

周惑星円盤における 回転不安定性の考察

～Ono et al. 2014, ApJ, 787, 37 の周惑星円盤への応用～

発表者：小野 智弘
(京都大学 宇宙物理教室 M2)

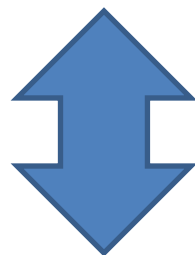
共同研究者：野村 英子・竹内 拓(東京工業大学)

衛星系研究会2014@北大低温研

周惑星円盤と原始惑星系円盤

- 周惑星円盤・・・衛星形成の場合, 中心は惑星
 - 原始惑星系円盤・・・惑星形成の場合, 中心は星
- 中で起こる物理の多くは相似形と考えられる

これらの降着円盤の進化を考えることは
惑星系・衛星系を理解する上で重要



円盤内でどのように角運動量輸送が起こるか

角運動量輸送の機構

物質を中心に落としたい

➡ 角運動量を系の外に輸送する

一般的に考えられる機構

- 差動回転による粘性トルク
- 重力トルク
- ジェット・アウトフロー など

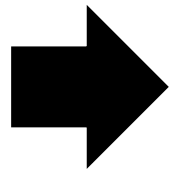


粘性の起源が重要

粘性の起源

一般的には

磁気流体不安定の結果, 乱流粘性が発生



磁場がないと粘性が発生しない？

流体不安定でも乱流粘性は発生する

本研究

粘性進化する円盤の外側領域で
流体不安定が起こることを発見した

Lynden-Bell & Pringle 1974 のモデル

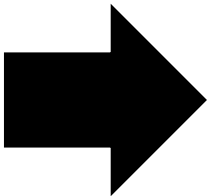
仮定

- 乱流粘性により粘性進化する円盤を扱う
- 常に **ガス圧** $\ll$ **中心星重力** とする
- + その他(軸対称, 円盤自己重力無視 等)

この仮定の下, ガス面密度進化の式を立てる

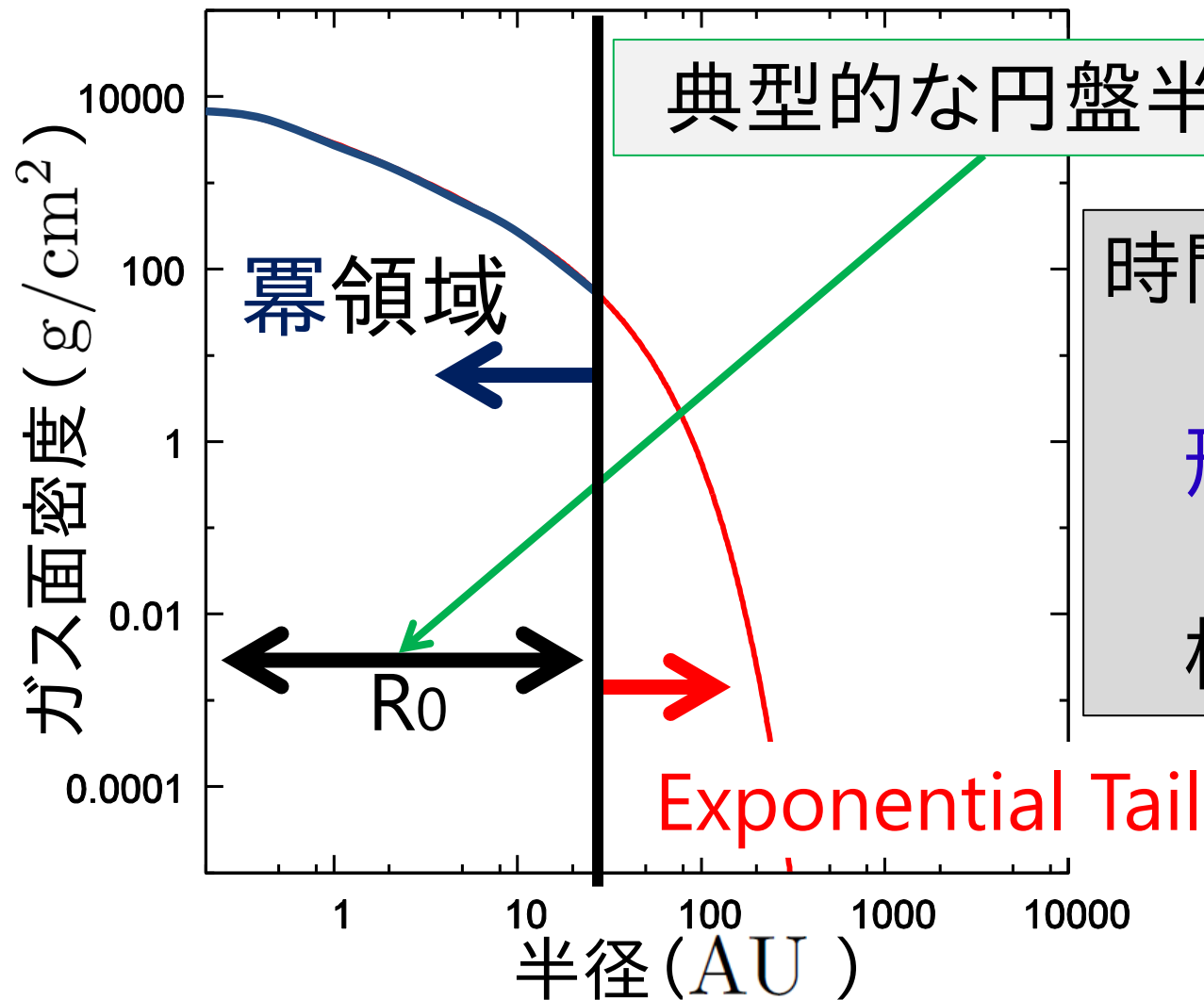
$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left[3R^{1/2} \frac{\partial}{\partial R} \left(\nu \Sigma R^{1/2} \right) \right]$$

