



原始惑星系円盤上における ガス巨大渦の構造

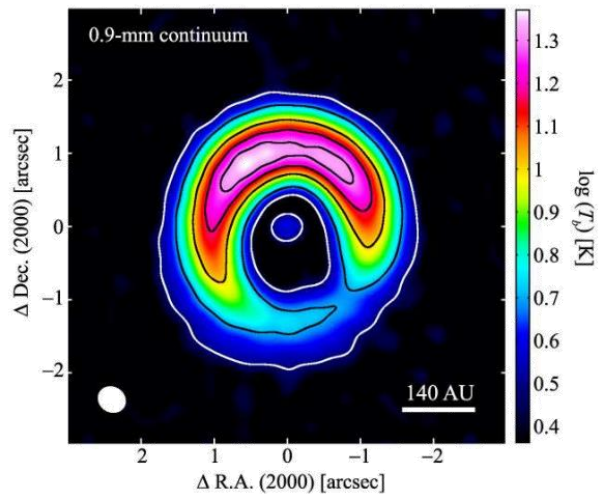
小野 智弘 (京都大学 宇宙物理学教室)、
武藤 恭之 (工学院大学)、
富田 賢吾 (大阪大学)、 Zhaohuan Zhu (UNLV)

次々と明らかになる原始惑星系円盤の構造

近年の原始惑星系円盤観測によって(e.g., Subaru, GPI, VLA, ALMA)
多様な円盤構造が見つかるようになってきた

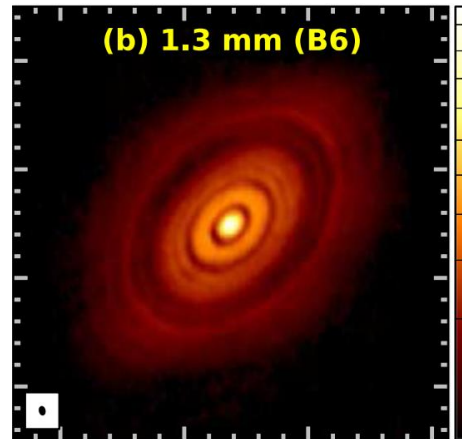
ALMAによって観測された特徴的な構造

三日月状 (e.g., HD142527)



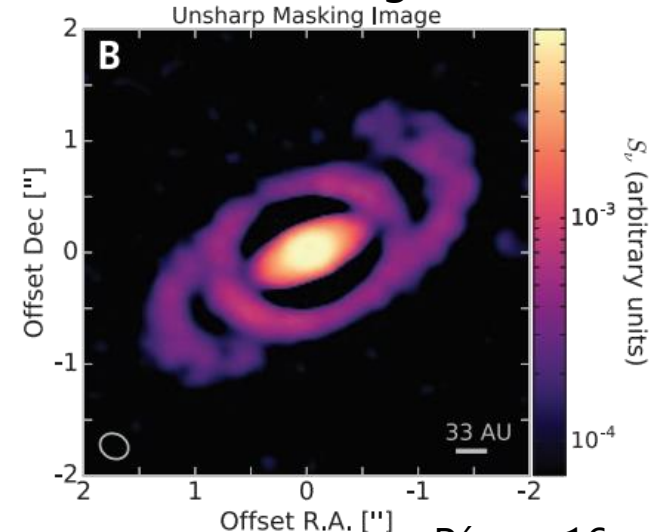
Fukagawa+13

リング (e.g., HL Tau)



ALMA Partnership+15

スパイラル (e.g., Elias 2-27)



Pérez+16

円盤構造の成因や惑星形成への影響を知りたい

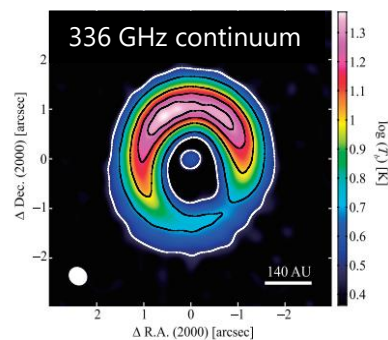
観測される円盤三日月状構造の理解

観測

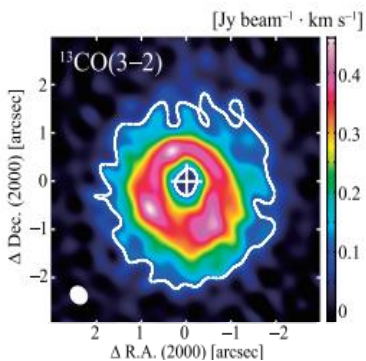
三日月状構造

ex) HD142527

ダスト



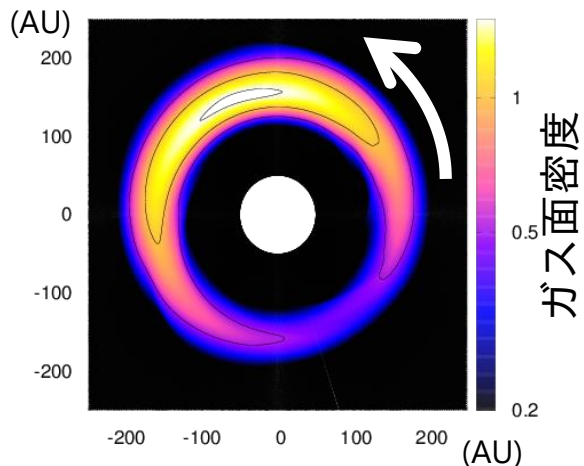
ガス



(Fukagawa+13)

観測の説明

巨大ガス渦

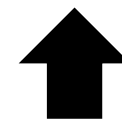


ガス渦はダストを
集積・濃縮

(Barge&Sommeria95)

渦形成機構

- ロスビー波不安定性 (Lovelace+99)
 - 傾圧不安定性 (Klahr & Bodenheimer03)
- etc...



