

ロスビー波不安定性によって 円盤上に形成される巨大渦

小野 智弘 (京都大学 宇宙物理学教室)

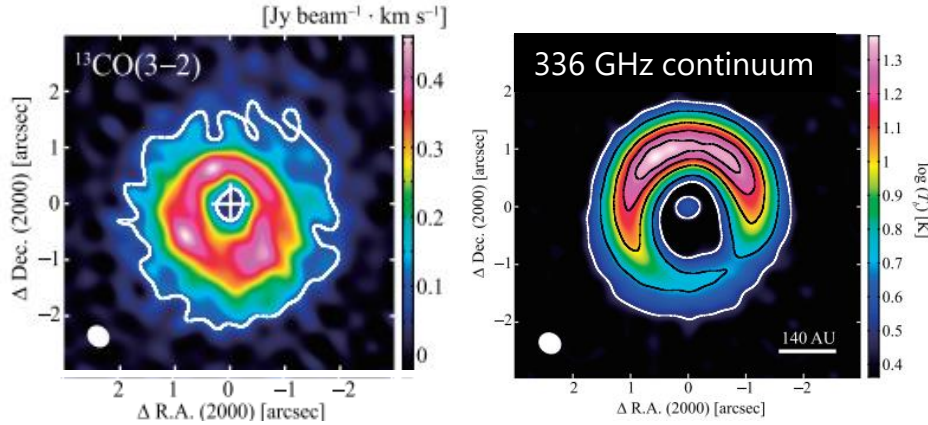
共同研究者

武藤 恭之 (工学院大学)、 富田 賢吾 (大阪大学)、
Zhaohuan Zhu (UNLV)

三日月状構造を持つ原始惑星系円盤

ALMAによる三日月状構造の観測例

HD142527



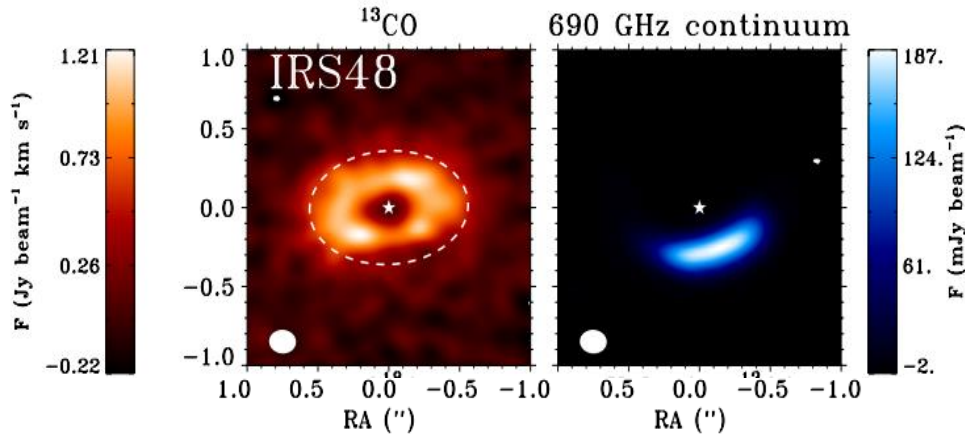
Fukagawa+13

非軸対称性

- ダスト分布
- ガス分布

強い
弱い?