(Lynden-Bell & Pringle 1974; Pringle 1981)

 ガス面密度の解析解が得られる

相似解

相似解の詳細



時間と共に
 R_0 は増加
形は変化無し
⇕
相似的に進化

相似解の利用

相似解の魅力は

円盤ガス面密度進化が解析的に得られること

観測的利用

観測結果を相似解で
フィッティング

➡ 円盤の性質を得る
(大きさ、質量 等)

理論的利用

複雑な物理を考える時、
簡単のためにガス面密
度分布が相似解で表わ
されると仮定する

相似解への疑問

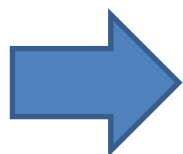
回転円盤中において
ガス圧～中心星重力



回転不安定性

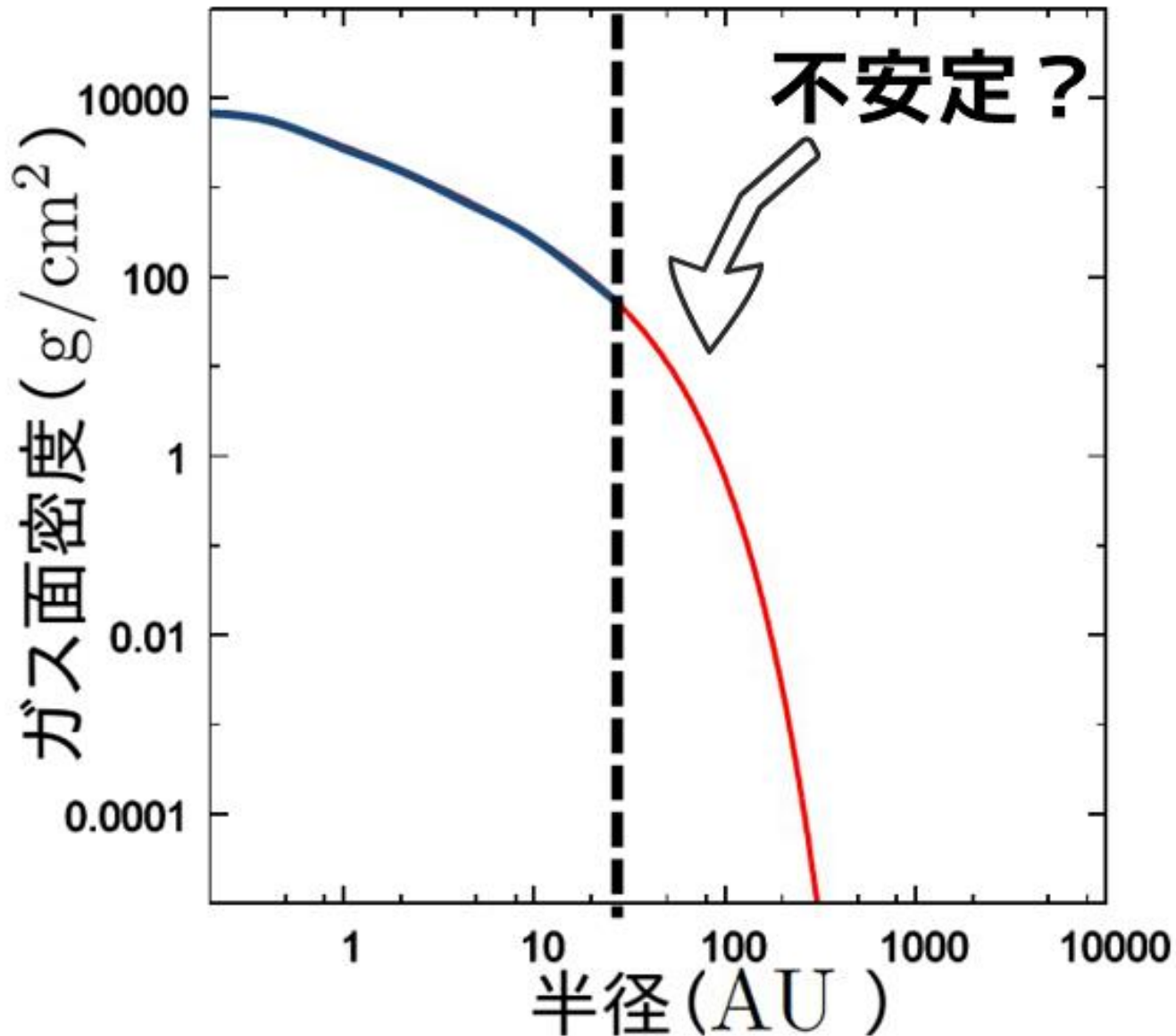
(Chandrasekhar 1961)