渦形成機構が
働く円盤環境

- 惑星の存在
- 円盤進化

観測される円盤三日月状構造の理解

観測

三日月状構造

観測の説明

巨大ガス渦

渦形成機構

- ロスビー波不安定性 (Lovelace+99)
- 傾圧不安定性 (Klahr & Bodenheimer03) etc...

観測から円盤環境に制限を付けたい！

どのような円盤環境から

どのような渦形成機構で

どのようなガス渦が形成され

どのように観測されるのかを調べる

渦形成機構が
働く円盤環境

- 惑星の存在
- 円盤進化

観測される円盤三日月状構造の理解

観測

三日月状構造

観測の説明

巨大ガス渦

渦形成機構

- ロスビー波不安定性 (Lovelace+99)
- 傾圧不安定性 (Klahr & Bodenheimer03) etc...

観測から円盤環境に制限を付けたい!

どのような円盤環境から

~~どのような渦形成機構で~~

ロスビー波不安定性で

どのようなガス渦が形成されるのか

~~どのように観測されるのか~~を調べる

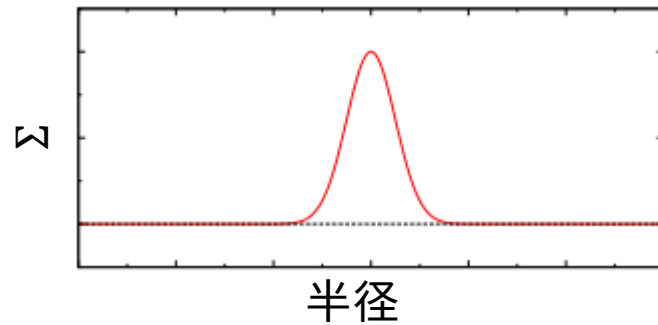
渦形成機構が
働く円盤環境

- 惑星の存在
- 円盤進化

ロスビー波不安定性[RWI]

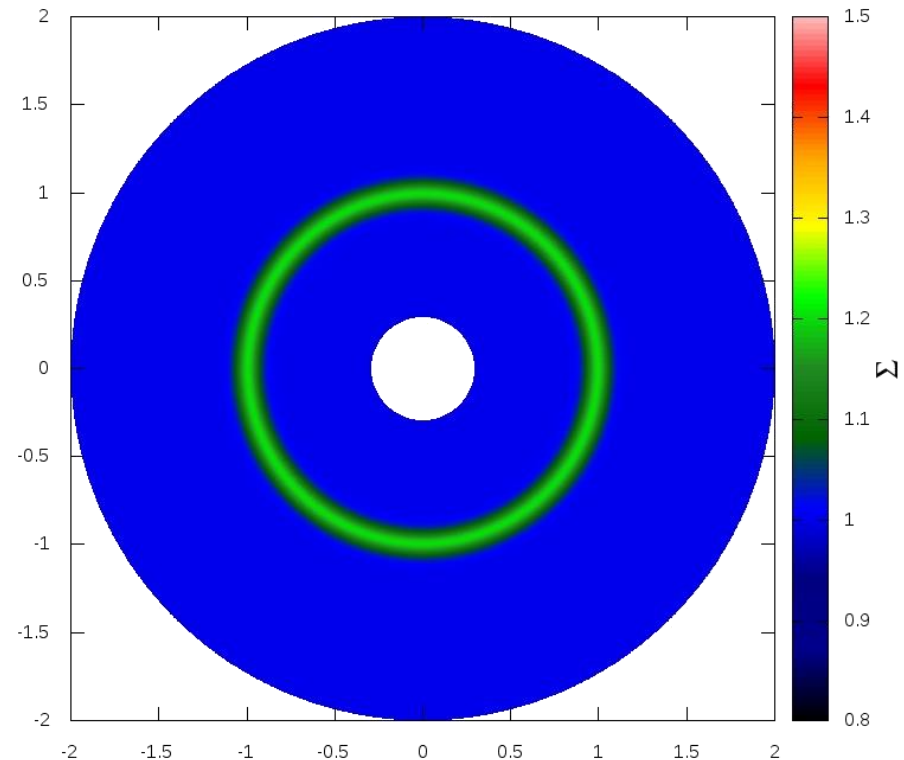
急な動径変化を持つ軸対称構造を分裂させる流体不安定性
結果として渦が形成される

面密度バンプ



1. 複数の渦形成 (～10回転)
2. 渦の合体
3. 準定常な渦(RWI渦)
円盤内側方向にゆっくり移動 (～100回転)

20 rot. @r=1

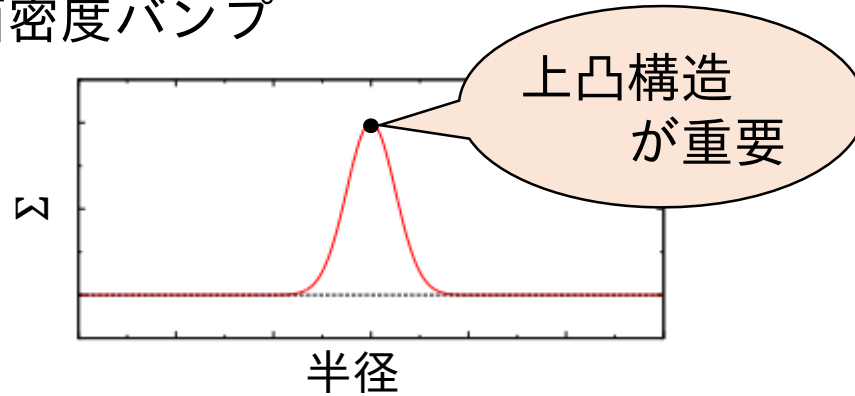


#r=1での回転系

ロスビー波不安定性[RWI]