IRS48



van der Marel+16

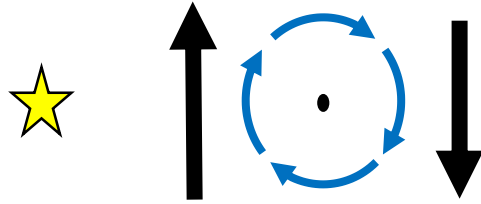
疑問

- 三日月状構造の成因は？
- 円盤進化・惑星形成への影響はあるのか？

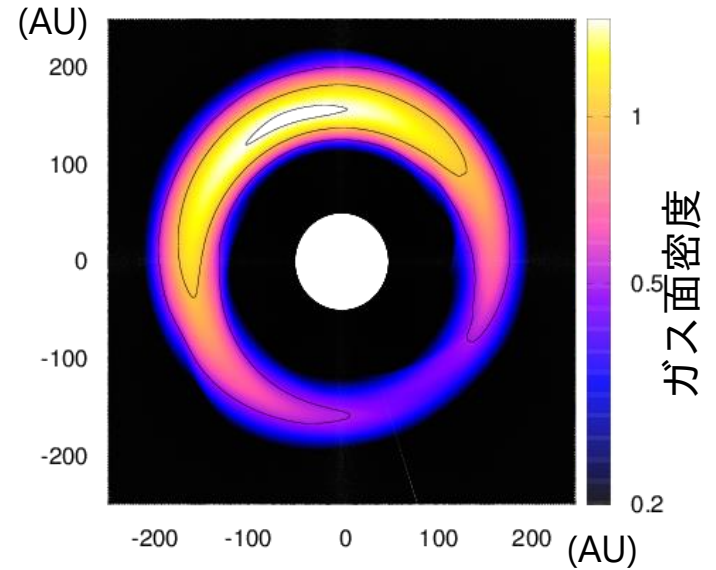
三日月状構造をどうやって作るのか

Step 1

ガス巨大渦の形成

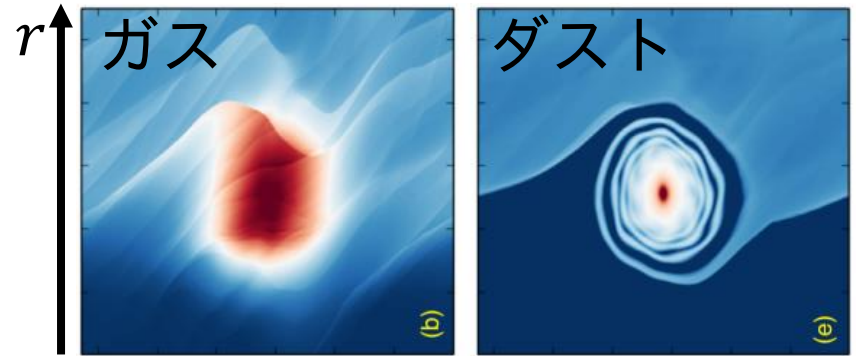


逆行渦が背景シアーと馴染む



Step 2

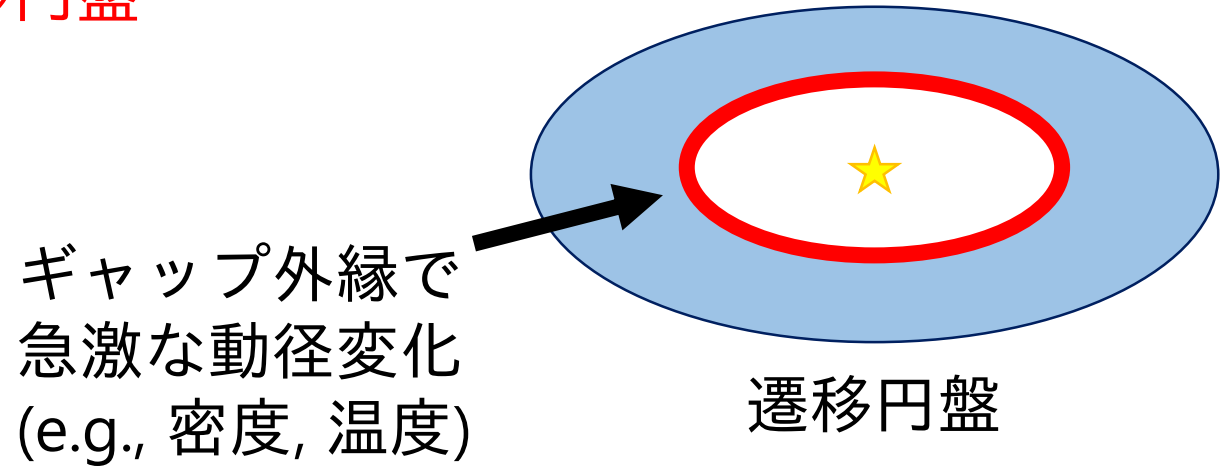
ガス渦によるダスト粒子の捕獲



Fu+14

遷移円盤と三日月状構造

三日月状構造が見つかった
全ての円盤は**遷移円盤**



全ての遷移円盤が三日月状構造を持つわけではない
ギャップ外縁の構造がガス巨大渦の形成に寄与？

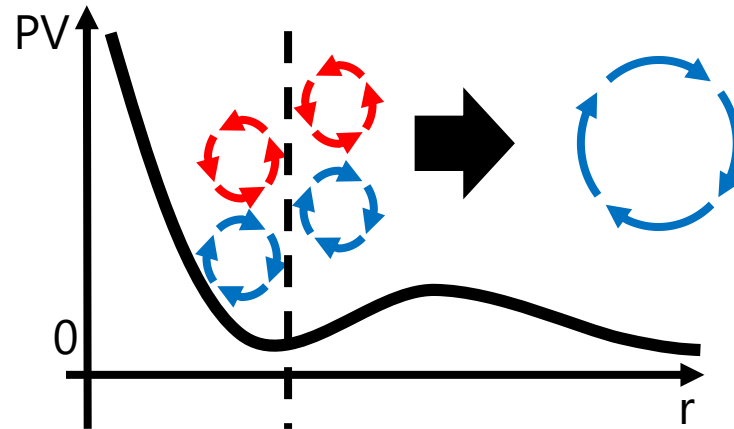
有力な渦形成機構

➤ ロスビー波不安定性[RWI] (シア不安定性)

Lovelace+99, Li+00

鋭い円盤構造変化(密度・温度)

- ➔ ポテンシャル渦度(PV)に極小値
- ➔ 2本のロスビー波の強め合い
- ➔ 渦の形成

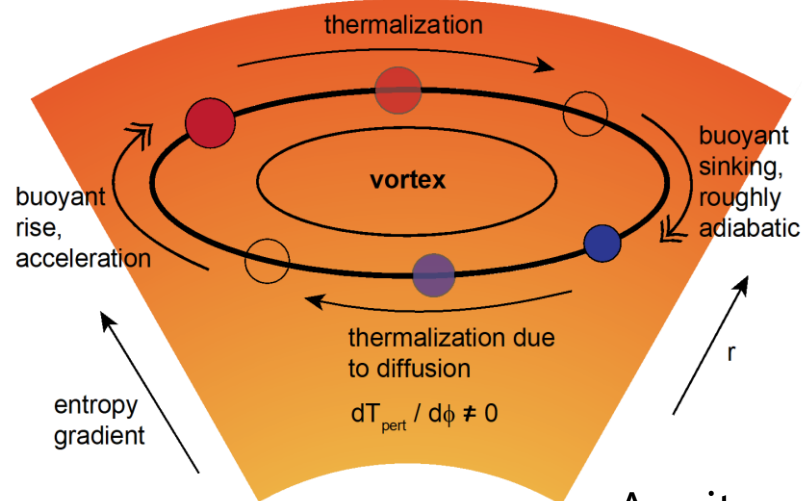


➤ 傾圧不安定性 (対流不安定性)

Klahr & Bodenheimer 03

強いエントロピー勾配

- ➔ 対流不安定性
(回転による安定化は考慮)



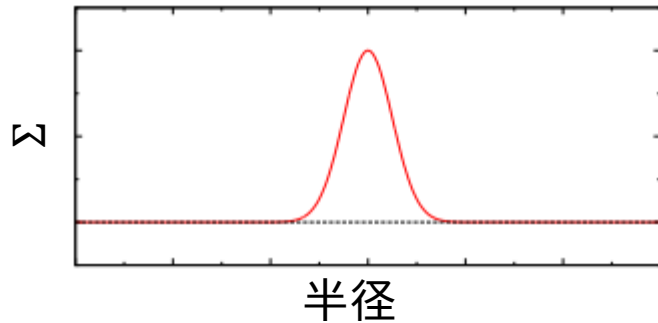
Armitage 11

ロスビー波不安定性[RWI]

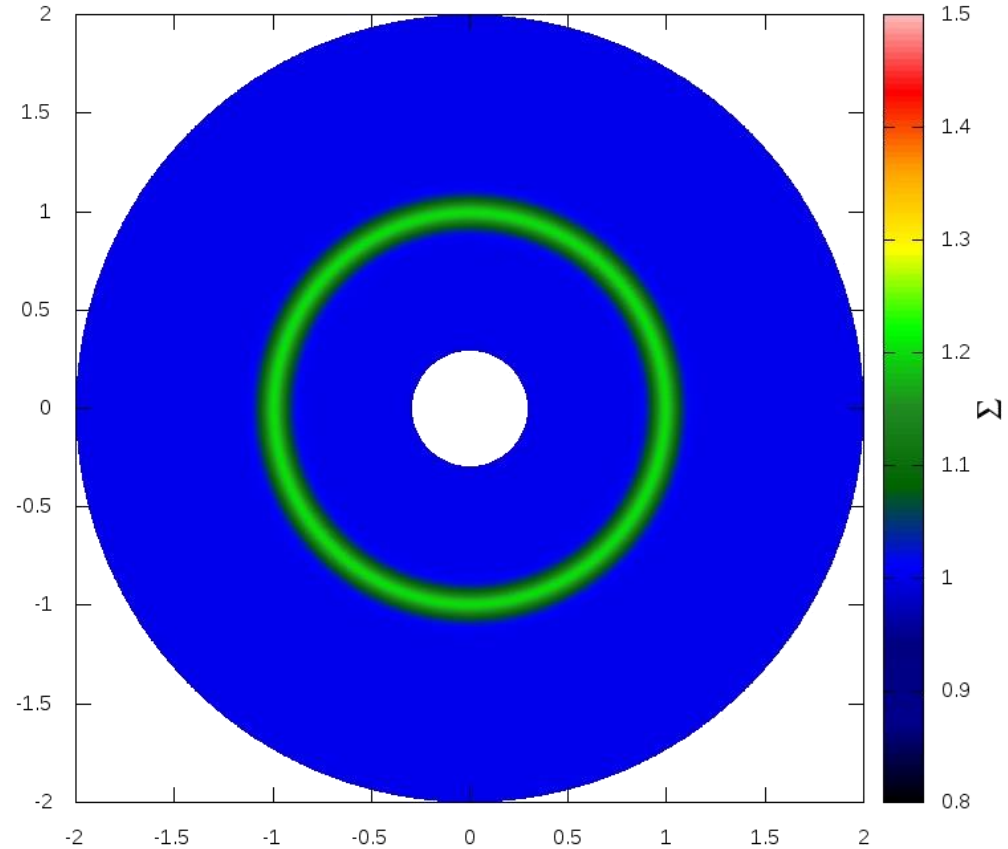
円盤が動径方向に鋭い構造変化を持つ時
ロスビー波不安定性によって巨大渦が形成される