- 相似解のExponential Tailは
密度勾配が大きく **ガス圧が大きい**
- 中心星から遠い, 円盤外側領域では
中心星重力は弱くなる



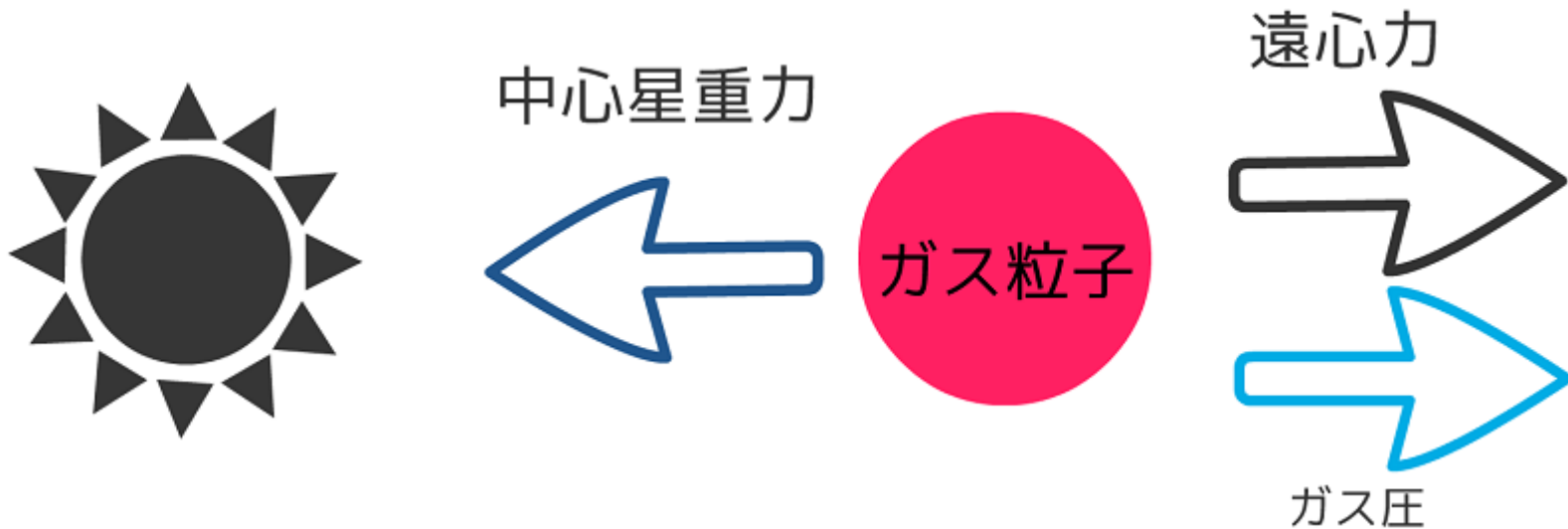
相似解の外側は不安定？

相似解への疑問



回転不安定とは

ガス粒子の動径方向の釣り合い



回転不安定とは

ガス粒子が角運動量を保存して
外側へ摂動したとする

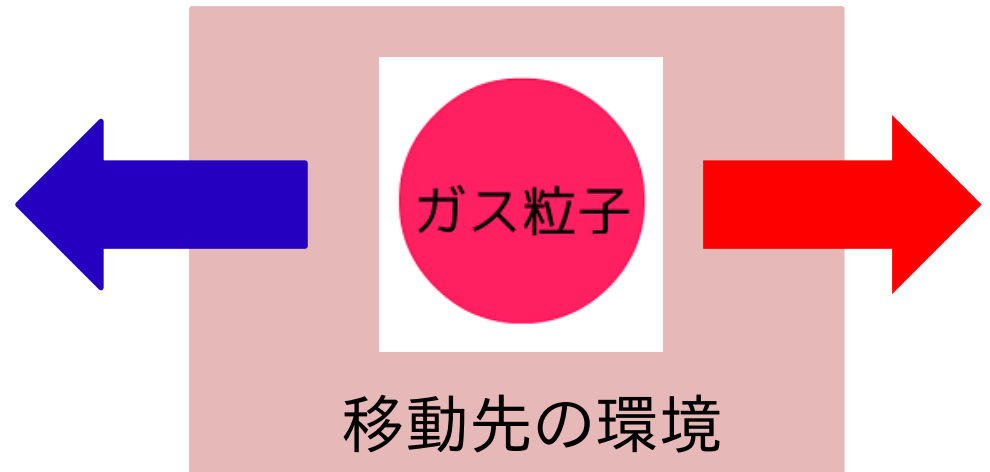


ガス粒子

ガス粒子

回転不安定とは

移動先環境は動径方向に力が釣り合っている



- ガス粒子が持つ角運動量が環境に比べ
小さい時→内側に移動→安定
大きい時→外側に移動→不安定

軸対称回転安定の条件

- 非粘性回転円盤+対流なし

Rayleigh 条件 $\frac{\partial j^2}{\partial R} > 0$ (jは比角運動量)

- 非粘性回転円盤+対流

Solberg-Hoiland 条件

対流が不安定を助長

- 粘性回転円盤+対流なし

Taylor 数が臨界値以下

粘性が不安定を阻害



今回は
これを使う

モデル

- 動径 R は円盤の典型的な半径 R_0 で規格化, 規格化された半径を r
- 局所等温を仮定 $P = c_s^2 \rho$
- 温度分布はpower-lawを仮定 $T = T_0 r^{-\beta}$
今回は $\beta = 1/4$ とする (Tanigawa+2011)
- 幾何学的に薄い円盤を仮定 $H \ll R$