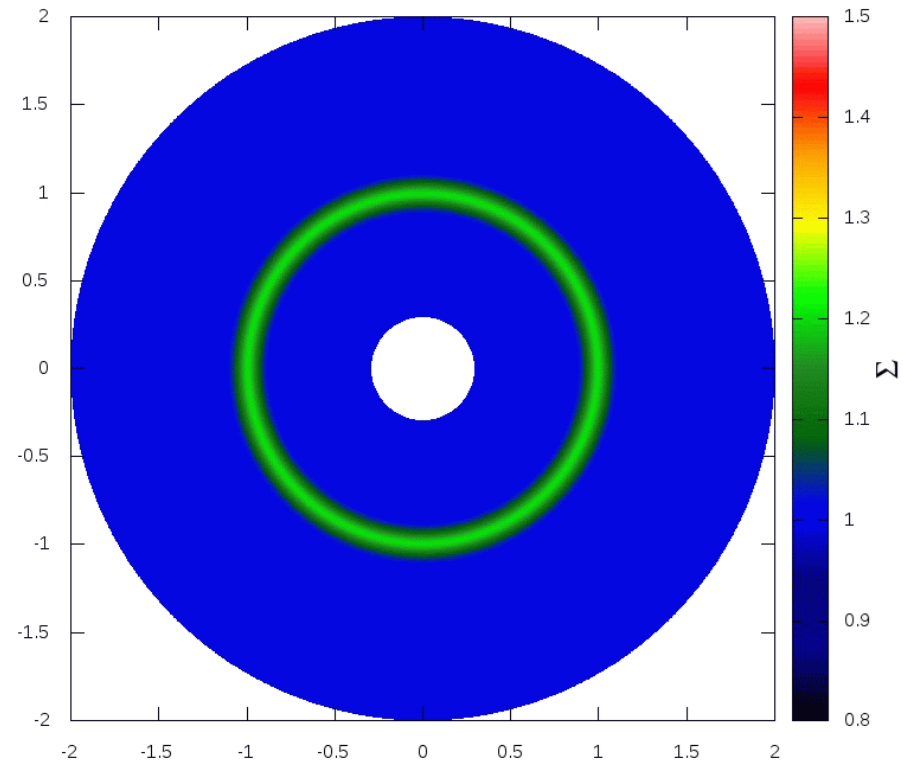
急な動径変化を持つ軸対称構造を分裂させる流体不安定性
結果として渦が形成される

面密度バンプ



1. 複数の渦形成 (~10回転)
2. 渦の合体
3. 準定常な渦(RWI渦)
円盤内側方向にゆっくり移動 (~100回転)

20 rot. @r=1

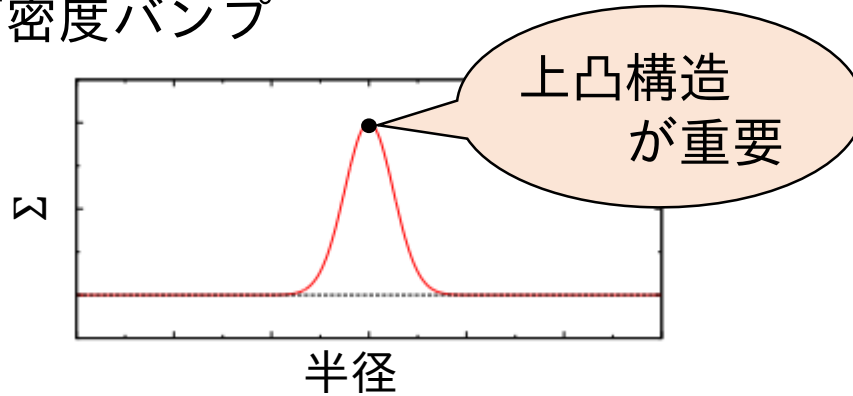


#r=1での回転系

ロスビー波不安定性[RWI]