20 rot. @r=1

面密度バンプ



1. 複数の渦形成
2. 渦の合体
3. 準定常な渦(RWI渦)



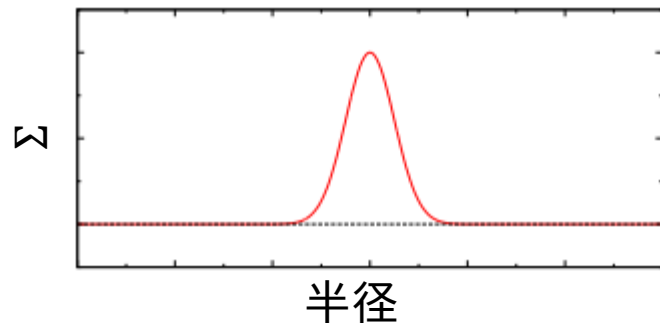
#r=1での回転系

ロスビー波不安定性[RWI]

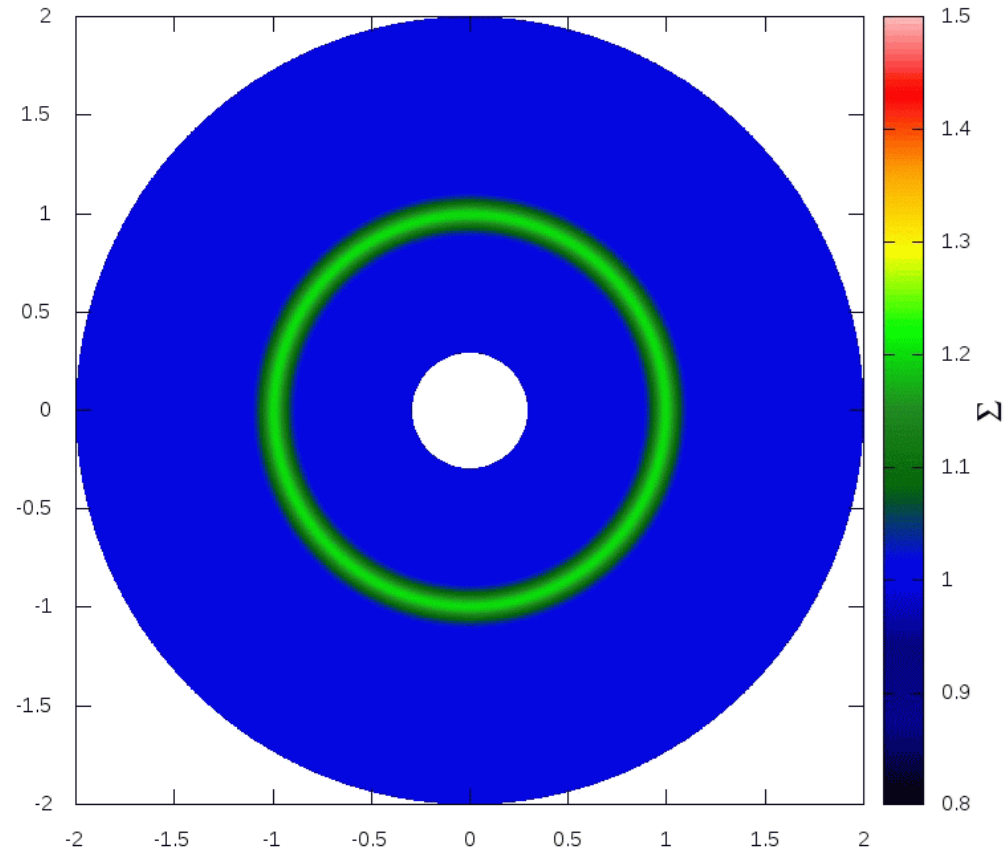
円盤が動径方向に鋭い構造変化を持つ時
ロスビー波不安定性によって巨大渦が形成される

20 rot. @r=1

面密度バンプ



1. 複数の渦形成
2. 渦の合体
3. 準定常な渦(RWI渦)