注意

- $R=R_0$ でのスケールハイトを H_0 とし、
本研究において H_0/R_0 が重要

本研究では H_0/R_0 が=0.1, 0.2, 0.3を考える

H_0/R_0 は円盤の温度に対応しており、

H_0/R_0 が大 → 高温

H_0/R_0 が小 → 低温

やったこと1

面密度分布: 相似解

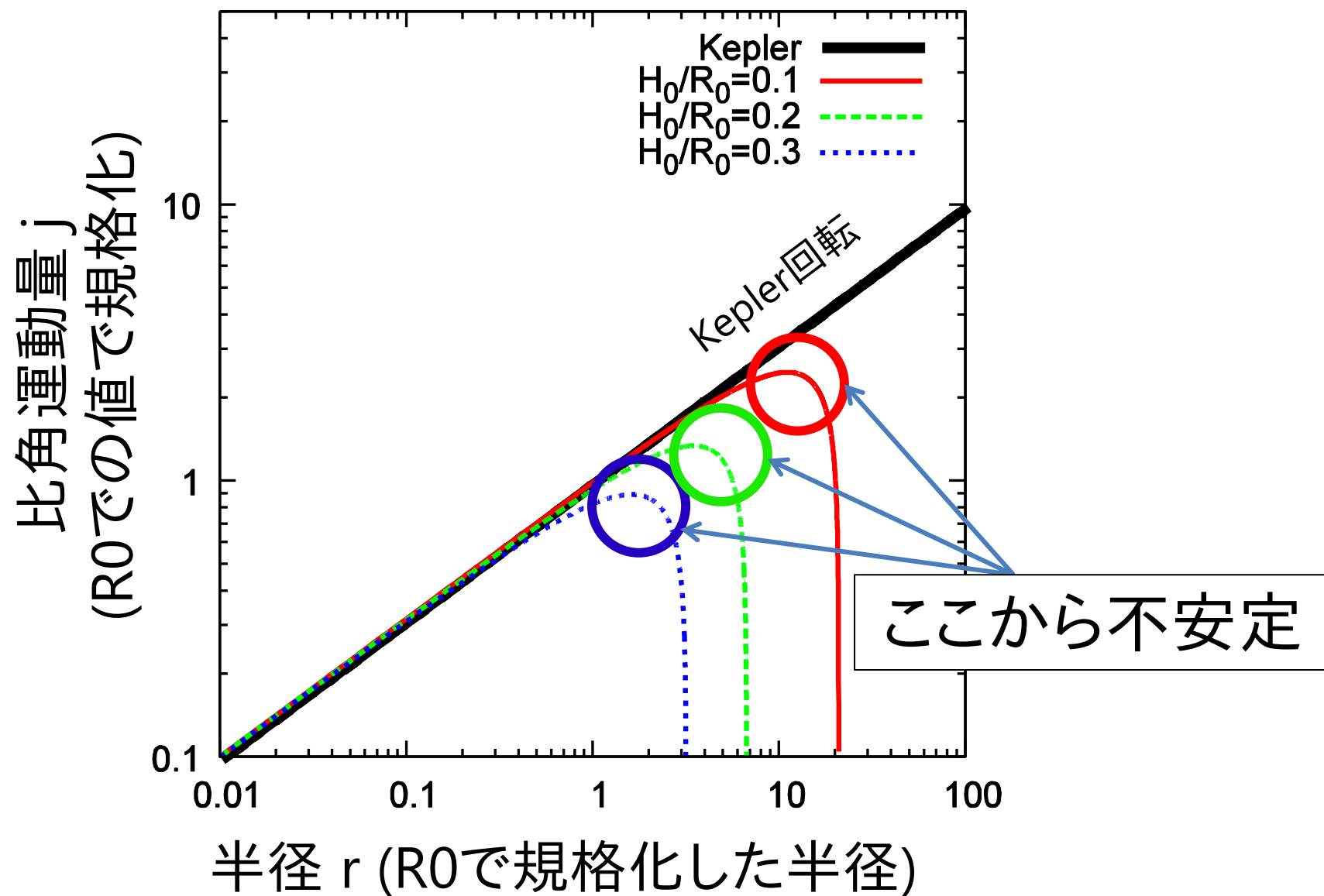
温度分布: power-law($T = T_0 r^{-\beta}$) より

動径方向の釣り合いの式

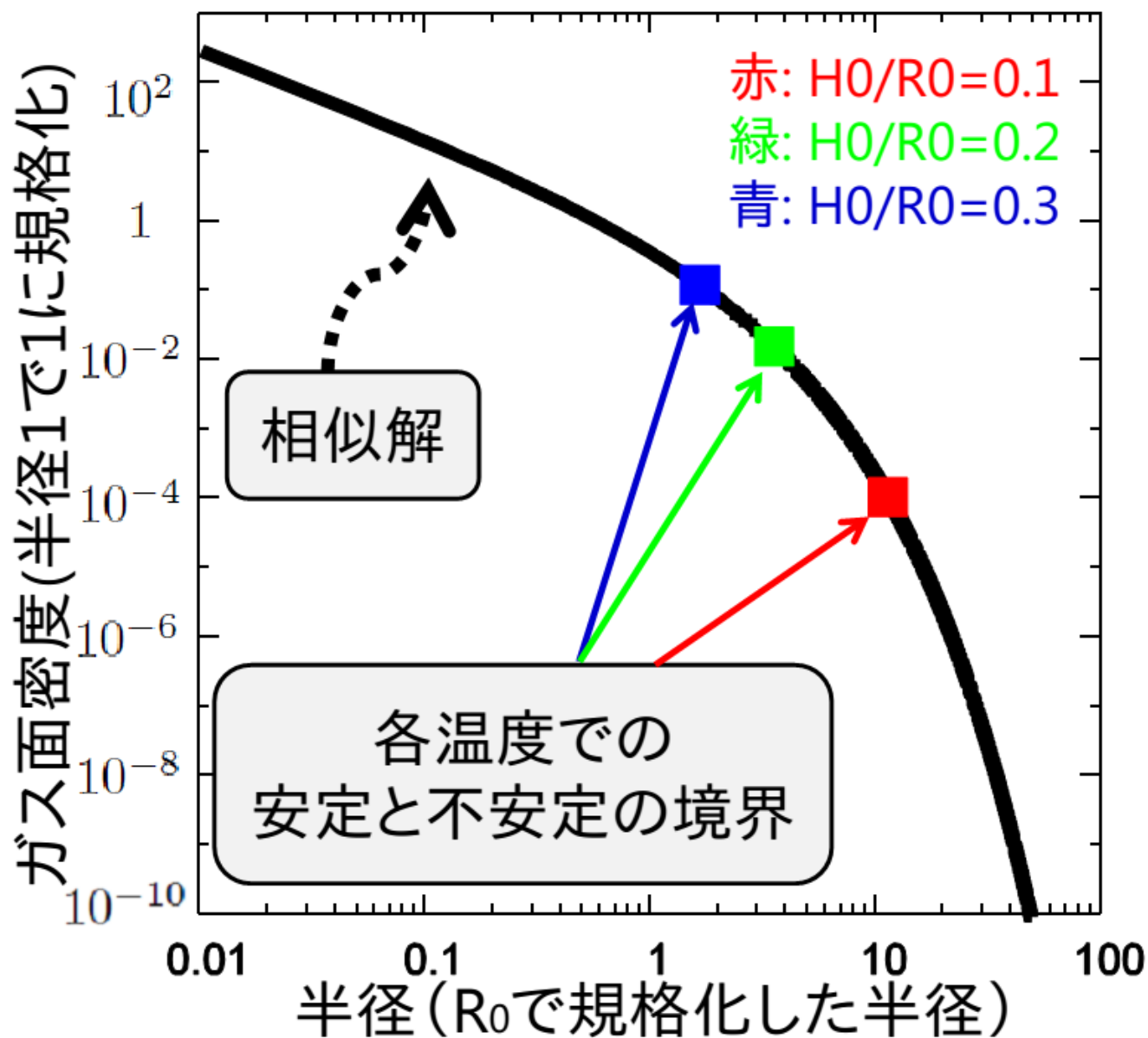
$$\frac{j^2}{R^3} = \frac{GM}{R^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial R} \quad \text{を使って}$$