急な動径変化を持つ軸対称構造を分裂させる流体不安定性
結果として渦が形成される

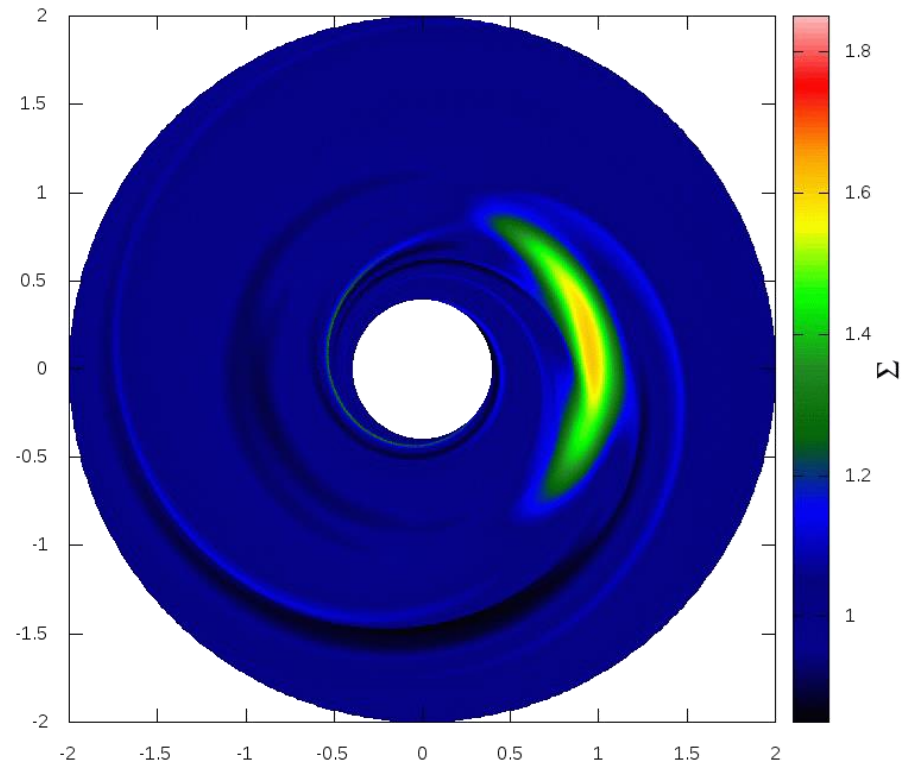
面密度バンプ



1. 複数の渦形成 (~10回転)
2. 渦の合体
3. 準定常な渦(RWI渦)
円盤内側方向にゆっくり移動 (~100回転)

中心面密度が
上昇しながら

800 rot. @r=1

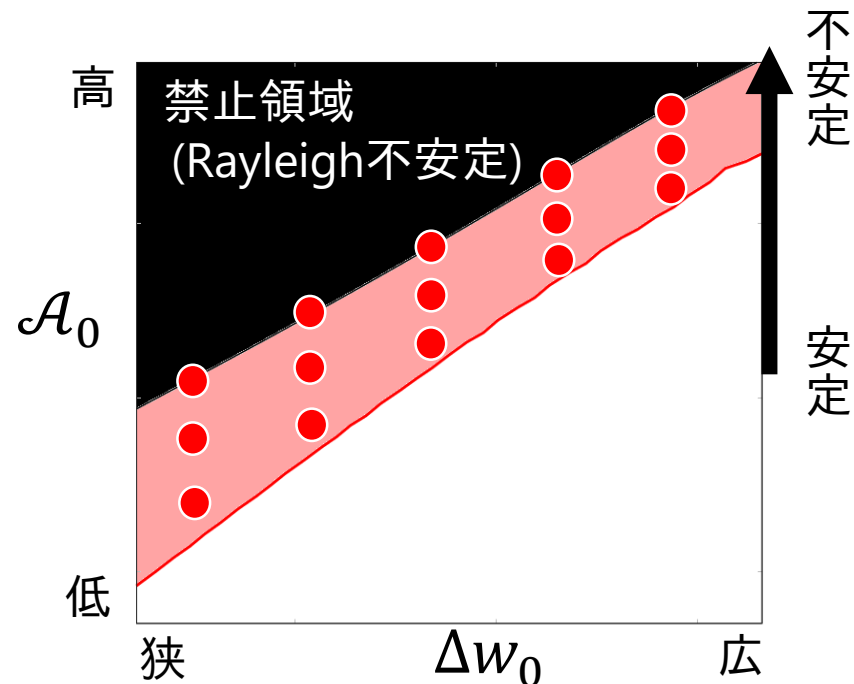
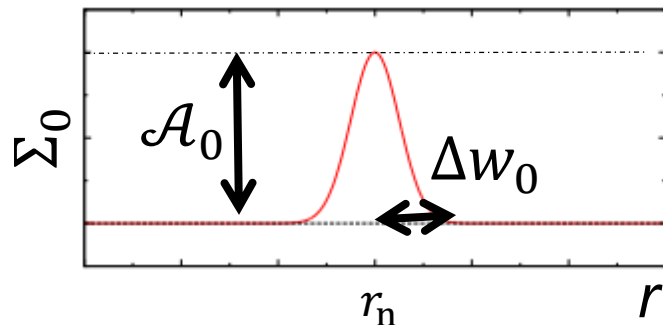


#渦中心の共回転系

円盤モデルと計算設定

- 2D ($r - \varphi$)理想流体円盤
- 順圧近似 ($P \propto \Sigma^\Gamma$)
- 定常・軸対称な初期条件
- パラメータは3つ
 - ✓ 初期面密度分布 Σ_0
 - ✓ 無次元音速 h
 - ✓ 有効断熱指数 Γ

初期面密度分布は gaussian バンプ



- コード: Athena++
- 計算領域: (r) $[0.3r_n:2.5r_n]$, (φ) $[-\pi:\pi]$
- 解像度: (r) $576 \times$ (φ) 1596
- B.C. (r): outgoing, (φ): periodic
- $\Gamma = 5/3$, $h = [0.05, 0.1, 0.15, 0.2]$ で $A_0, \Delta w_0$ を変化させ、計54モデル

