به دلیل سادگی محاسبات، آن را در دستگاه هم‌چرخش متصل به سیاره تکرار کردیم. در کد فارگو، مرکز مختصات همواره بر ستاره منطبق است و در نتیجه جملات غیرمستقیمی ناشی از جابه‌جایی مرکز جرم از مرکز مختصات در معادلات وارد می‌شوند. متأسفانه در خروجی کد فارگو که گشتاور وارد بر سیاره در آن ثبت می‌شود، تنها گشتاور وارد از طرف قرص محاسبه و ثبت می‌شود. در حالیکه اگر فاصله‌ی بین مرکز جرم و ستاره زیاد باشد، گشتاور ستاره بر سیاره به دلیل جرم زیاد ستاره‌ی مرکزی قابل توجه خواهد بود. این جمله در خروجی کد فارگو ثبت نمی‌شود و باید جداگانه محاسبه گردد. به دلیل اینکه محاسبه‌ی این جمله در دستگاه هم‌چرخش متصل به سیاره آسان‌تر و در نتیجه از لحاظ عددی ارزانتر است، ما شبیه‌سازی مورد نظرمان را دوباره در دستگاه هم‌چرخش انجام دادیم و گشتاور ستاره را نیز محاسبه نمودیم.

برای محاسبه‌ی گشتاور ناشی از ستاره، ابتدا مختصات مرکز جرم را در هر زمان t پیدا می‌کنیم. با انتخاب دستگاه هم‌چرخش، مختصات سیاره همیشه به صورت $(0, r_p)$ است که r_p فاصله‌ی سیاره از مبدأ مختصات است. اگر مختصات مرکز جرم (x_{bc}, y_{bc}) باشد، گشتاور ویژه‌ی (در واحد جرم) ستاره بر سیاره عبارتست از

$$\Gamma_{\star} = -\frac{GM_{\star}}{r_p^3} y_{bc} r_p = -\frac{GM_{\star}}{r_p^2} y_{bc} \quad (1.4.4)$$

که y_{bc} از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$y_{bc} = \sum_{i,j=0}^{N_r-1, N_s-1} \frac{\Sigma_{ij} A_{ij} y_{ij}}{M_{\star} + M_p + M_{disc}} \quad (2.4.4)$$

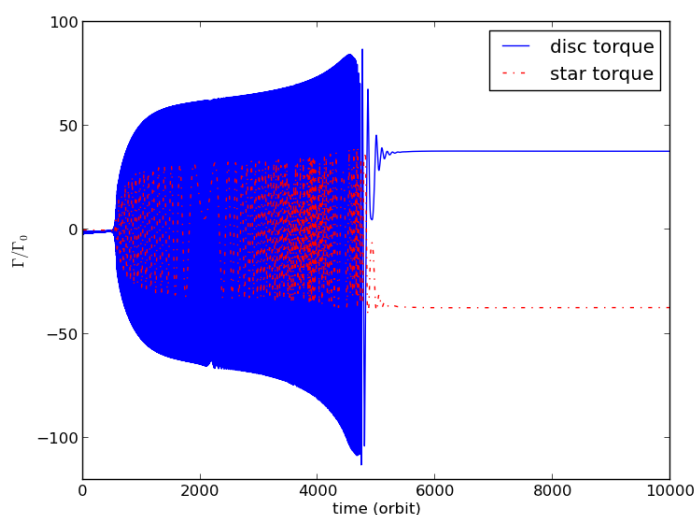
که A_{ij} مساحت سلول (i, j) است.

برای سادگی و نگران نبودن درباره‌ی تبدیل واحد معمولاً گشتاورها را با استفاده از Γ_0 که به صورت

$$\Gamma_0 = \left(\frac{q}{h}\right)^2 \Sigma(a_p) a_p^4 \Omega_k^2(a_p) \quad (3.4.4)$$

تعریف می‌شود، بدون بعد می‌کنند [۶۵]. در این رابطه q نسبت جرم سیاره به ستاره‌ی مرکزی، $\Sigma(a_p)$ و $\Omega_k(a_p)$ به ترتیب چگالی سطحی و سرعت زاویه‌ای کپلری در محل سیاره هستند. در تصویر ۱.۴.۴

گشتاور وارد بر سیاره از طرف قرص و ستاره به طور جداگانه نمایش داده شده است. این تصویر نشان می‌دهد که پس از شکل‌گیری گرداب، هم گشتاور قرص و هم گشتاور ستاره بسیار زیاد می‌شوند. به دلیل حضور گرداب، فاصله‌ی مرکز جرم از ستاره زیاد می‌شود و ستاره گشتاور قابل توجهی به سیاره وارد می‌کند که با گشتاور ناشی از گرداب خنثی می‌گردد و سیاره به دام می‌افتد. این امر نشان می‌دهد هم حضور گرداب و هم گشتاور ستاره عوامل مهمی در به دام انداختن سیاره هستند.