#r=1での回転系

RWIの線形安定性解析 1

● Barotropic 2D 理想流体

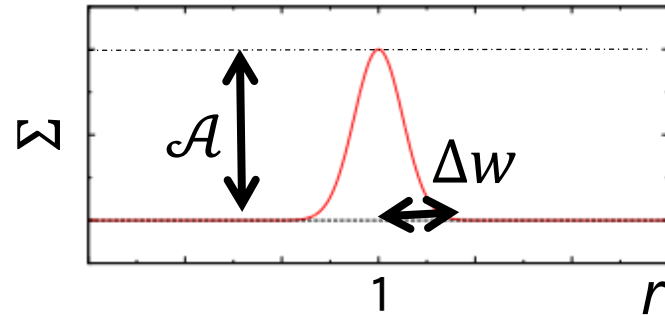
□ 初期面密度分布は
ガウシアンバンプ

□ 円盤アスペクト比 $h = 0.1$

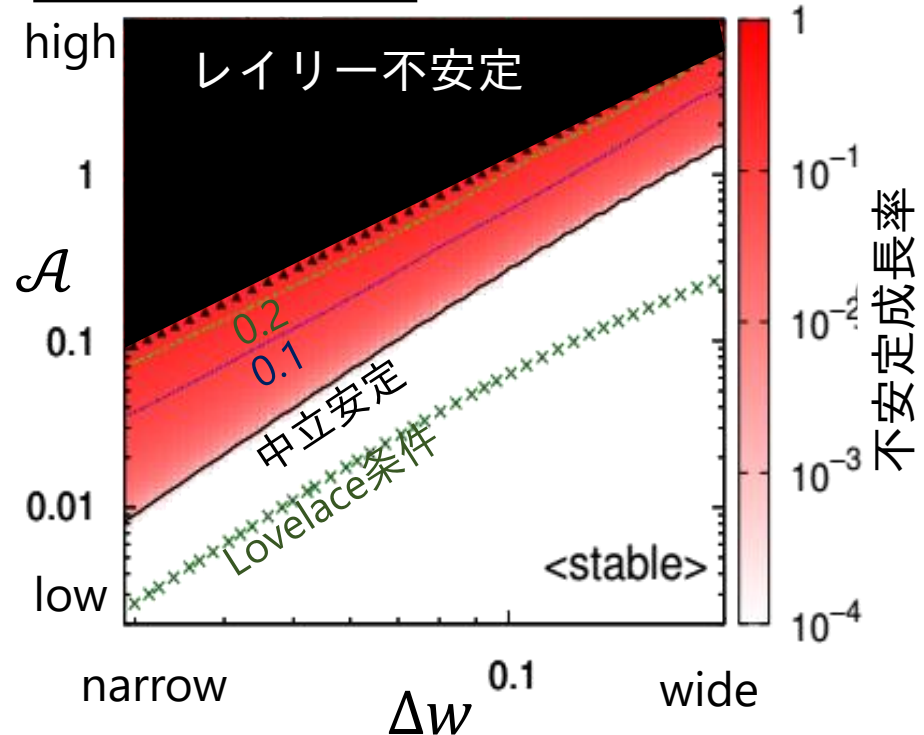
□ 断熱指数 $\Gamma = 5/3$

✓ 狭く・高いバンプほど不安定

✓ 成長率は最も高くて $0.2 \Omega_K$



不安定成長率



RWIの線形安定性解析

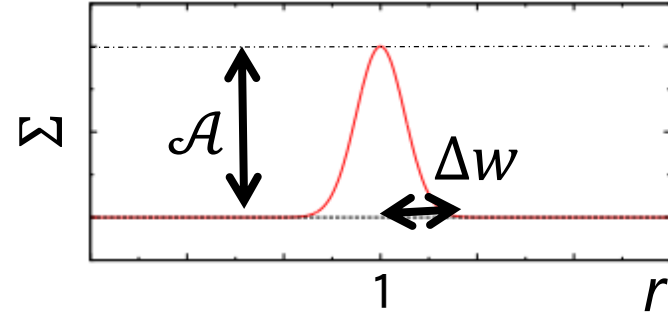
● Barotropic 2D 理想流体

□ 初期面密度分布は
ガウシアンバンプ

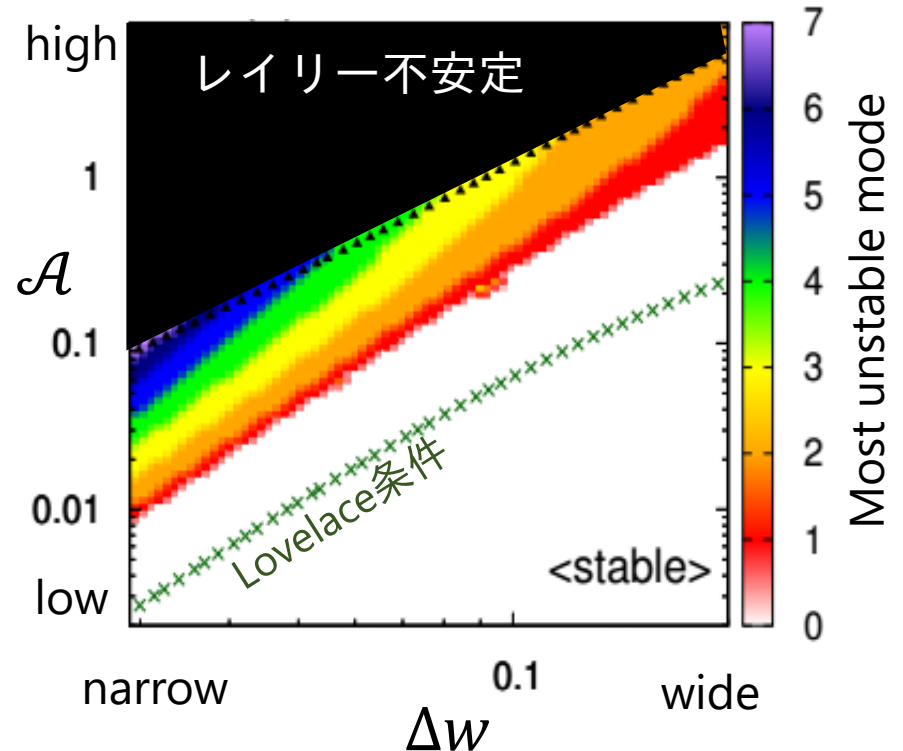
□ 円盤アスペクト比 $h = 0.1$

□ 断熱指数 $\Gamma = 5/3$

✓ Δw 小・ A 大の時、
始めにできる渦の個数 多



最大成長モード



数値流体計算のパラメータセット

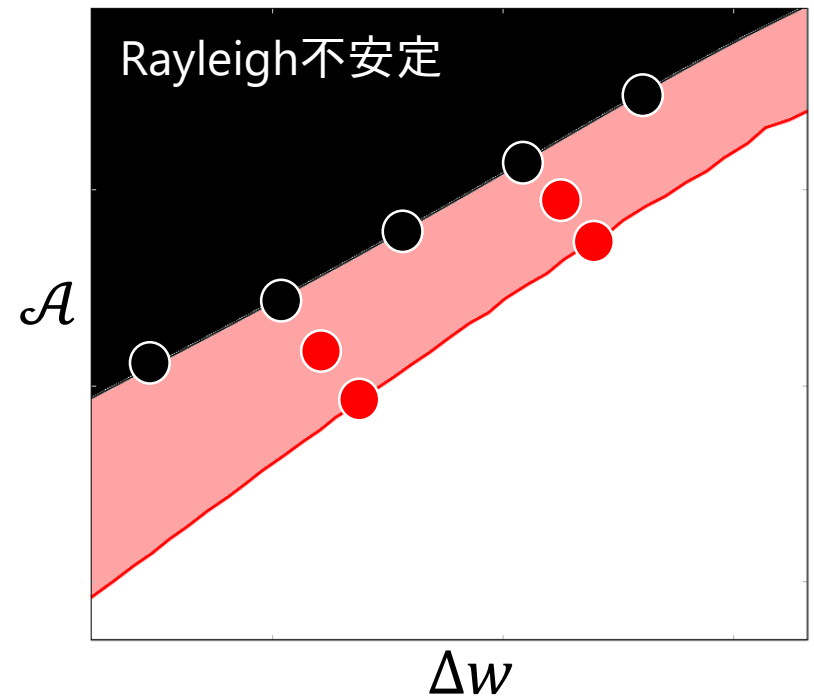
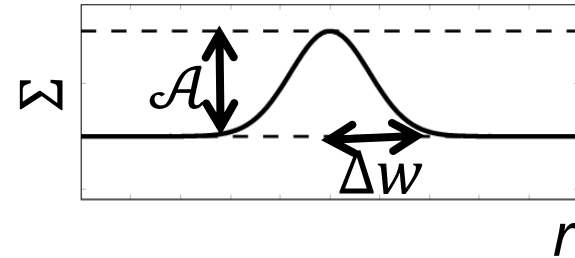
初期面密度分布はガウシアンバンプ
断熱指数 $\Gamma = 5/3$ に固定

パラメータ (全部で41種)

✓ 無次元音速 h
(0.2, 0.15, 0.1, 0.05, 0.025),

✓ \mathcal{A} , Δw

- 1 高成長率モデル
- 2 低成長率モデル



渦合体にかかる時間

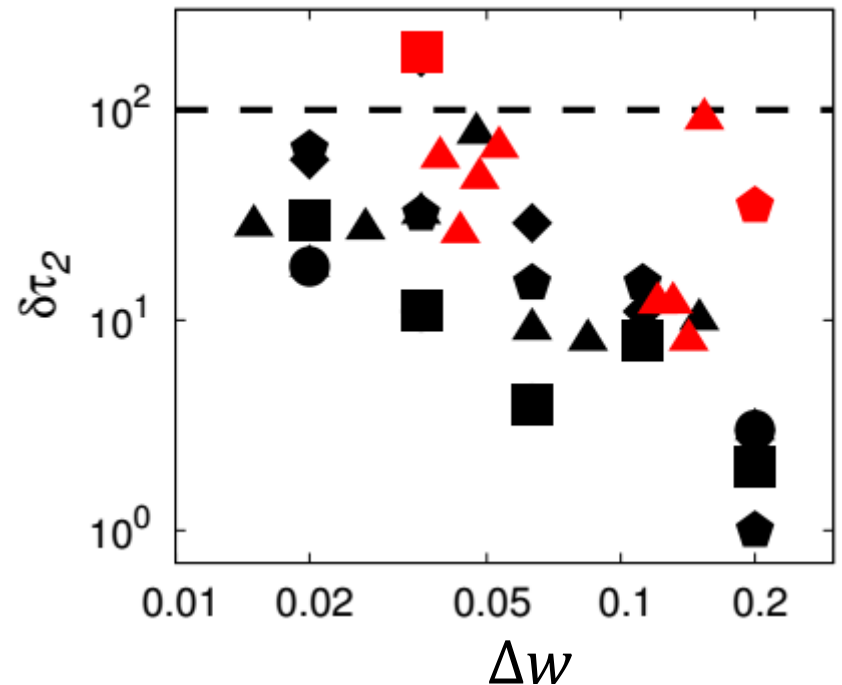
全てのモデルにおいて最終的に渦は1個になる
#渦合体のタイミングは初期摂動によって変化