定常渦モデル

Kida 1981

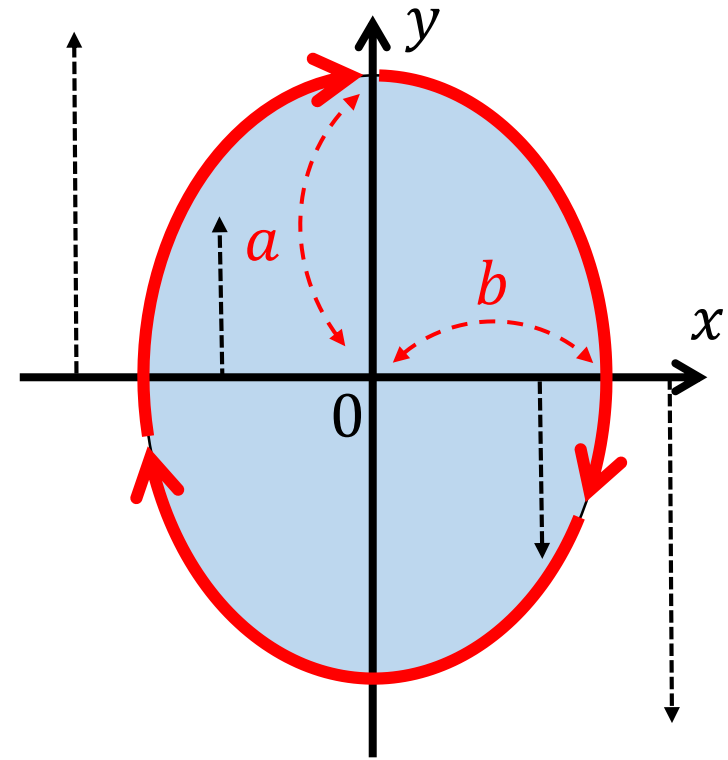
局所・ケプラーシア一流上で
定常な一様渦度の楕円渦が満たす条件

- ① 楕円の軸が背景シア一流に
平行 or 垂直
- ② 渦アスペクト比($\chi \equiv a/b$)と
渦のturnover time (ψ)が
 $(\chi - 1) \equiv 1.5\psi$

ψ は座標(回転系)の回転周期で規格化

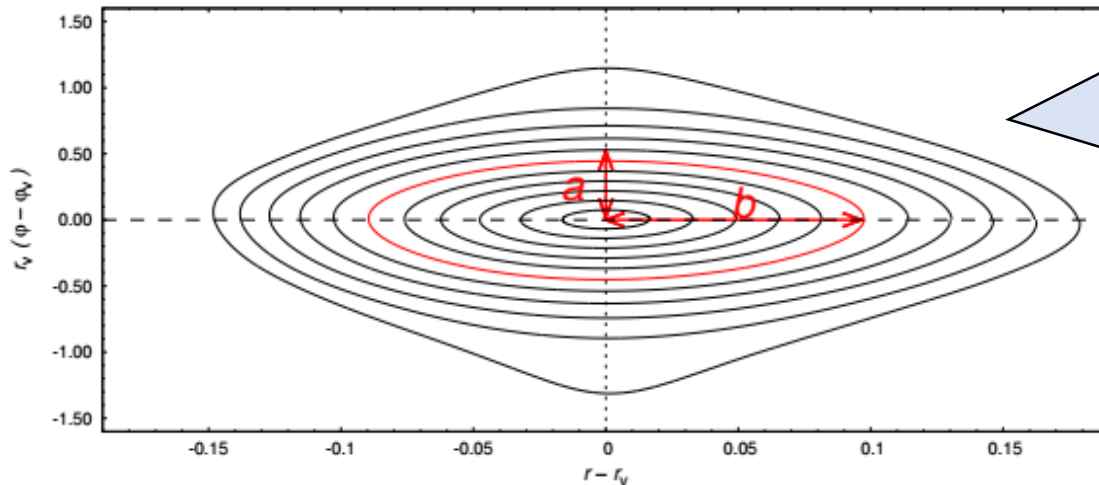
この時の速度場は $\bar{v}_x = \frac{1}{\chi\psi} \Omega_c y$ $\bar{v}_y = -\frac{\chi}{\psi} \Omega_c x$

Ω_c は座標の回転角速度



ある初期条件で形成される渦の流線

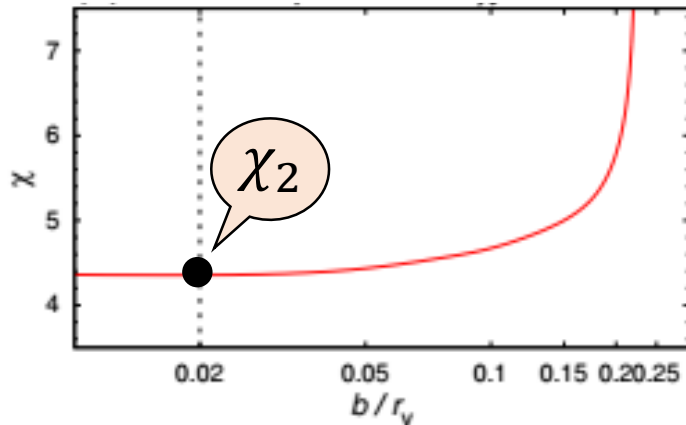
流線 $[(r - r_v) - r_v(\varphi - \varphi_v)]$ 平面



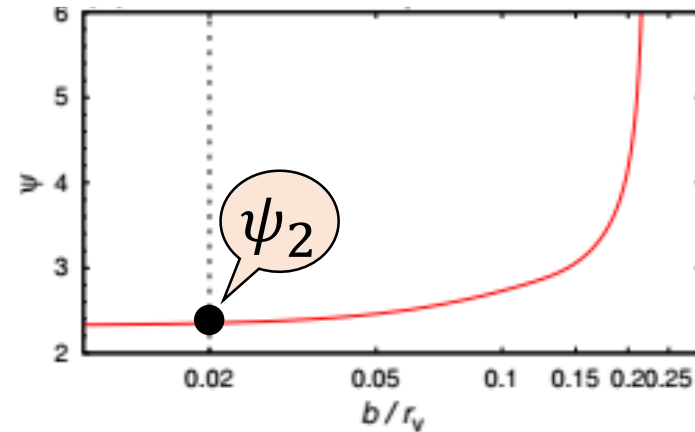
- 渦中心の位置は (r_v, φ_v)
- 流線はほぼ閉じている
→ 渦は準定常