شکل ۱.۴.۴: گشتاور وارد بر سیاره از طرف قرص و ستاره. محور عمودی گشتاور بدون بُعد شده و محور افقی زمان را نشان می‌دهد.

گشتاورهایی که از سوی قرص بر سیاره وارد می‌شود را می‌توان در چهار دسته جای داد: گشتاور لیندبلاد، گشتاور گرداب، گشتاور هم‌چرخش و گشتاور ناشی از توزیع نامتقارن چگالی در راستای سمتی در اطراف سیاره. شکل ۱.۴.۴ نشان می‌دهد گشتاور وارد بر سیاره از سوی قرص پس از به دام افتادن سیاره $\frac{\Gamma}{\Gamma_0} \sim 33$ است. هنوز رابطه‌ی دقیقی برای محاسبه‌ی گشتاور لیندبلاد برای سیارات واقع در برآمدگی‌های فشار وجود ندارد، اما چون سیاره تقریباً در مرکز برآمدگی به دام افتاده است و نمایه‌ی سرعت زاویه‌ای در دو سوی مدار سیاره تقریباً متقارن است می‌توان نتیجه گرفت که گشتاور لیندبلاد سهم مهمی در گشتاورهای قرص ندارد.

برای محاسبه‌ی گشتاور گرداب Γ_v ، یکبار دیگر این الگو را با سیاره‌ای ثابت در محل به دام افتادن

سیاره تکرار کردیم. سپس چگالی سطحی نهایی را از چگالی سطحی اولین خروجی در $t = 20$ زمان مداری کم کردیم. با این کار، فقط افزایش چگالی ناشی از شکل‌گیری گرداب در قرص باقی می‌ماند و می‌توانیم گشتاور گرانشی گرداب بر سیاره را از رابطه‌ی زیر محاسبه کنیم

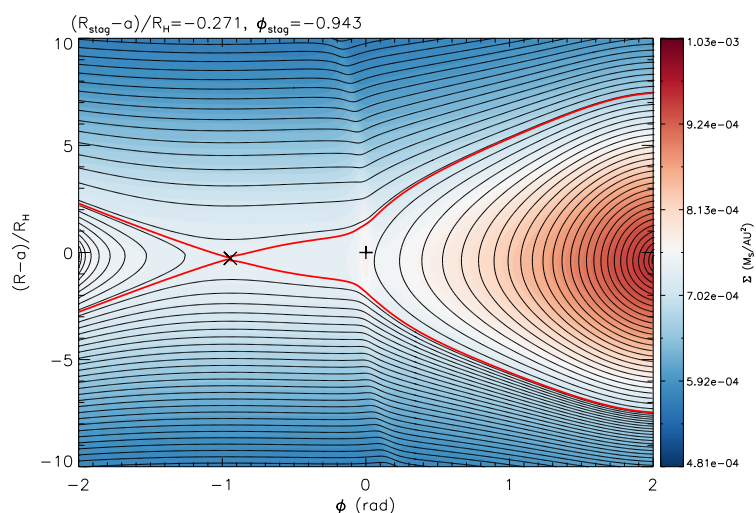
$$\Gamma_{disc} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^N \frac{A_{ij} \Sigma_{ij} y_{ij}}{d_{ij} + \epsilon} a_p. \quad (4.4.4)$$

در این رابطه، r_{i1} و r_{i2} به ترتیب شعاع‌های داخلی و خارجی هستند که گستره‌ی شعاعی گرداب در آن قرار گرفته است. جمع در راستای سمتی نیز از محل سیاره که نزدیک به یکی از دُم‌های گرداب است تا ϕ_{j2} که گرداب به انتها می‌رسد انجام می‌شود. y_{ij} مختصه‌ی عمودی سلول (i, j) و d_{ij} فاصله‌ی سلول از سیاره است. با استفاده از این روش گشتاور گرداب برابر $6 \sim \frac{\Gamma_p}{\Gamma_0}$ می‌شود.

اگر گشتاور گرداب را از گشتاور قرص کم کنیم، باقیمانده مربوط به گشتاور هم‌چرخش Γ_c و گشتاور ناشی از عدم‌تقارن چگالی سطحی Γ_a است یعنی $27 \sim \frac{\Gamma_c + \Gamma_a}{\Gamma_0}$. به عبارت دیگر سهم عمده‌ی گشتاور وارد بر سیاره از طرف قرص ناشی از این دو جمله است. شکل ۲۰.۴.۴ که ناحیه‌ی هم‌چرخش و مسیرهای نعل‌اسبی را در اطراف سیاره نشان می‌دهد این نکته را تأیید می‌کند. با توجه به افزایش پهنای ناحیه‌ی هم‌چرخش در سمت نزدیک به گرداب در مقایسه با سمت دیگر، گشتاور ناحیه‌ی هم‌چرخش می‌تواند بسیار بزرگ و مثبت شود. از طرف دیگر نامتقارنی قابل توجهی در چگالی سطحی اطراف سیاره در راستای سمتی وجود دارد که باعث می‌شود گشتاور گرانشی از سمت با چگالی بیشتر، بسیار بزرگتر از گشتاور سمت با چگالی کمتر باشد. این توزیع نیز گشتاور مثبت بوجود می‌آورد و می‌تواند در گشتاور قرص سهم داشته باشد. جدا کردن این دو گشتاور تقریباً غیر ممکن است زیرا چگالی نامتقارن در درون ناحیه‌ی هم‌چرخش است و قسمتی از آن محسوب می‌شود.