n 個 $\rightarrow n-1$ 個 $\rightarrow \dots \rightarrow 3$ 個

までは数~数十周

2個 $\rightarrow 1$ 個に掛かる
回転数 $\delta\tau_2 \lesssim 100$

100 AU だと考えると
 10^5 yr以内には渦は1個に至る



RWIによって形成される渦の性質

- 渦の動径幅 (a)
渦中心におけるスケールハイトの1.5倍以下

- RWIの成長率 $0 \longrightarrow 0.2\Omega_K$

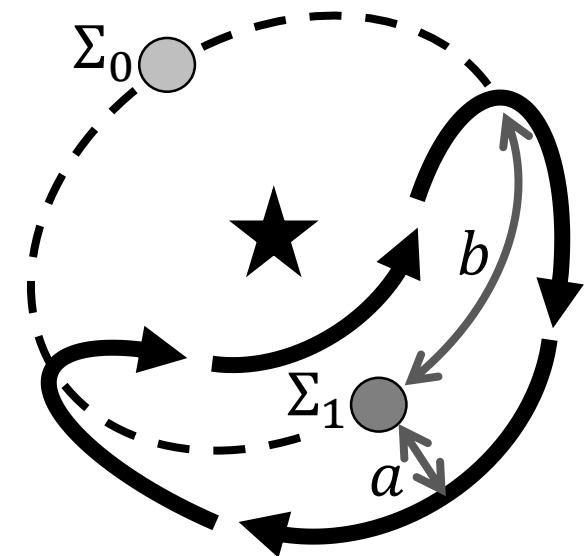
渦のアスペクト比
($\chi \equiv b/a$)

大 \longrightarrow 4

3Dでも渦が壊れない
アスペクト比

面密度コントラスト
($\xi \equiv \Sigma_1/\Sigma_0$)