(注)
流線は方位方向に
伸びた楕円形状

アスペクト比 χ の渦内分布



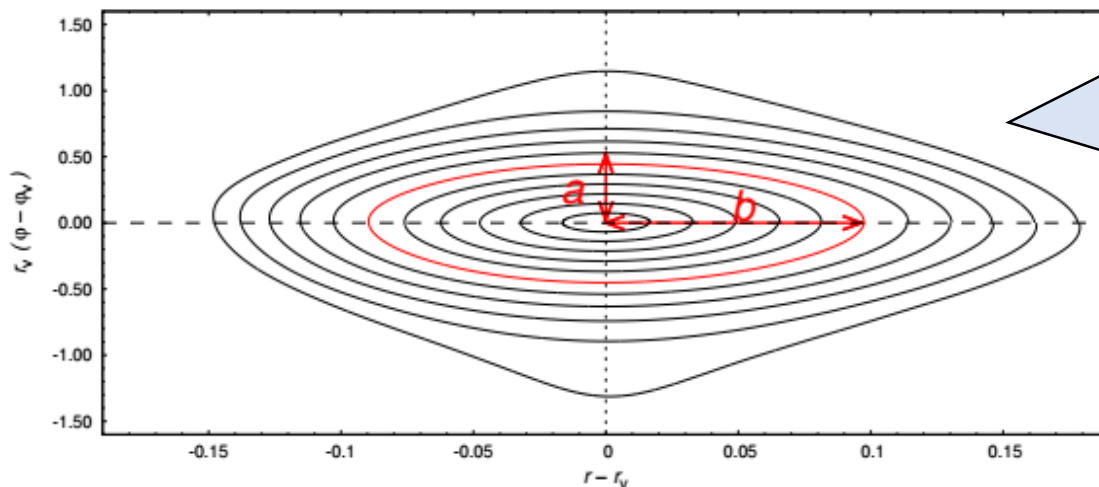
turnover time ψ の渦内分布



どちらも渦中心付近でほぼ一定、渦外縁で急増

ある初期条件で形成される渦の流線

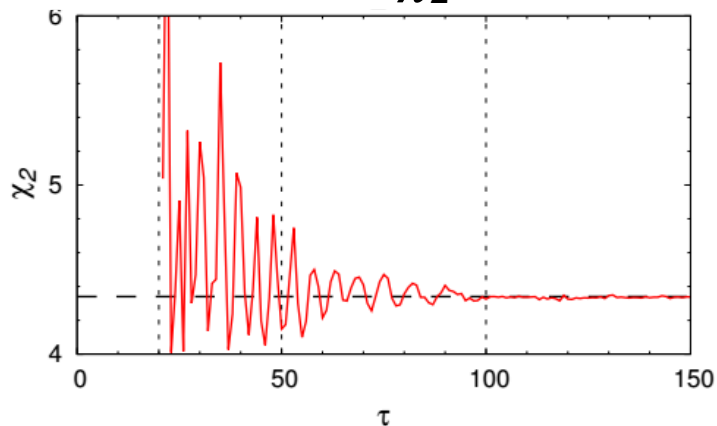
流線 $[(r - r_v) - r_v(\varphi - \varphi_v)]$ 平面



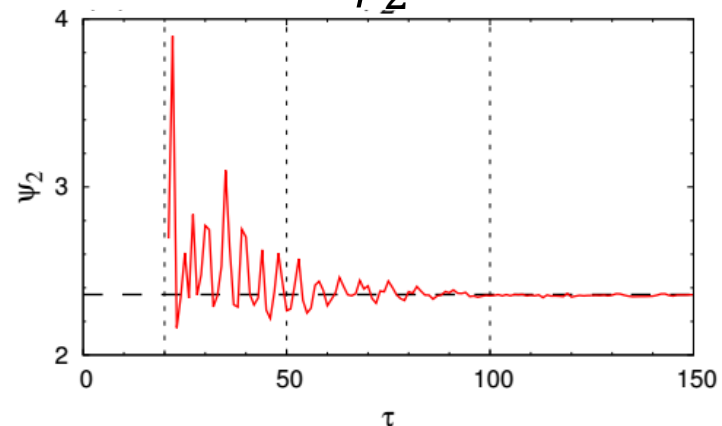
- 渦中心の位置は (r_v, φ_v)
- 流線はほぼ閉じている
→ 渦は準定常

(注)
流線は方位方向に
伸びた楕円形状

アスペクト比 χ_2 の時間進化



turnover time ψ_2 の時間進化

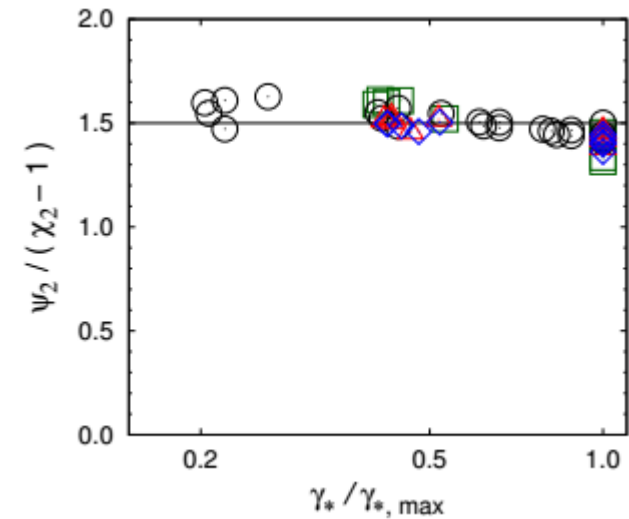


時間が十分経過すると χ_2, ψ_2 共に一定値に落ち着く

RWI渦と定常解との比較

全パラメータで収束後の χ_2 と ψ_2 を測定
定常解が要請する関係式をほぼ満たす
$$(\chi_2 - 1) \approx 1.5\psi_2$$

渦中心における速度構造も
定常解からの予想とほぼ一緒



RWIで形成される渦は定常解とほぼ同一とみなせる

まだ残っている問題

- ① 初期条件からアスペクト比 χ_2 を推定できるか？
- ② 定常解から分かるのは速度構造のみ. . .
渦のサイズ、渦移動速度、渦面密度コントラスト
は推定できる？