سهم عمده‌ی Γ_c و Γ_a قفل شدن سیاره را به دُم گرداب توضیح می‌دهد. بهترین مکان برای به دام افتادن سیاره نزدیک دُم‌های گرداب است زیرا هم تغییر شکل ناحیه‌ی هم‌چرخش و هم عدم تقارن چگالی در این نواحی می‌توانند گشتاور بزرگ ستاره را خنثی کنند. علاوه بر این دو ناحیه، نقطه‌ی مقابل مرکز گرداب نیز می‌تواند دارای گشتاور صفر باشد اما به دام افتادن سیاره در این نقطه بسیار ناپایدار است و با اندکی جابه‌جایی سیاره در راستای سمتی و خارج شدن مرکز جرم از خط اتصال سیاره-مرکز گرداب، گشتاور بزرگی از سوی ستاره به سیاره وارد می‌شود.

مشابه با توضیحاتی که در این قسمت داده شد می‌توان دیگر الگوها را نیز تحلیل کرد.



شکل ۴.۴: ناحیه‌ی هم‌چرخش و مسیرهای نعل اسبی اطراف سیاره. خط پررنگ، جدا کننده‌ی ناحیه‌ی هم‌چرخش از قسمت‌های دیگر قرص است. محور افقی زاویه‌ی سمتی و محور عمودی فاصله تا سیاره را نشان می‌دهد که به شعاع هیل سیاره R_H مقیاس شده است (این امر بیشتر یک سنت در مقاله‌های مرتبط با تحلیل گشتاورهاست و به همین دلیل ما نیز رعایت کردیم). ستاره در سمت پایین شکل قرار می‌گیرد. R مختصه‌ی شعاعی و a موقعیت سیاره است. علامت $+$ محل سیاره و $\times$ نقطه‌ی ایستایی را نشان می‌دهد. در سمت چپ بالا موقعیت نقطه‌ی ایستایی داده شده است (نقطه‌ی ایستایی محل تقاطع خطوط جریان است).

۵.۴ اهمیت این نتایج در تشکیل سیارات

نتایج ما نشان می‌دهد که اگر سیاره‌ای در درون یک گرداب به اندازه‌ی کافی رشد کند که بتواند با قرص وارد اندرکنش گرانشی شود، گشتاورهای ناشی از قرص آن را از گرداب خارج می‌کنند. سیاره پس از خارج شدن هرگز به گرداب وارد نمی‌شود و به یکی از دُم‌های گرداب قفل می‌گردد. خروج سیارات کم‌جرم از گرداب مانع رشد و تبدیل شدن آنها به غول‌های گازی می‌گردد. اگر چه نتایج ما یکی از فرضیه‌های شکل‌گیری سیارات غول را از بین می‌برد اما در عوض روشی مناسب برای شکل‌گیری سامانه‌های سیاره‌ای ارائه می‌کند. با خروج سیارات، گرداب می‌تواند نقشش را به عنوان کارخانه‌ی تولید کننده‌ی سیارات کم‌جرم ادامه دهد.

قسمت دیگری از نتایج ما نشان می‌دهد که گرداب‌های پایدار می‌توانند سدی در برابر مهاجرت نوع ۱ سیارات کم‌جرم محسوب شوند. در صورتیکه سیاراتی در نواحی خارجی قرص شکل گرفته باشند و

سر راهشان با یک گرداب پایدار مواجه شوند، به دام می‌افتند و از سقوط بر روی ستاره‌ی مرکزی نجات پیدا می‌کنند.

لازم به ذکر است که ما الگوی ساده‌شده‌ای را در نظر گرفتیم تا بتوانیم رفتار سیاره و گشتاورهای وارد بر آن را تحلیل کنیم. در الگوهای واقعی‌تر گرداب نیز می‌تواند با توجه به شرایط قرص مهاجرت کند [۶۶]، حرکت کند [۷۳] و یا حتی از بین برود [۵۲]. بنابراین بررسی تأثیر سیاره بر پایداری گرداب موضوعی بسیار مهم است که باید در کارهای آینده به آن پرداخته شود.