回転速度分布(比角運動量分布)を求めた

相似解の回転不安定性(軸対称)1



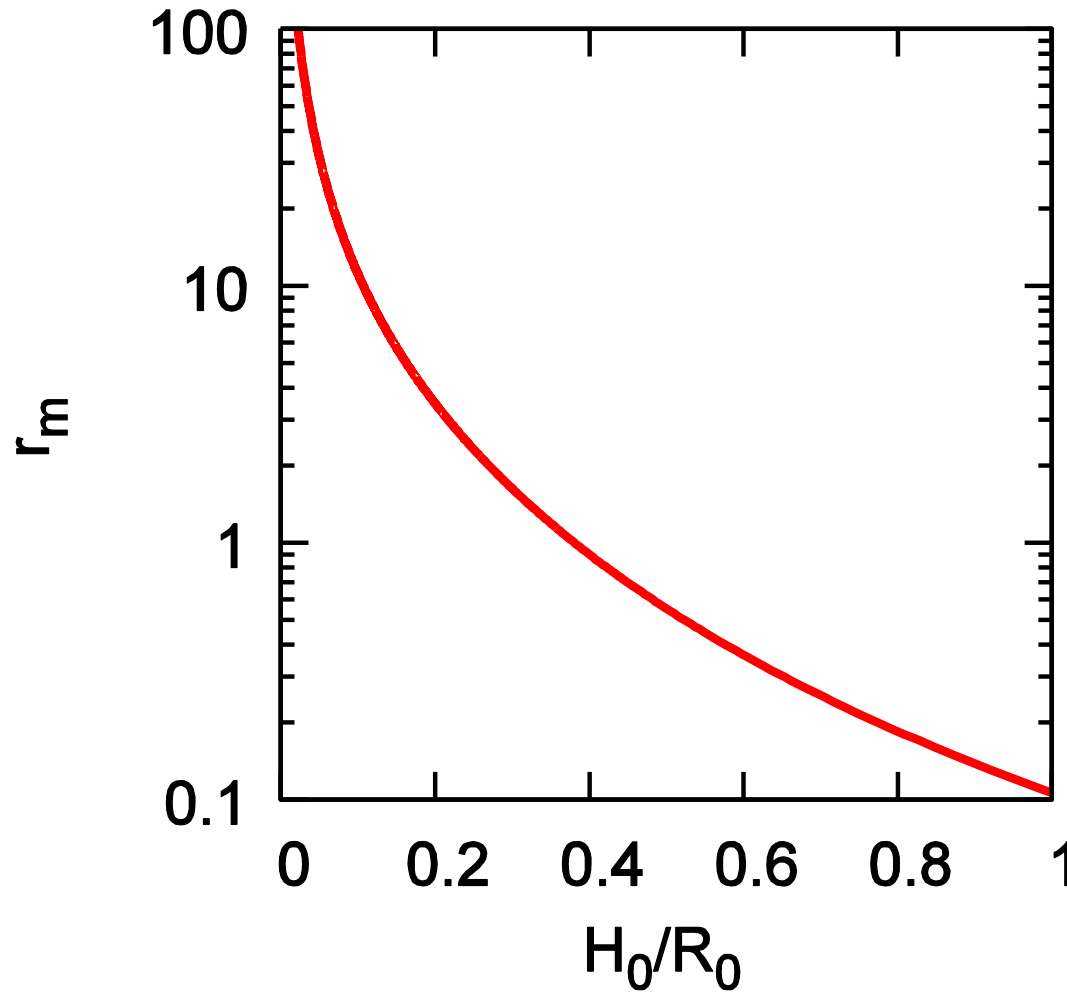
相似解の回転不安定性(軸対称)2



相似解の回転不安定性(軸対称)3

相似解が不安定になる半径を r_m とする

r_m と H_0/R_0 の関係



不安定が起こったらどうなるのか？

実際どうなるのかは
数値計算しなくては分からない

簡単に考える為に2つの仮定

- 不安定になると不安定と安定の境界つまり, **中立安定状態**になると仮定する
- 不安定が起こる場所で相似解と中立安定面密度分布が**滑らかに接続**すると仮定する

中立安定面密度分布1

- 動径方向釣り合いの式

$$\frac{j^2}{R^3} = \frac{GM}{R^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial R}$$

を微分して, 中立安定 $\partial j / \partial R = 0$ の式を代入,
無次元化をしてやると

$$(2-\beta) \frac{\partial(\ln \sigma)}{\partial(\ln r)} + \frac{\partial^2(\ln \sigma)}{\partial(\ln r)^2} + \left(\frac{R_0}{H_0}\right)^2 r^{(\beta-1)} - \frac{1}{2}(3+\beta)(2-\beta) = 0.$$

この微分方程式を無次元面密度 σ について解く

中立安定面密度分布2

- 求まる解が中立安定状態での面密度分布

$$\sigma_{\text{ms}} = \exp \left[\frac{C_1}{(\beta - 2)} r^{(\beta-2)} - \frac{1}{\beta - 1} \left(\frac{R_0}{H_0} \right)^2 r^{(\beta-1)} + \frac{3 + \beta}{2} \ln r + C_2 \right]$$