初期条件からの χ_2 推定

Richard+13では渦度比一定を仮定することで初期条件からアスペクト比を推定する方法を提案している

$$\frac{1 + \chi_r}{\chi_r(\chi_r - 1)} = \left[\frac{d\{r(v_{\varphi 0} - v_K)\}}{dr} / \frac{\partial\{r(v_K - r\Omega_n)\}}{\partial r} \right] @ \text{ peak of initial bump}$$

χ_r Richard+13の方法で見積もられたアスペクト比

RWIの線形成長率が大きい時

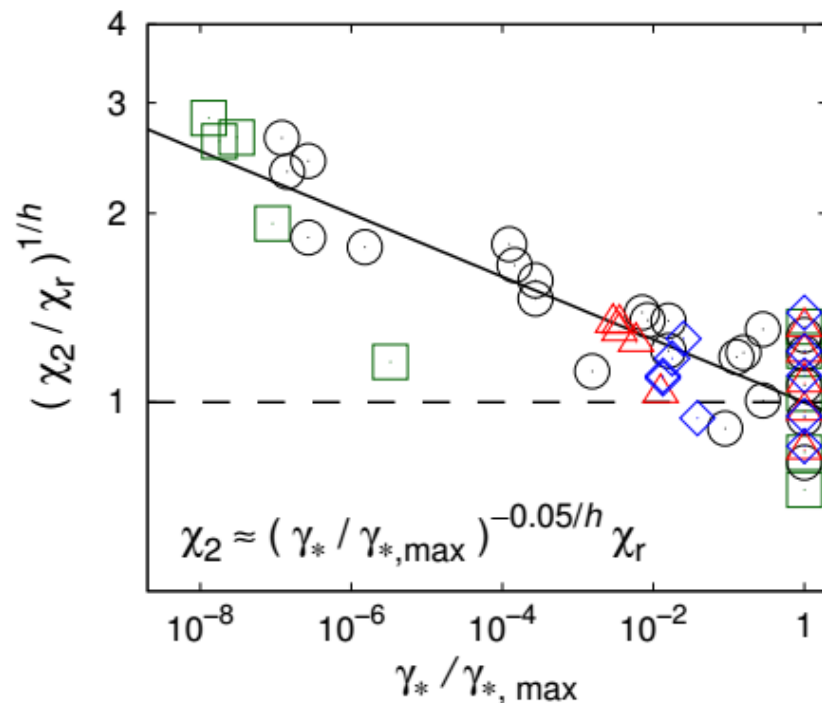
$$\chi_2 \approx \chi_r$$

RWIの線形成長率が小さい時

$$\chi_2 > \chi_r$$

→ χ_2 を求める経験式を得た

$$\chi_2 \approx \left(\frac{\gamma_*}{\gamma_{*,\max}} \right)^{-0.05/h} \chi_r$$



サイズ・移動速度・面密度コントラストの推定

A) 渦サイズ (渦の動径幅 Δr , 方位幅 $r_v \Delta \varphi$)

経験式

$$r_v \Delta \varphi \approx 1.1 \sqrt{\chi_2 \Delta w_0 r_n},$$
$$\approx 0.87 \left(\frac{\gamma_*}{\gamma_{*,\max}} \right)^{0.2} \chi_2 \Delta r$$

B) 渦移動速度 ($dr_v/dt = -\xi \Omega_v$, ξ : 定数)

経験式

$$\xi \approx 3.0 h r_v \Delta \varphi \chi_2^{-4}$$

Ω_v は渦中心の回転角速度

渦移動タイムスケールは $\left| \frac{r_v}{dr_v/dt} \right| = \frac{r_v}{\xi \Omega_v} \approx \frac{\chi_2^4}{3h\Delta\varphi} \Omega_v^{-1},$

$$\approx 1.96 \text{ Myr} \left(\frac{\chi_2}{6} \right)^4 \left(\frac{h}{0.1} \right)^{-1} \left(\frac{\Delta w_0}{0.1 r_n} \right)^{-0.5} \left(\frac{r_v}{100 \text{ AU}} \right)^{2.5}$$

原始惑星系円盤の典型的な寿命は1-10 Myr なので

$\chi_2 > 5$ の長細い渦であれば渦移動は十分遅い

C) 渦面密度コントラスト ζ_v ($\zeta_v = \bar{\zeta}_v \exp[\mu(1 - r_v)/\xi]$, $\bar{\zeta}_v, \mu$: 定数)

経験式

$$\bar{\zeta}_v \approx 1 + 0.35 (\mathcal{A}_0/h)^{2/3}$$

$$\mu \approx (10/3) \chi_2^{-(10/3)} h^{2/3} (\Delta w_0)$$

渦が持つ構造・性質を初期条件から推定できるようになった

HD142527に関して分かっていること

HD142527 はダスト観測で
三日月状構造が確認されている
(e.g., Fukagawa+13)

ガス渦があるとすると、
渦の性質に制限が与えられている

無次元音速 $h \sim 0.1$ (Muto+15)