۶.۴ نکات کلیدی این فصل

- سیارات کم جرمی که در درون گرداب‌ها شکل می‌گیرند در اثر اندرکنش گرانشی با قرص از آن بیرون می‌آیند و امکان رشد بیشتر ندارند،
- این اتفاق حتی برای سیاراتی با جرم کم $M_p = 5 \times 10^{-7} M_*$ هم می‌افتد،
- سیاره از گرداب بیرون می‌آید و هرگز به درون آن باز نمی‌گردد،
- اگر چه خروج سیاره از گرداب مانع رشد آن می‌شود اما امکان شکل‌گیری سیارات دیگر را در گرداب به وجود می‌آورد.

فصل ۵

حرف آخر

۱.۵ خلاصه و نتایج

اگرچه ایده‌ی اصلی تشکیل منظومه‌ی شمسی از یک ابر اولیه به سال ۱۹۷۶ برمی‌گردد اما تا اواخر قرن بیستم هنوز شواهد رصدی مستقیمی از این قرص‌ها وجود نداشت. با پیشرفت ابزار و فراهم شدن امکان رصدهای دقیق‌تر در طول موج‌های بلند (فروسرخ و میلی‌متری) قرص‌های پیش‌سیاره‌ای مشاهده شدند و هر روز معماهای جدیدی را برای دانشمندان بوجود می‌آورند. یکی از این موضوعات جالب که توجه زیادی را به سوی خود جلب کرده است "گذار قرص"ها است، قرص‌های پیش‌سیاره‌ای که حفره‌ای غباری در ناحیه‌ی داخلی قرص دارند. تصور می‌شود این اجرام در مرحله‌ای از قرص‌های پیش‌سیاره‌ای هستند که قرص از مرحله‌ی گاز-غالب به قرص نخاله تبدیل می‌شود اما هنوز نظریه‌ی قطعی در این باره وجود ندارد. آنچه توجه بیشتری را در سال‌های اخیر به این اجرام جلب کرده است، وجود ساختارهای نامتقارن در لبه‌ی خارجی حفره‌ی این قرص‌ها است. گاهی این عدم تقارن‌ها به صورت توزیع‌های نعل اسبی از غبار هستند در حالیکه چنین ساختار نامتقارنی هنوز در توزیع گاز در این اجرام مشاهده نشده است.

در فصل ۲ به توضیح سازوکارهایی که می‌توانند گذار قرص‌ها را شکل دهند پرداختیم. از میان سه سازوکار مطرح تبخیر نوری، شکاف یک سیاره‌ی پرجرم و رشد غبار، تنها سازوکاری که هم می‌تواند شکاف را تشکیل دهد و هم ساختاری نامتقارن در قرص ایجاد کند حضور سیاره‌ای پرجرم است. یک

سیاره‌ی پرجرم می‌تواند از دو طریق نامتقارنی در لبه‌ی خارجی شکافش ایجاد کند: بوجود آوردن گرداب و بیضی کردن لبه‌ی خارجی شکاف. مطالعات انجام شده تا کنون نشان می‌دهد که هر دو نامتقارنی در شرایط مشابه می‌توانند رخ دهند. هر دو برای تشکیل شدن نیاز به سیاره‌ای به اندازه‌ی کافی پرجرم و قرصی با وشکسانی پایین دارند. اما این دو ساختار نامتقارن گازی می‌توانند تفاوتی اساسی در ساختار قرص غباری ایجاد کنند. این موضوعی است که ما آزمایش کردیم و نتایج آن را در فصل ۳ آوردیم. ما تشکیل ساختارهای نامتقارن ناشی از یک سیاره را برای قرص‌هایی با وشکسانی‌های متفاوت ($\alpha = 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}$) و سیاراتی با جرم‌های مختلف ($M_p = 5, 10, 15, 20 M_{Jup}$) مورد مطالعه قرار دادیم. نتایج شبیه‌سازی‌های ما نشان می‌دهد در حالیکه بیضی شدن لبه‌ی خارجی شکاف اطراف سیاره امری متداول است، گرداب‌های بزرگ‌مقیاس فقط در قرص‌های با وشکسانی معمولی $\alpha = 10^{-4}$ می‌توانند برای مدت طولانی باقی بمانند. شبیه‌سازی‌های غبار ما معیاری را به رصدگران ارائه می‌دهد که برای تفسیر نتایج مشاهداتشان می‌توانند از آن استفاده کنند. بنابر نتایج ما در صورتیکه اختلاف سمتی چگالی غبار در حلقه‌ی غباری گذار قرص‌های نامتقارن بسیار زیاد (بیش از ۷۰ برابر) و فشرده باشد، ساختار نامتقارن یک گرداب است و در صورتیکه این اختلاف در حد گاز (حدود ۳ برابر) باشد، ساختار نامتقارن ناشی از شکاف بیضی شکل است.