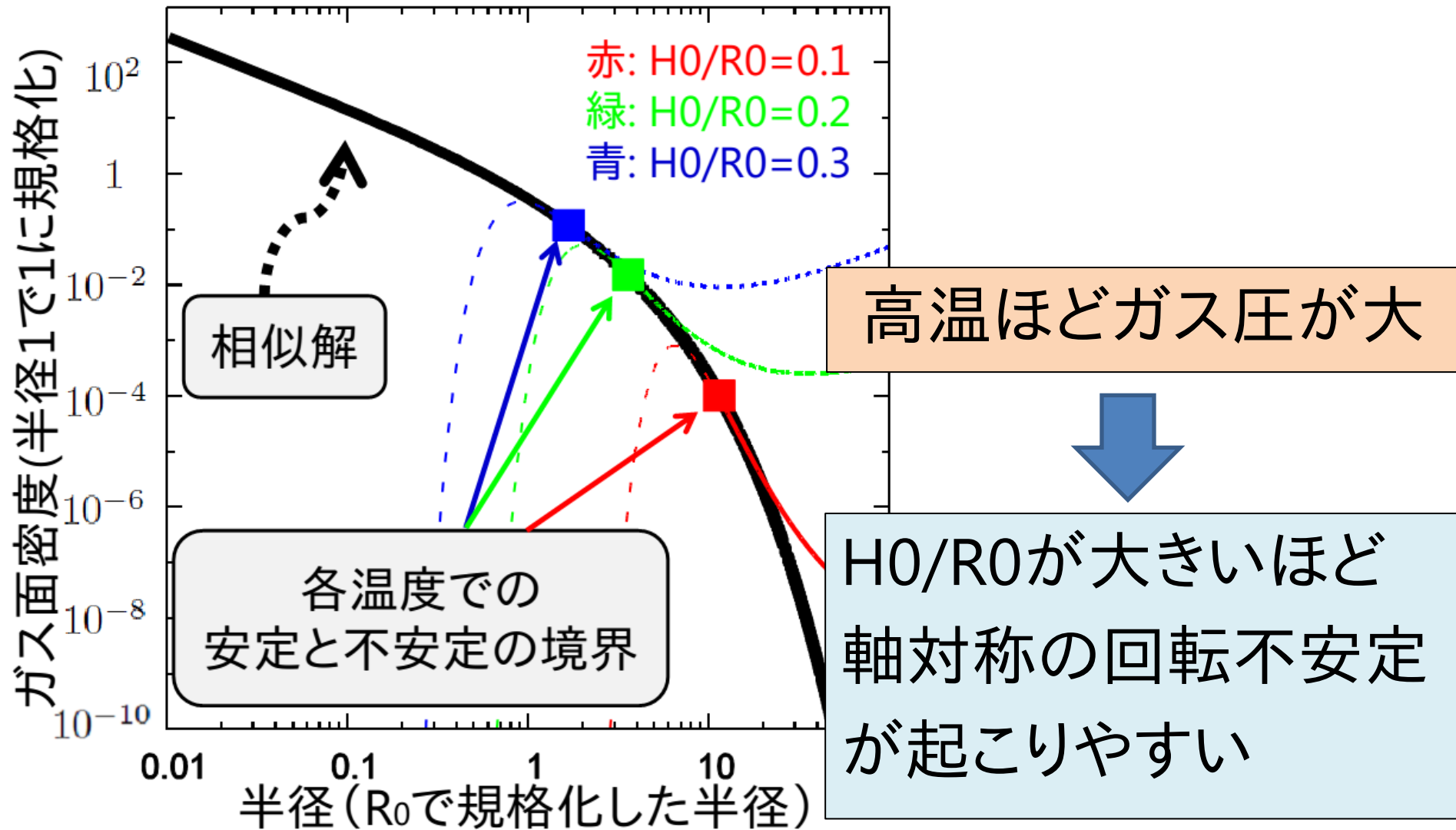
(C1, C2 は積分定数)

- 滑らかに接続する為に1回微分も求めておくと

$$\frac{\partial(\ln \sigma_{\text{ms}})}{\partial(\ln r)} = C_1 r^{(\beta-2)} - \left(\frac{R_0}{H_0} \right)^2 r^{(\beta-1)} + \frac{3 + \beta}{2}$$

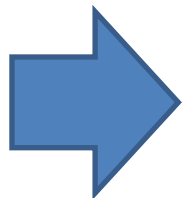
(Ono et al. 2014)