1 \longrightarrow 約10



渦の移動

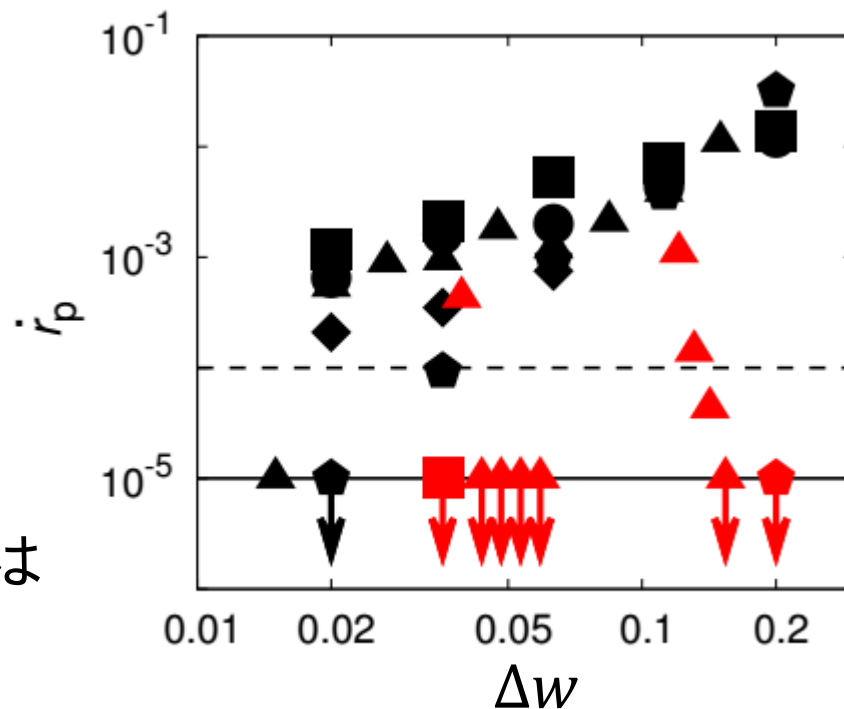
渦は円盤内に密度波を立て、
角運動量輸送することで移動する

不安定の成長率 高
and
渦のサイズ 大

→ 渦移動 速

観測できる渦の長時間維持には
成長率 $\lesssim 0.1\Omega_K$

→ 渦のアスペクト比 $\chi \gtrsim 6$
面密度コントラスト $\xi \lesssim 5$



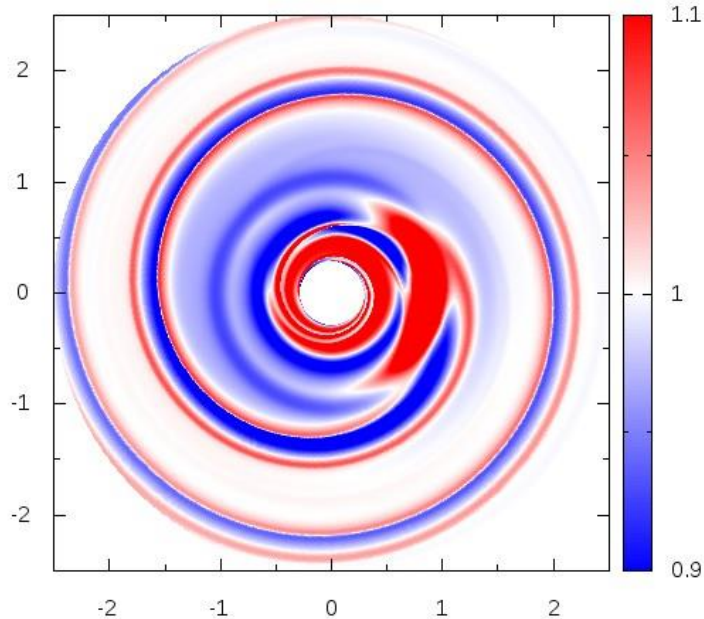
- ① 高成長率モデル
- ② 低成長率モデル

渦が立てる密度波

渦も密度波を立てるが、出るのは**2本**

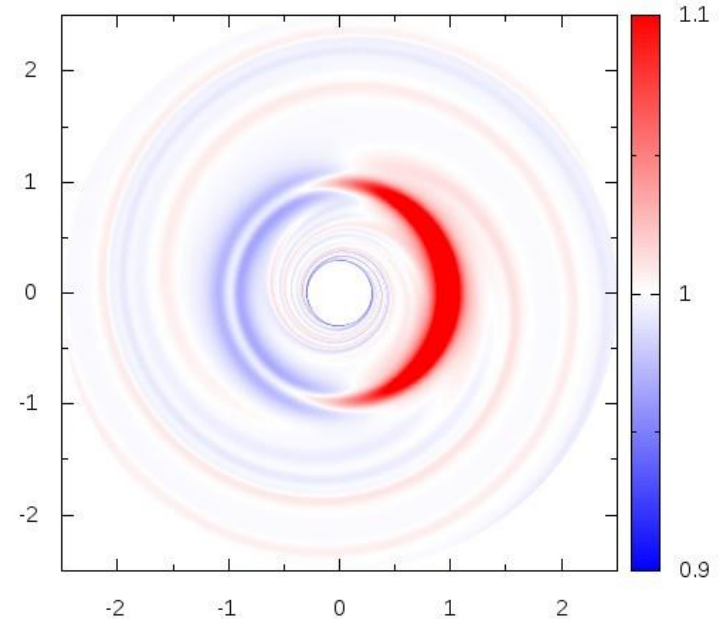
高成長率モデル

120 rotation



低成長率モデル

120 rotation



成長率高 → 密度波強、間隔狭、渦移動速

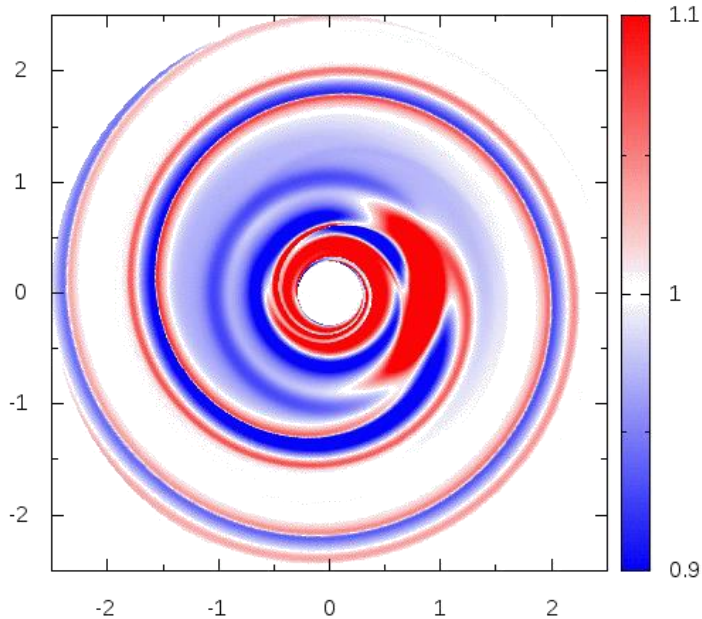
成長率低 → 密度波弱、間隔広、渦移動遅

渦が立てる密度波

渦も密度波を立てるが、出るのは**2本**

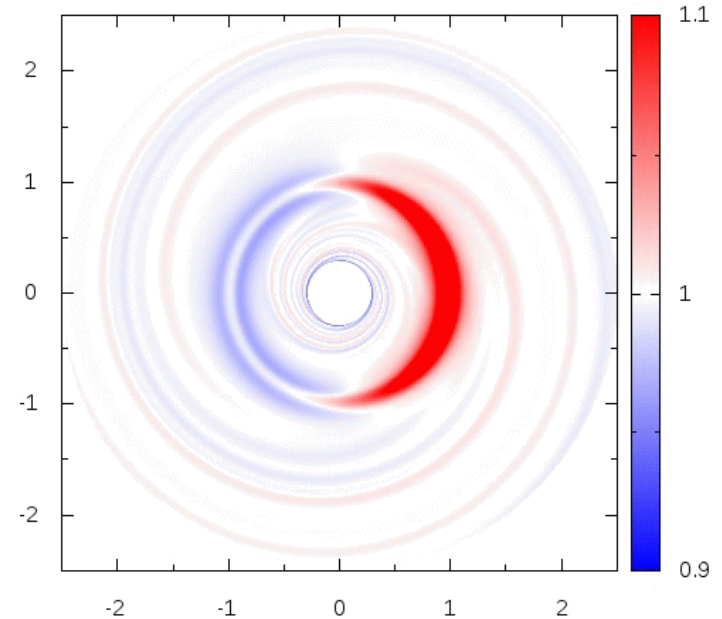
高成長率モデル

120 rotation



低成長率モデル

120 rotation

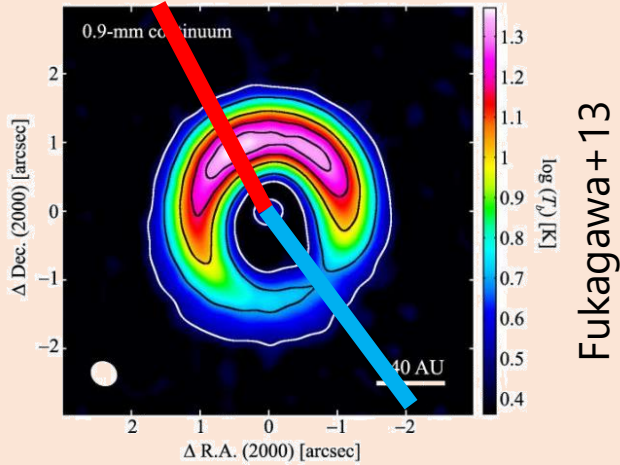


成長率高 → 密度波強、間隔狭、渦移動速

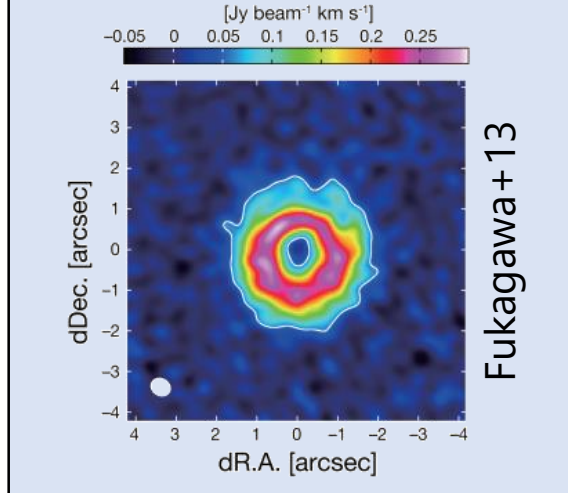
成長率低 → 密度波弱、間隔広、渦移動遅

Muto+15(HD142527)の再現を試みる

ダスト連続波

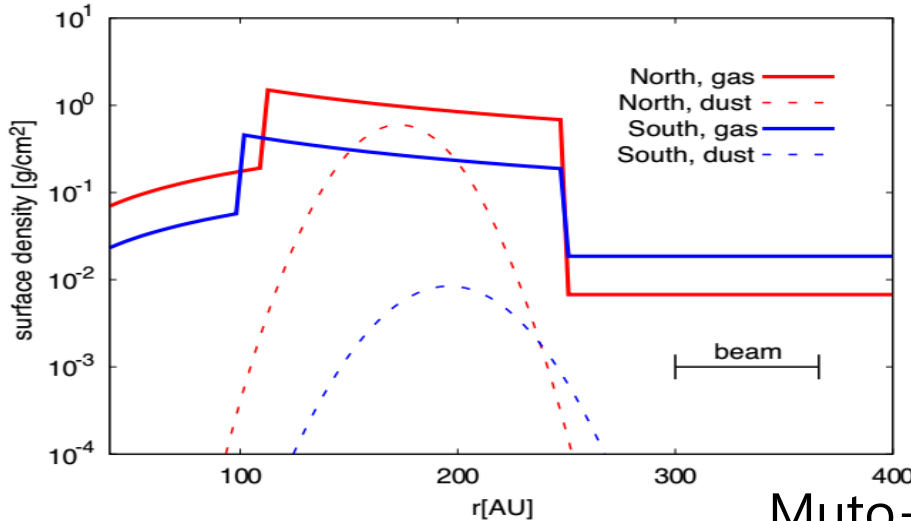


ガス輝線



理論モデル

- 輻射輸送モデルより温度を推定
- 動径分布を関数で与える
- 鉛直方向は静水圧平衡



ダスト: $\xi \sim 70$

ガス : $\xi \sim 3 - 10$

($\xi \sim 3.75$ by Boehler+17)