گرداب‌ها علاوه بر ایجاد ساختار نامتقارن در گذار قرص‌ها، می‌توانند با به دام انداختن غبار در تشکیل سیارات نیز نقش مهمی داشته باشند. در فصل ۴ ما با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی ادامه‌ی رشد سیارات را در گرداب‌ها بررسی کردیم. نتایج ما نشان می‌دهند که سیارات کم جرم بعد از تشکیل در داخل گرداب‌ها در نتیجه‌ی اندرکنش گرانشی با قرص به راحتی از گرداب خارج می‌شوند و بنابراین امکان ادامه‌ی رشد سیاره و تبدیل شدن آن به سیاره‌ی غول وجود ندارد. ما همچنین متوجه شدیم سیاراتی که از نواحی خارجی قرص به سمت گرداب مهاجرت می‌کنند نیز نمی‌توانند وارد گرداب شوند. اگرچه این نتایج برای رشد سیارات و شکل‌گیری سیارات غول در گرداب‌ها ناامید کننده است، اما نقش گرداب‌ها را به عنوان کارخانه‌های تولید سیارات کم جرم و هسته‌ی سیارات غول پررنگ‌تر می‌کند.

۲.۵ پیشنهادات

یکی از موضوعاتی که در آینده در کارهای مشاهده‌ای می‌توان در نظر گرفت، تلاش برای یافتن سیارات پرجرم در درون حفره‌ی گذار قرص‌های نامتقارن است. الگوهایی که ما در این کار برای مطالعه‌ی

نامتقارنی‌های گذار قرص‌ها در نظر گرفتیم همگی دارای پیش‌فرض تشکیل حفره‌ی داخلی توسط سیاره‌ای پرجرم هستند. با توجه به اینکه نتایج ما با مشاهدات تطابق خوبی دارند گام بعدی جستجو برای یافتن سیاره‌ای در داخل حفره است (قسمت ۴.۳). چون سیارات پرجرم قادر هستند مقدار زیادی گاز و غبار را در محدوده‌ی روچ خود نگه دارند در فروسرخ دور می‌توانند به صورت توده‌ای در داخل حفره مشاهده کردند. انجام این کار در آینده‌ی نزدیک توسط تلسکوپ آلمان می‌تواند امکان‌پذیر گردد.

با توجه به پیچیده بودن مطالعه‌ی ناپایداری‌ها، مطالعات فراوانی در ارتباط با این موضوع می‌توان انجام داد. به عنوان مثال در فصل ۴ ما اندرکنش بین سیاره و یک گرداب را در شرایطی که گرداب توسط شرایط اولیه‌ی ما کنترل می‌شد بررسی کردیم. اما سیاره شاید بتواند در نابود کردن گرداب نقش داشته باشد، بنابراین مطالعه‌ی تأثیر سیاره بر نابودی گرداب بسیار مهم است. از طرف دیگر، ما تنها یک گرداب بزرگ مقیاس را در قرص ایجاد کردیم، در صورتیکه در قرص‌ها شاید تعداد بیشتری گرداب وجود داشته باشد. بررسی اندرکنش سیاره با دو گرداب یا بیشتر نیز بسیار جالب خواهد بود. آیا سیاره در این حالت نیز وارد گرداب‌ها نمی‌شود؟ موضوع دیگر اینکه اگر گرداب را به عنوان کارخانه‌ی تولید سیاره در نظر بگیریم، پس از خروج دومین سیاره از گرداب چه اتفاقی برای سیاره‌ی اولی می‌افتد؟ این‌ها موضوعات جالبی هستند که به صورت زنجیروار از موضوعات مورد مطالعه‌ی این پایان‌نامه تولید می‌شوند.

مراجع

- [1] Alexander R.D., Clarke C.J., Pringle J.E., 2004, *MNRAS*, **354**, 71.
- [2] André P., Ward-Thompson D., Barsony M., 1993, *ApJ*, **406**, 122.
- [3] André P., 1994, *Circumstellar Dust Disks and Planet Formation, Proceedings of the 10th IAP Astrophysics Meeting*, 115.
- [4] Artymowicz P., 1993, *ApJ*, **419**, 155.
- [5] Barge P., Sommeria J., 1995, *A&A*, **295**, L1.
- [6] Beckwith S.V.W., Sargent A.I., Chini R.S., Güsten R., 1990, *ApJ*, **99**, 924.
- [7] Birnstiel T., Klahr H., Ercolano B., 2012, *A&A*, **539**, 148.
- [8] Birnstiel T., Andrews S.M., Ercolano B., 2012, *A&A*, **544**, 79.
- [9] Birnstiel T., Dullemond C.P., Pinilla P., 2013, *A&A*, **550**, L8.
- [10] Blum J., Wurm G., 2008, *ARA&A*, **48**, 21.
- [11] Brauer F., Dullemond C.P., Henning T., 2008, *A&A*, **480**, 859.
- [12] Brown J.M., Blake G.A., Dullemond C.P., Merín B., Augereau J.C., et al., 2007, *ApJ Lett*, **664**, L107.