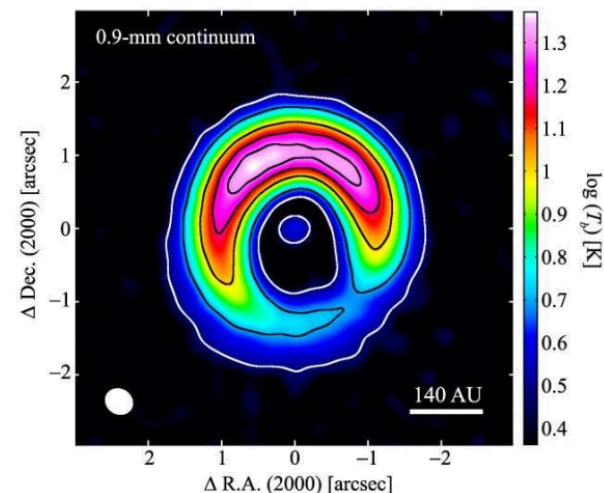
面密度コントラスト

$$\left[\begin{array}{l} \zeta_v \sim 3 - 10 \quad (\text{Muto+15}) \\ \sim 3.75 \quad (\text{Boehler+17}) \end{array} \right.$$

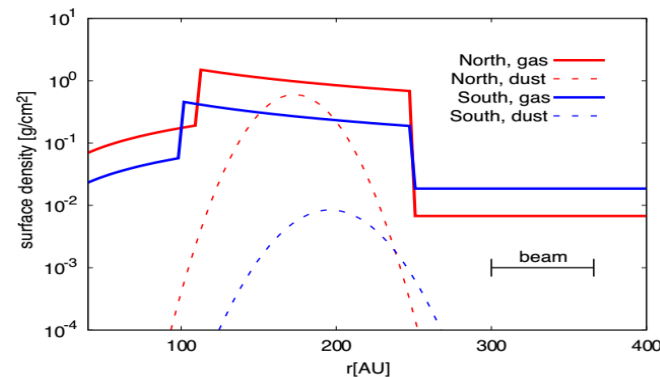
ダストアスペクト比が
ガスアスペクト比と同様なら (Lyra & Lin13)

$\chi \sim 8 - 10$ from the results of Soon+17

HD142527



Fukagawa+13



Muto+15

HD142527からの推測

$\chi \sim \chi_2 \sim 8 - 10$, $r_n \sim 150$ AU, $h \sim 0.1$ なら
渦移動は十分ゆっくり (~ 4.4 Myr)

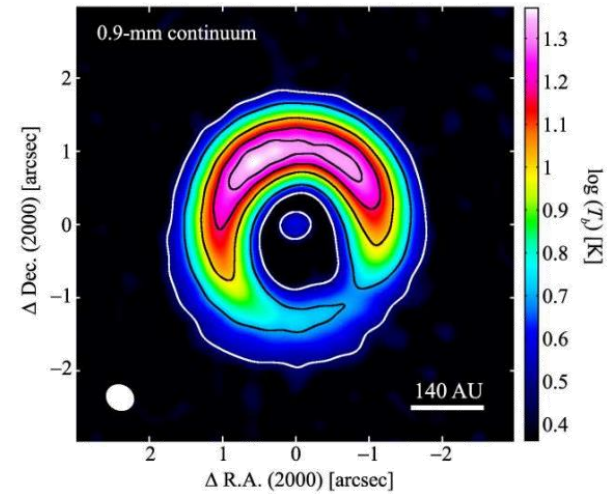
仮定: 初期のガウシアンバンプから
RWIでガス渦がその場形成
 $\zeta_v \sim \bar{\zeta}_v \sim 4$

経験則と線形安定性解析より、
初期のガウシアンバンプを推定すると
 $\mathcal{A}_0 \sim 2.5$, $\Delta w_0 / r_n \sim 0.15$

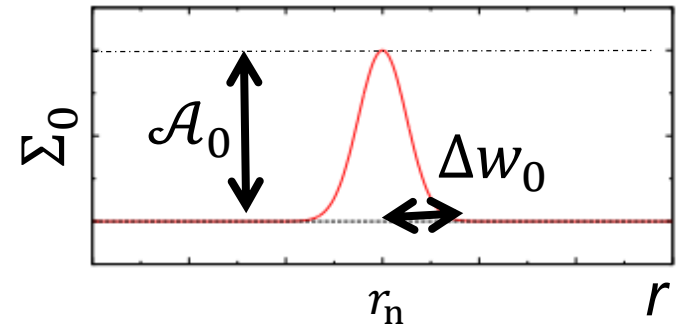
HD142527円盤は

$\mathcal{A}_0 \sim 2.5$, $\Delta w_0 / r_n \sim 0.15$ の軸対称バンプ
(or それと同等の上凸性を持つ構造)
が形成される環境なのかもしれない

HD142527



Fukagawa+13



より現実的な円盤で計算を必要性

我々が扱っている円盤モデルは簡単化しすぎている

RWIに対する効果

円盤自己重力

傾圧性

渦を破壊する効果

粘性

ダスト粒子

3D効果

磁場

さらなる
パラメータサーチ

他の Γ

観測と直接的な比較のためには
多様な物理効果を追加で考慮することが必要

まとめ

- ガウシアンバンプ面密度分布からロスビー波不安定性(RWI)で形成される渦の性質についてパラメータサーベイを行った
- 形成される渦は定常解と似た構造を持つ
- 初期条件から、形成される渦のアスペクト比・サイズ・移動速度・面密度コントラストを推定する経験式を得た
- 渦移動速度はアスペクト比に強く依存し、細長い形状であるほど渦移動は遅い
- HD142527円盤は面密度コントラスト ~ 2.5 , 幅 ~ 20 AU の面密度構造が形成される環境なのかもしれない
- 多様な物理効果を追加で考えなくてはならない