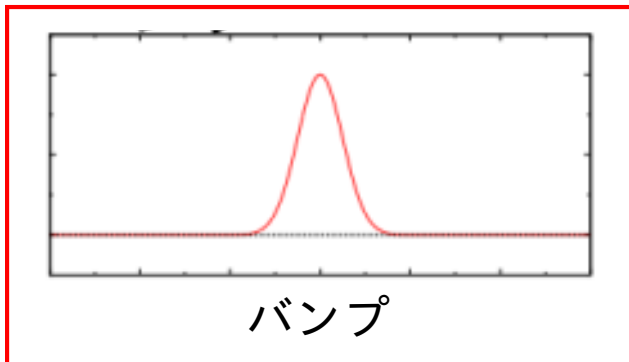
局所等温

円盤アスペクト比 $h \sim 0.1$

Muto+15

初期条件

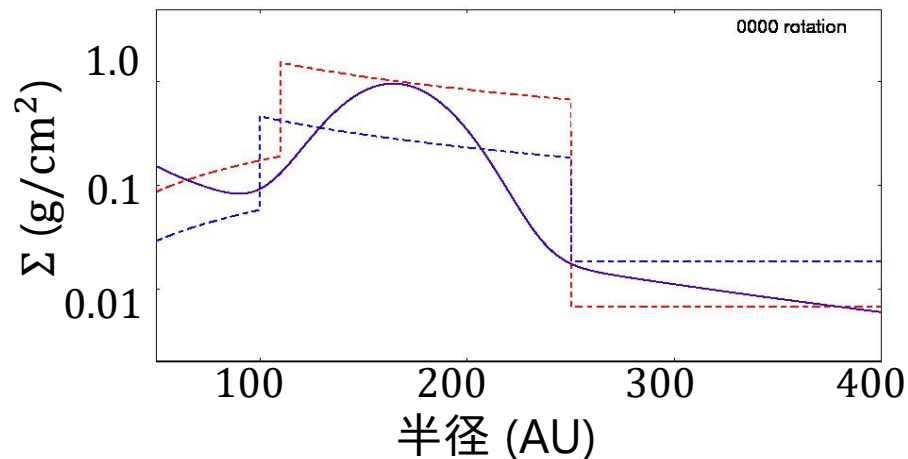
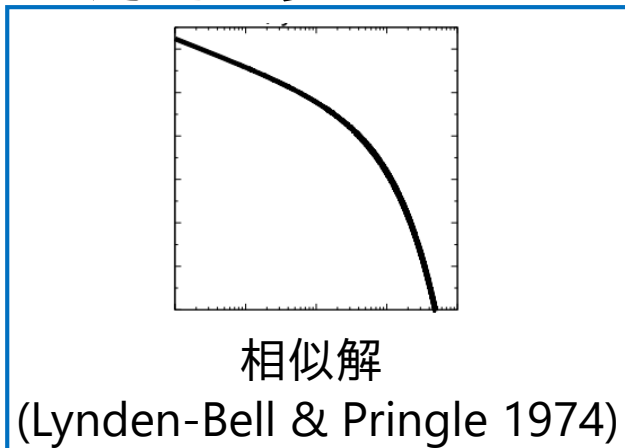
局所的な変化



×

=

大局的な変化



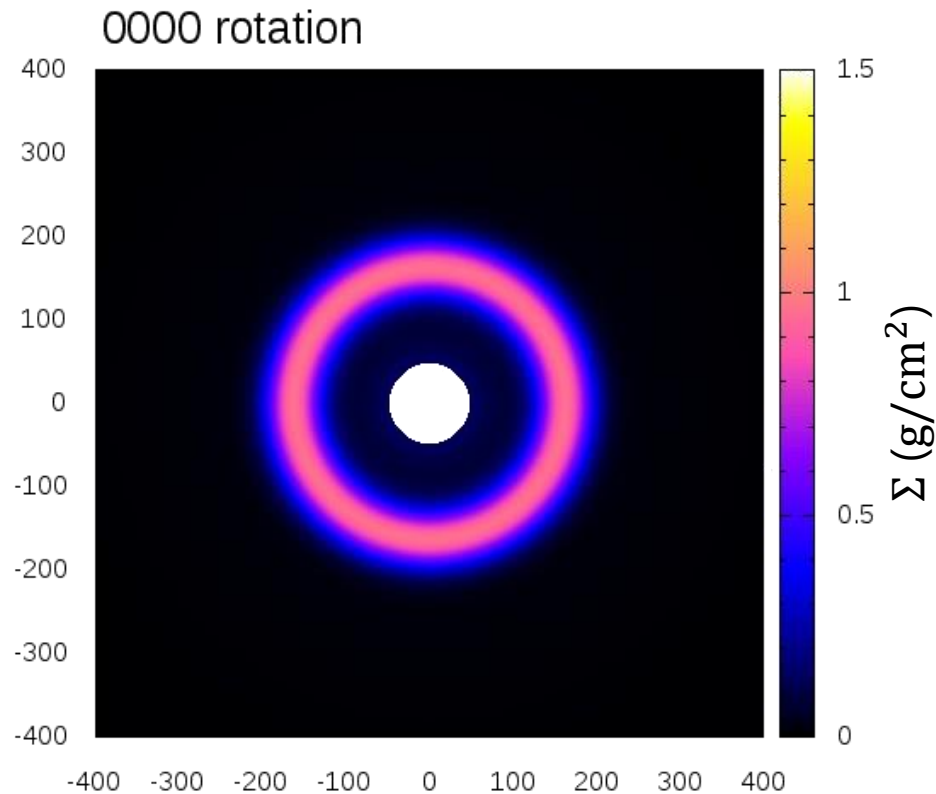
RWIに効くのはポテンシャル渦度
~ 密度の2階微分
→ 大局的な密度構造は効かない