-
- [13] Brown J.M., Blake G.A., Qi C., Dullemond C.P., Wilner D.J., Williams J.P., 2009, *ApJ*, **704**, 496.
 - [14] Casassus S., van der Plas G., Sebastian P.M., Dent W.R.F., et al., 2013, *Nature*, **493**, 191.
 - [15] Chavanis P.H., 2000, *A&A*, **356**, 1089.
 - [16] Cieza L., Padgett D.L., Stapelfeldt K.R., Augereau J., Harvey P., et al., 2007, *ApJ*, **667**, 308.
 - [17] Cieza L.A., Schreiber M.R., Romero G.A., Mora M.D., Merin B., et al., 2010, *ApJ*, **712**, 925.
 - [18] Crida A., Morbidelli A., Masset F., 2006, *Icarus*, **181**, 587.
 - [19] D'Angelo G., Henning T., Kley W., 2002, *A&A*, **385**, 647.
 - [20] de La Fuente Marcos C., Barge P., 2001, *MNRAS*, **323**, 601.
 - [21] de Val-Borro M., Edgar R.G., Artymowicz P., et al., 2006, *MNRAS*, **370**, 529.
 - [22] de Val-Borro M., Artymowicz P., D'Angelo G., Peplinski A., 2007, *A&A*, **471**, 1043.
 - [23] Dullemond C.P., Hollenbach, D., Kamp I., D'Alessio P., 2007, *Protostars and Planets V*, 555.
 - [24] Eales E., 2009, Planets and Planetary Systems, *John Wiley & Sons, Ltd*.
 - [25] Espaillat C., Calvet N., D'Alessio P., Hernández J., Qi C., et al., 2007, *ApJ Lett.*, **670**, L135.

-
- [26] Evans N.J., Dunham M.M., Jorgensen J.K., Enoch M.L., Merín B., et al., 2009, *ApJ Suppl.*, **181**, 321.
 - [27] Font A.S., McCarthy I.G., Johnstone D., Ballantyne D.R., 2004, *ApJ*, **607**, 890.
 - [28] Frank J., King A., Raine D.J., 2002, *Accretion Power in Astrophysics. Cambridge*, 3rd ed. UK: Cambridge Univ. Press.
 - [29] Fukagawa M., Hayashi M., Tamura M., Itoh Y., Hayashi S.S., et al., 2004, *ApJ Lett.*, **605**, L53.
 - [30] Goldreich P., Tremaine S., 1979, *ApJ*, **233**, 857.
 - [31] Goldreich P., Tremaine S., 1980, *ApJ*, **241**, 425.
 - [32] Goldreich P., Sari R., 2003, *ApJ*, **585**, 1024.
 - [33] Goodman J., Rafikov R.R., 2001, *ApJ*, **552**, 793.
 - [34] Inaba S., Barge P., 2006, *ApJ*, **649**, 415.
 - [35] Isella A., Pérez L.M., Carpenter J.M., *ApJ*, **747**, 136.
 - [36] Johansen A., Andersen A.C., Brandenburg A., 2004, *A&A*, **417**, 361.
 - [37] Kley W., Dirksen G., 2006, *A&A*, **447**, 369.
 - [38] Kley W., Nelson R.P., 2012, *ARA&A*, **50**, 211.
 - [39] Koller J., Li H., Lin D., 2003, *ApJ Lett.*, **596**, L91.
 - [40] Lada C.J. 1987. In *Star Forming Regions*, ed.MPeimbert, J Jugaku, IAU Symp. **115**.

-
- [41] Lada C.J., Muench A.A., Luhman K.L., Allen L., Hartmann L., et al., 2006, *ApJ*, **131**, 1574.
 - [42] Li H., Finn J.M., Lovelace R.V.E., Colgate S.A., 2000, *ApJ*, **533**, 1023.
 - [43] Li H., Li S., Koller J., Wendroff B.B., Liska R., Orban C.M., Liang E.P.T., Lin D.N.C., 2005, *ApJ*, **624**, 1003.
 - [44] Li H., Lubow S.H., Li S., Lin D.N.C., 2009, *ApJ*, **690**, L52.
 - [45] Lovelace R.V.E., Li H., Colgate S.A., Nelson A.F., 1999, *ApJ*, **513**, 805.
 - [46] Lubow, S.H., 1991, *ApJ*, **381**, 259.
 - [47] Lyra W., Johansen A., Klahr H., Piskunov N., 2009, *A&A*, **493**, 1125.
 - [48] Lyra W., Johansen A., Zsom A., Klahr H., Piskunov N., 2009, *A&A*, **497**, 869.
 - [49] Lyra W., MacLow M.M., 2012, *ApJ*, **756**, 62.
 - [50] Matrá L., Merín B., Alves de Oliveira C., Huélamo N., et al., *A&A*, **548**, A111.
 - [51] Masset F.S., 2000, *A&AS*, **141**, 165.
 - [52] Meheut H., Keppens R., Casse F., Benz W., 2012, *A&A*, **542**, A9.
 - [53] Meheut H., Lovelace R.V.E., Lai D., 2013, *MNRAS*, **430**, 1988.
 - [54] Merín B., Brown J.M., Oliveira I., Herczeg G.J., van Dishoeck E.F., et al., 2010, *ApJ*, **718**, 1200.
 - [55] Mulders G.D., Dominik C., 2012, *A&A*, **539**, A9.