結果～軸対称の回転不安定性～



回転速度分布

- ケプラー回転領域
回転速度は $r^{-1/2}$ に比例して変化
- 中立安定領域
比角運動量一定より, 回転速度は r^{-1} に比例して変化



回転不安定が起きると,
回転速度がケプラーより遅くなる

原始惑星系円盤なら観測的検証可能 か？

非軸対称の回転不安定性

- 今までの話は軸対称の回転不安定性
非軸対称の回転不安定性も気になる
- 非軸対称の回転不安定 (共回転共鳴付近のモード) が起こる必要条件

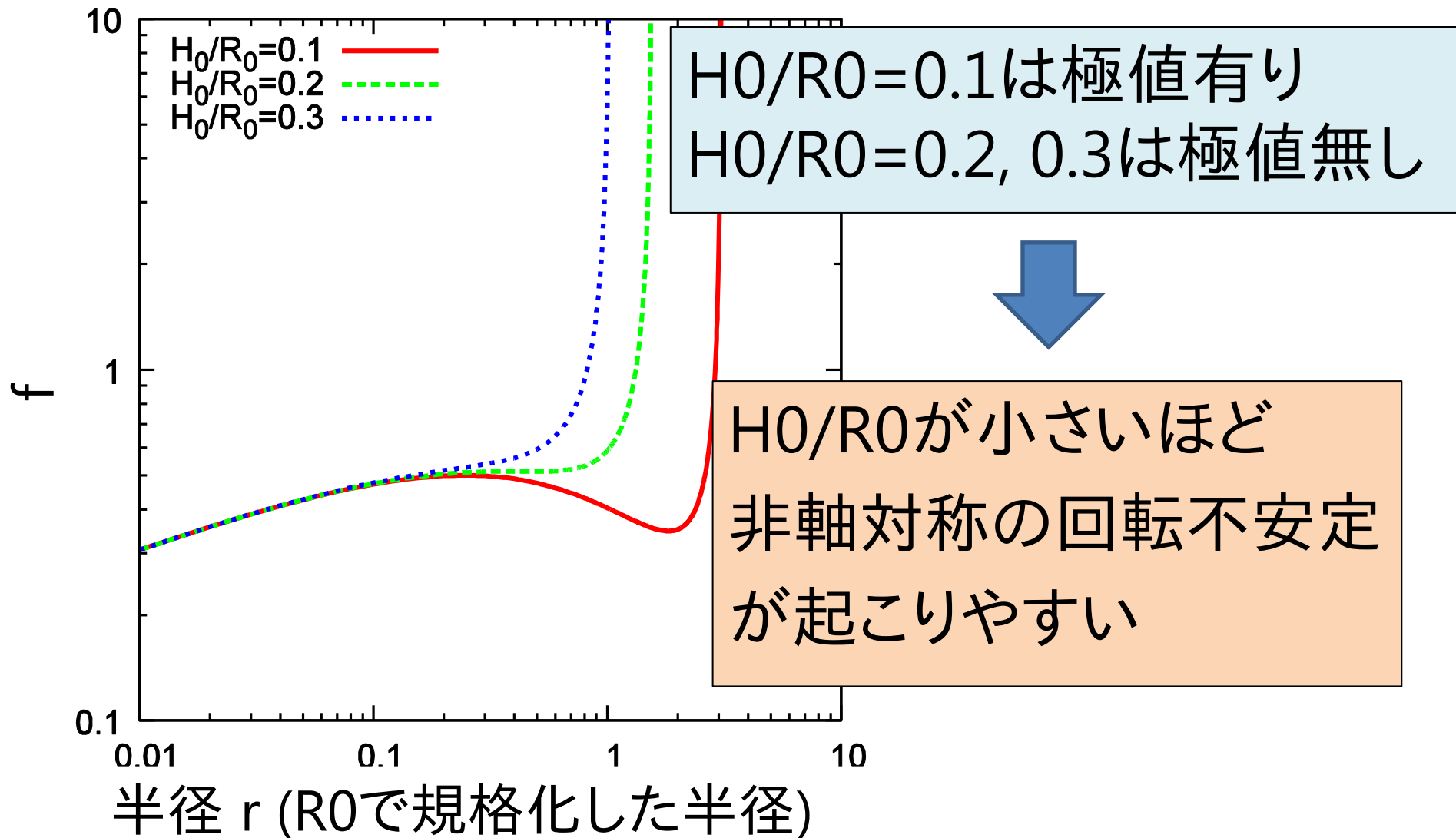
(Lovelace & Hohlfield 1978)

$$f(r) = \frac{\sigma(r)\Omega(r)}{[\kappa(r)]^2} = \frac{\sigma}{2[2\Omega + r(d\Omega/dr)]}$$

関数 $f(r)$ が極値を持つこと

$\left(\begin{array}{l} \text{面密度: } \sigma(r), \text{ 角速度: } \Omega(r), \\ \text{epicyclic 振動数: } \kappa(r) \end{array} \right)$