面密度分布の時間進化

$r = 50 - 300$ AU

1000 rot. @ 100 AU \sim 1 Myr

200周までは1周ごと、それ以後は10周毎にプロット

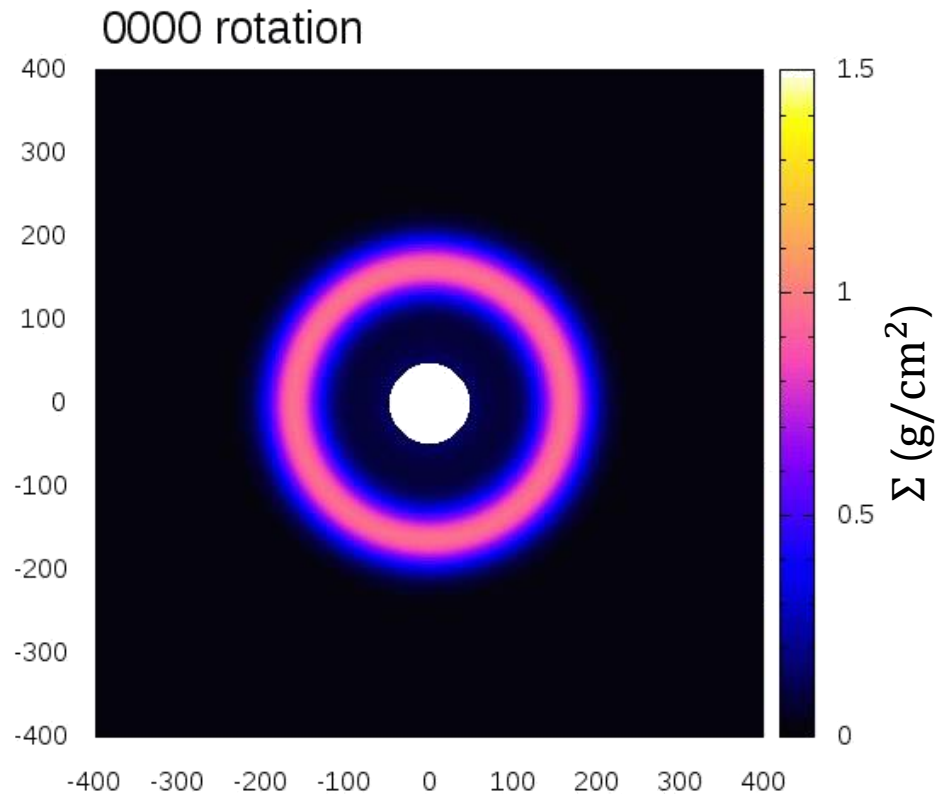


面密度分布の時間進化

$r = 50 - 300$ AU

1000 rot. @ 100 AU \sim 1 Myr

200周までは1周ごと、それ以後は10周毎にプロット

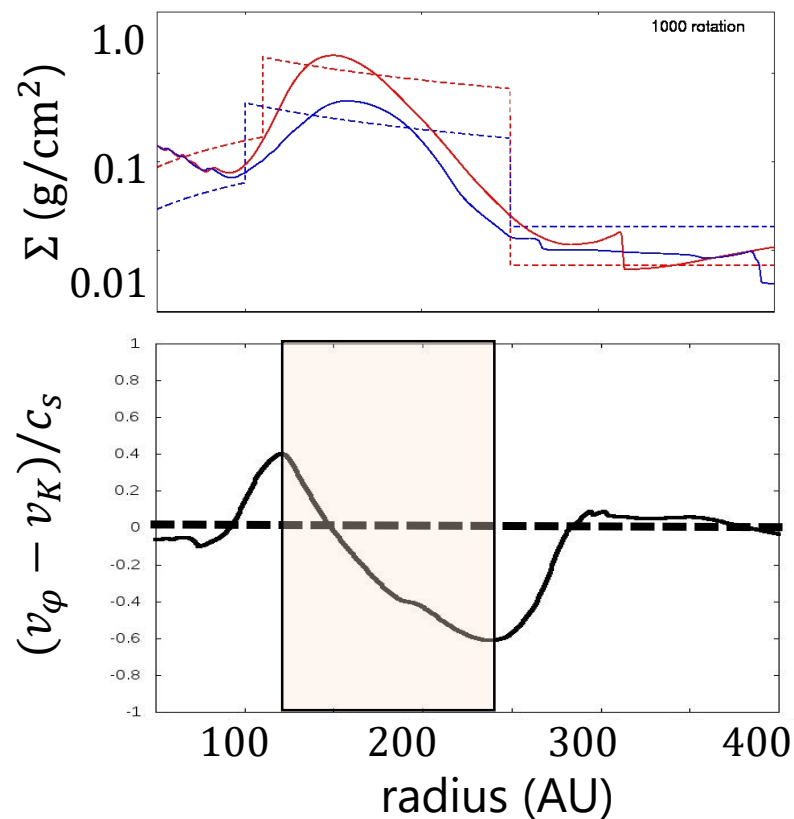
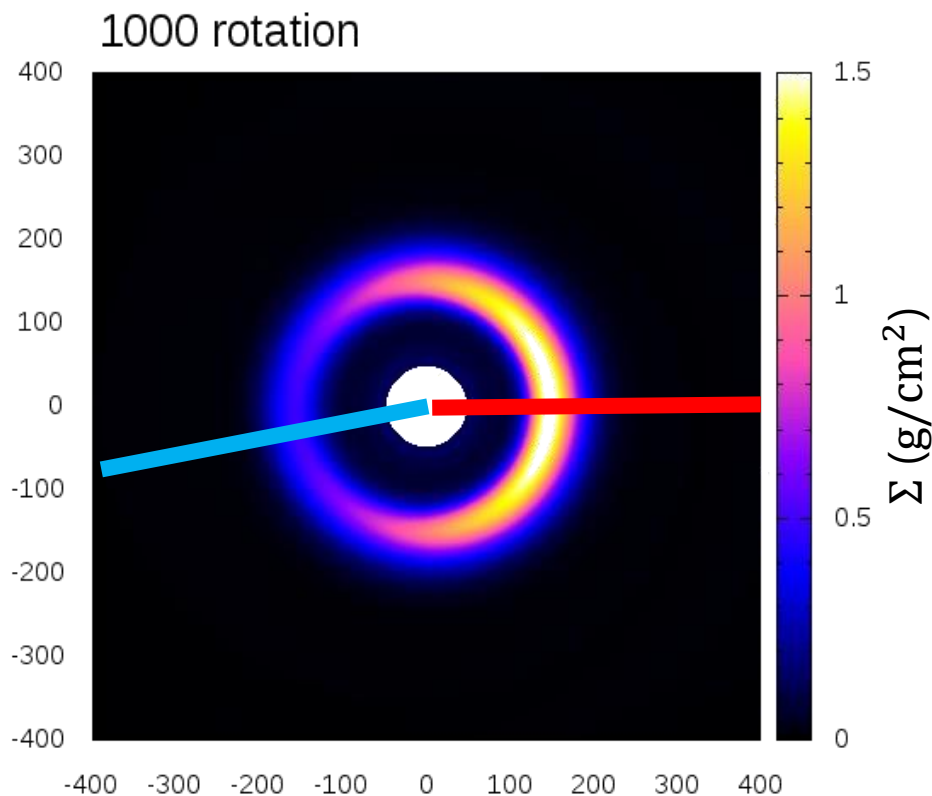


面密度分布の時間進化

$r = 50 - 300$ AU

1000 rot. @ 100 AU \sim 1 Myr

200周までは1周ごと、それ以後は10周毎にプロット



他にも色々考えないといけない

今回考慮していない物理機構

粘性 渦の形成には影響微小
 渦の寿命を縮める

ダスト粒子 渦の形成には影響微小
 渦の寿命を縮める

円盤自己重力 渦の形成を阻害
 渦の寿命を縮める

→ 基本的に渦を壊す効果を持つ物理機構が多い

渦移動

惑星 ギャップ内に惑星があれば
 渦移動を抑制できる？

まとめ

- RWIで作った渦について
2個の状態は 10^5 yr以内しか維持できない@100 AU
- RWI渦で観測されるのは
 - 渦幅 1.5 H以下
 - 渦のアスペクト比 $\chi \gtrsim 6$
 - 面密度コントラスト $\xi \lesssim 5$程度であると予想される
- 渦は内外2本ずつのスパイラルを励起する
- 渦が存在する時の回転角速度の
ケプラーからのズレは音速の0.5倍程度 ← 観測できる？
- 現実的には粘性・ダスト・自己重力などの効果を
考えなくてはならない
- 渦移動に関して惑星を置いた場合等についても
考えなくてはならない