-
- [56] Muzerolle J., Allen L.E., Megeath S.T., Hernandez J., Gutermuth R.A., 2010, *ApJ*, **708**, 1107.
 - [57] Najita J.R., Strom S.E., Muzerolle J., 2007, *MNRAS*, **378**, 369.
 - [58] O'dell C.R., Wen Z., 1994, *ApJ*, **436**, 194.
 - [59] Okuzumi S., Tanaka H., Kobayashi H., Wada K., 2012, *ApJ*, **752**, 106.
 - [60] Oppenheimer B. R., Brenner D., Hinkley S., Zimmerman N., et al., 2008, *ApJ*, **679**, 1574.
 - [61] Owen J.E., Ercolano B., Clarke C.J., Alexander R.D., 2010, *MNRAS*, **401**, 1415.
 - [62] Owen J.E., Ercolano B., Clarke C.J., 2011, *MNRAS*, **412**, 13.
 - [63] Owen J.E., Clarke C.J., Ercolano B., 2012, *MNRAS*, **422**, 1880.
 - [64] Paardekooper S., 2007, *A&A*, **462**, 355.
 - [65] Paardekooper S.-J., Baruteau C., Crida A., Kley W., 2010, *MNRAS*, **401**, 1950.
 - [66] Paardekooper S.-J., Lesur G., Papaloizou J.C.B., 2010, *ApJ*, **725**, 146.
 - [67] Papaloizou J.C.B., Nelson R.P., Masset F., 2001, *A&A*, **366**, 263.
 - [68] Piétu V., Guilloteau S., Dutrey A., 2005, *A&A*, **443**, 945.
 - [69] Pinilla P., Benisty M., Birnstiel T., 2012, *A&A*, **545**, A81.
 - [70] Pontoppidan K.M., Blake G.A., van Dishoeck E.F., et al., 2008, *ApJ*, **684**, 1323.

-
- [71] Rameau J., Chauvin G., Lagrange A.M., Thébault P., et al., 2012, *A&A*, **546**, A24.
 - [72] Regály Z., Juhász A., Sándor Z., Dullemond C.P., 2012, *MNRAS*, **419**, 1701.
 - [73] Regály Z., Sándor Z., Csomós P., Ataiee S., 2013, *MNRAS*, **433**, 2626.
 - [74] Richtmyer R.D., Morton R.W., 1957, *Difference Methods for Initial-Value Problems*, 2ed. New York: Wiley Interscience.
 - [75] Roberge A., Kamp I., Montesinos B., Dent W.R.F., et al., 2013, *accepted in ApJ*.
 - [76] Salyk C., Blake G.A., Boogert A.C.A., Brown J.M., 2011, *ApJ*, **743**, 112.
 - [77] Sargent A.I., Beckwith S., 1987, *ApJ*, **323**, 294.
 - [78] Sari R., Goldreich P., 2004, *ApJ*, **606**, L77.
 - [79] Shakura N.I., Sunyaev R.A., 1973, *A&A*, **24**, 337.
 - [80] Sicilia-Aguilar A., Henning T., Hartmann L.W., 2010, *ApJ*, **710**, 597.
 - [81] Stone, J.M., Norman M.L., 1992, *ApJ Suppl.*, **80**, 753.
 - [82] Strom K.M., Strom S.E., Edwards S., Cabrit S., Skrutskie M.F., 1989, *ApJ*, **97**, 1451.
 - [83] van der Marel N., van Dishoeck E.F., Bruderer S., et al., 2013, *Science*, **340**, 1199.
 - [84] van Leer B., 1977, *J. Comput. Phys.*, **23**, 276.
 - [85] Ward W.R., 1986, *Icarus*, **67**, 164.
 - [86] Weidenschilling S.J., 1977, *MNRAS*, **180**, 57.

-
- [87] Whipple F.L., 1972 In *Evlius, A. (Ed.), From Planet to Plasma, Proceedings of the 21st Nobel Symposium*, Wiley, New York, **211**.
- [88] Williams J.P., Cieza, L.A., 2011, *ARAA A*, **49**, 67.
- [89] Wolk S.J.,Walter F.M., 1996, *ApJ*, **111**, 2066.
- [90] Youdin A.N., Lithwick Y., 2007, *Icarus*, **192**, 588.
- [91] Yu C., Li H., Li S., Lubow S.H., Lin D.N.C., 2010, *ApJ*, **712**, 198.
- [92] Zsom A., Sándor Z., Dullemond C.P., 2011, *A A*, **527**, A10.

پیوست آ

محاسبات خروج از مرکز قرص

ذره‌ای را در نظر می‌گیریم که روی بیضی با خروج از مرکز e و نیم محور بزرگ a به دور ستاره‌ی مرکزی حرکت می‌کند. روابط زیر بین کمیت‌های مختلف این ذره مانند سرعت شعاعی v_r ، سرعت سمتی v_ϕ ، موقعیت r و فاز ذره ϕ وجود دارند:

$$r = \frac{a(1-e^2)}{1+e \cos(\phi-\phi_0)} \quad (1.A)$$

$$v_r = \sqrt{\frac{\mu}{p}} e \sin(\phi - \phi_0) \quad (2.A)$$

$$v_\phi = \sqrt{\frac{\mu}{p}} (1 + e \cos(\phi - \phi_0)) \quad (3.A)$$

$$\frac{v^2}{r} - \frac{\mu}{r} = -\frac{\mu}{a} \quad (4.A)$$

که ϕ_0 فاز اولیه‌ی ذره، $p = a(1 - e^2)$ و $\mu = G(M_\star + M_p)$ هستند. مقادیر کمیت‌های r ، v_ϕ ، v_r و v از خروجی‌های کد بدست می‌آیند. a نیز از رابطه‌ی ۴.آ به آسانی قابل محاسبه است. با انجام تعدادی جمع و تفریق، مجذور خروج از مرکز از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید که از جواب مثبت، خروج از مرکز ذره

(سلول مورد نظر) را می‌توان محاسبه کرد

$$e^2 = \frac{-E \pm \sqrt{\Delta}}{2D} \quad (5.آ)$$

$$A = \frac{v_r}{v_\phi} \quad (6.آ)$$

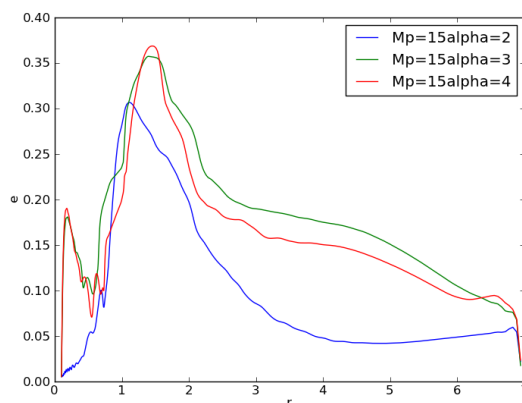
$$D = (1 + A^2) \frac{a^2}{r^3} \quad (7.آ)$$

$$E = -2(1 + A^2) \frac{a^2}{r^3} + \frac{2a}{r} - 1 \quad (8.آ)$$

$$F = (1 + A^2) \frac{a^2}{r^3} - \frac{2a}{r} + 1 \quad (9.آ)$$

$$\Delta = E^2 - 4DF \quad (10.آ)$$

شکل آ.۱ خروج از مرکز محاسبه شده برای الگوهای دارای سیاره‌ای با جرم $15M_{Jup}$ را نشان می‌دهد.



شکل آ.۱: خروج از مرکز الگوهای با $M_p = 15M_{Jup}$ مقدار پارامتر وشکسانی قرص را نشان می‌دهد. خروج از مرکز نواحی نزدیک به مرزها به دلیل تعیین سرعت‌ها و شرایط مرزی توسط خود ما قابل اعتماد نیستند ولی خروج از مرکز لبه‌ی خارجی شکاف به دلیل دور بودن کافی از مرزها صحیح است. همانطور که در این تصویر می‌بینیم لبه‌ی خارجی شکاف در الگوهای با وشکسانی کم به مقدار قابل توجهی بیضی و کشیده است.

Abstract

The advanced observational instruments in millimeter wavelengths reveal that some protoplanetary discs have holes in their inner parts. Because they are considered as a stage between protoplanetary discs and debris disc, they are named transition discs. Recent observations unveiled some non-axisymmetric structures at the outer edge of their holes. A massive planet can create both the inner hole and the asymmetry either by making the gap edge eccentric or by producing a vortex. We studied the difference between these two asymmetric structures for different disc viscosities and planet masses and finally presented a yardstick for observers. We showed that if the azimuthal dust density contrast is high (more than 70), the asymmetry is a vortex while if the contrast is equal with azimuthal gas density contrast (around 3), the feature is due to the eccentric gap. Our results show the importance of the vortices as dust traps and planet factories. After that, we studied whether a new-born planet stays inside a vortex or not. We set a vortex in a pressure bump and put a low mass planet inside the vortex to study the interaction of the vortex and the planet. We found out that even very low mass planet -as low mass as 0.1 earth mass around a solar mass star- do not stay inside the vortex and come out as the result of gravitational interaction with the disc and finally are lock to the vortex. Although a planet is not able to stay inside a vortex and continues its growth, our results show the importance of the vortices as the planet traps.

Keywords: protoplanetary disc, transition disc, planet, vortex, migration