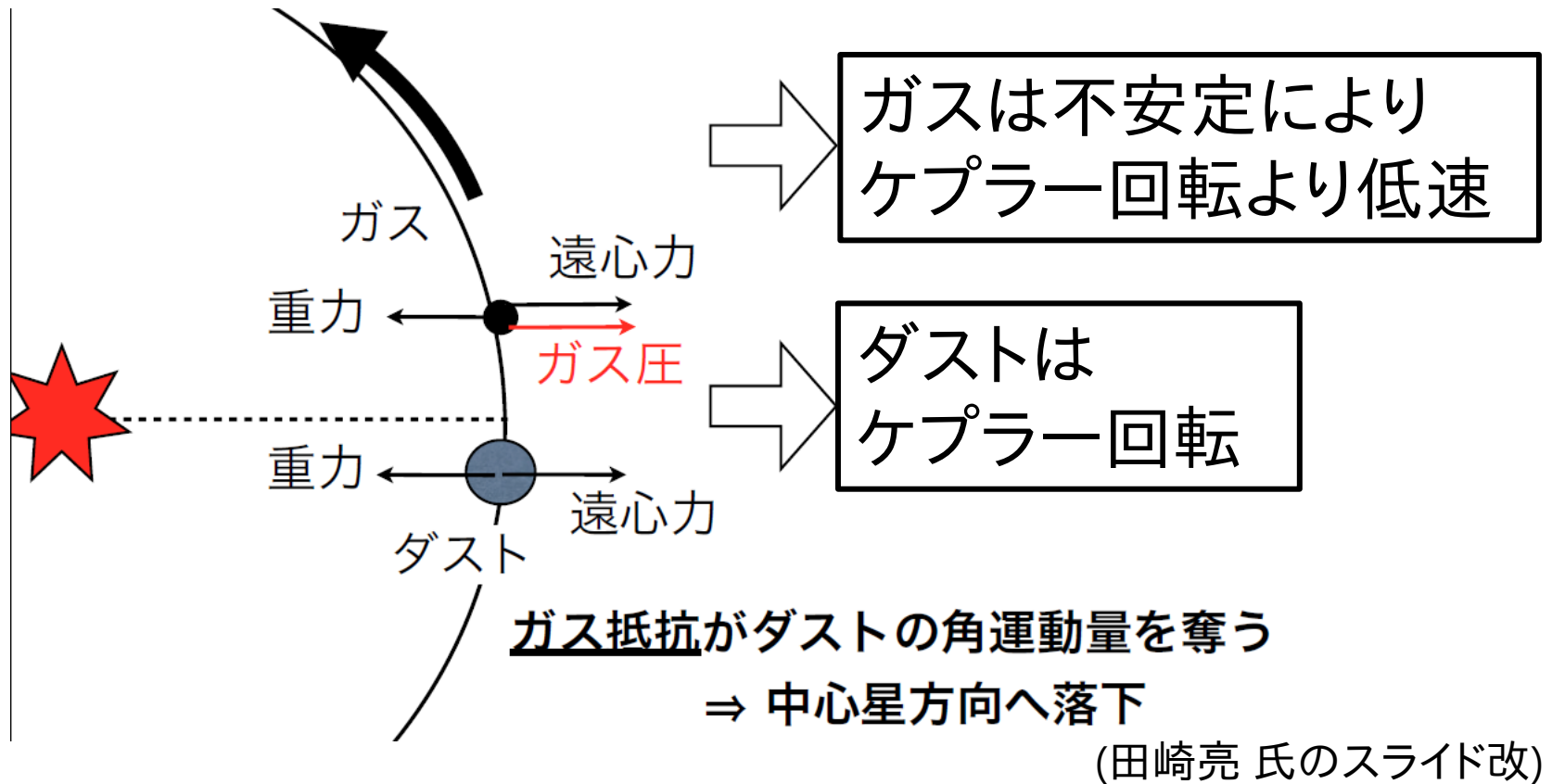
結果～非軸対称の回転不安定性～



結果のまとめ

- 相似解は H_0/R_0 が0.2-0.3の時,
 $R \sim R_0$ で軸対称の回転不安定
高温ほど起こりやすい
- 軸対称回転不安定が起きると回転速度が
ケプラー回転より遅くなると考えられる
- 相似解は H_0/R_0 が0.1の時,
 $R \sim 0.3R_0$ で非軸対称の回転不安定が起こる
必要条件を満たす
低温ほど起こりやすい？

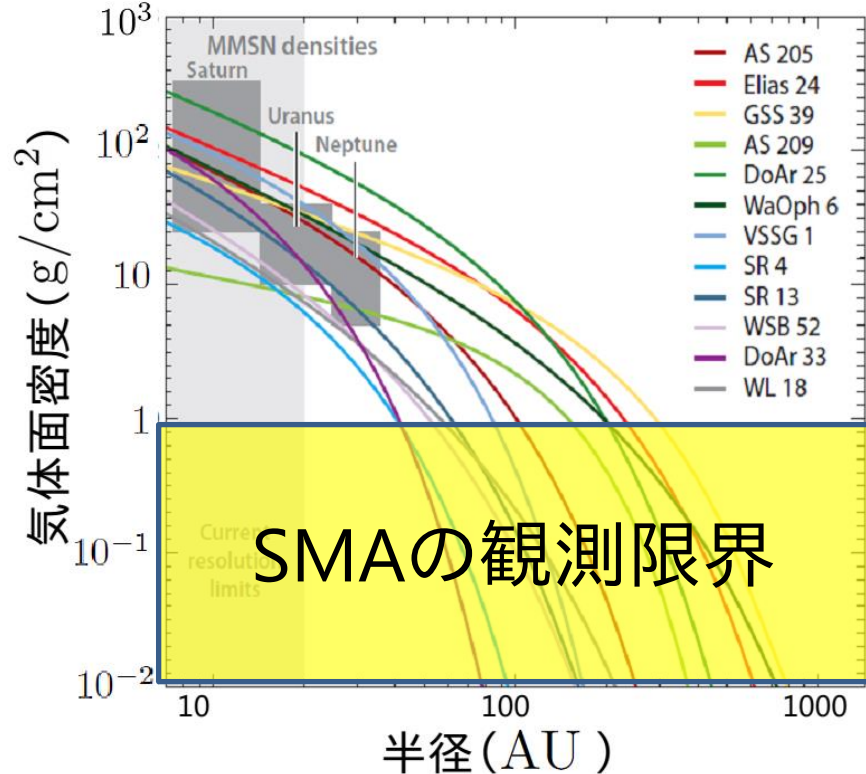
ダストへの影響



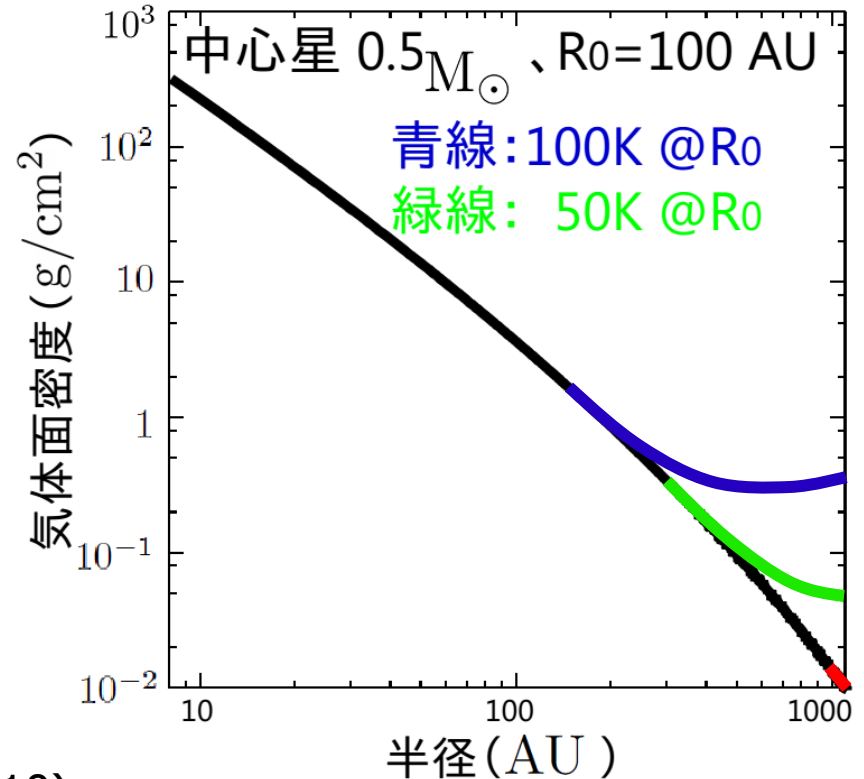
回転不安定性はダスト分布にも影響を与える

非相似解的面密度分布の観測

電波干渉計による 円盤面密度の観測結果



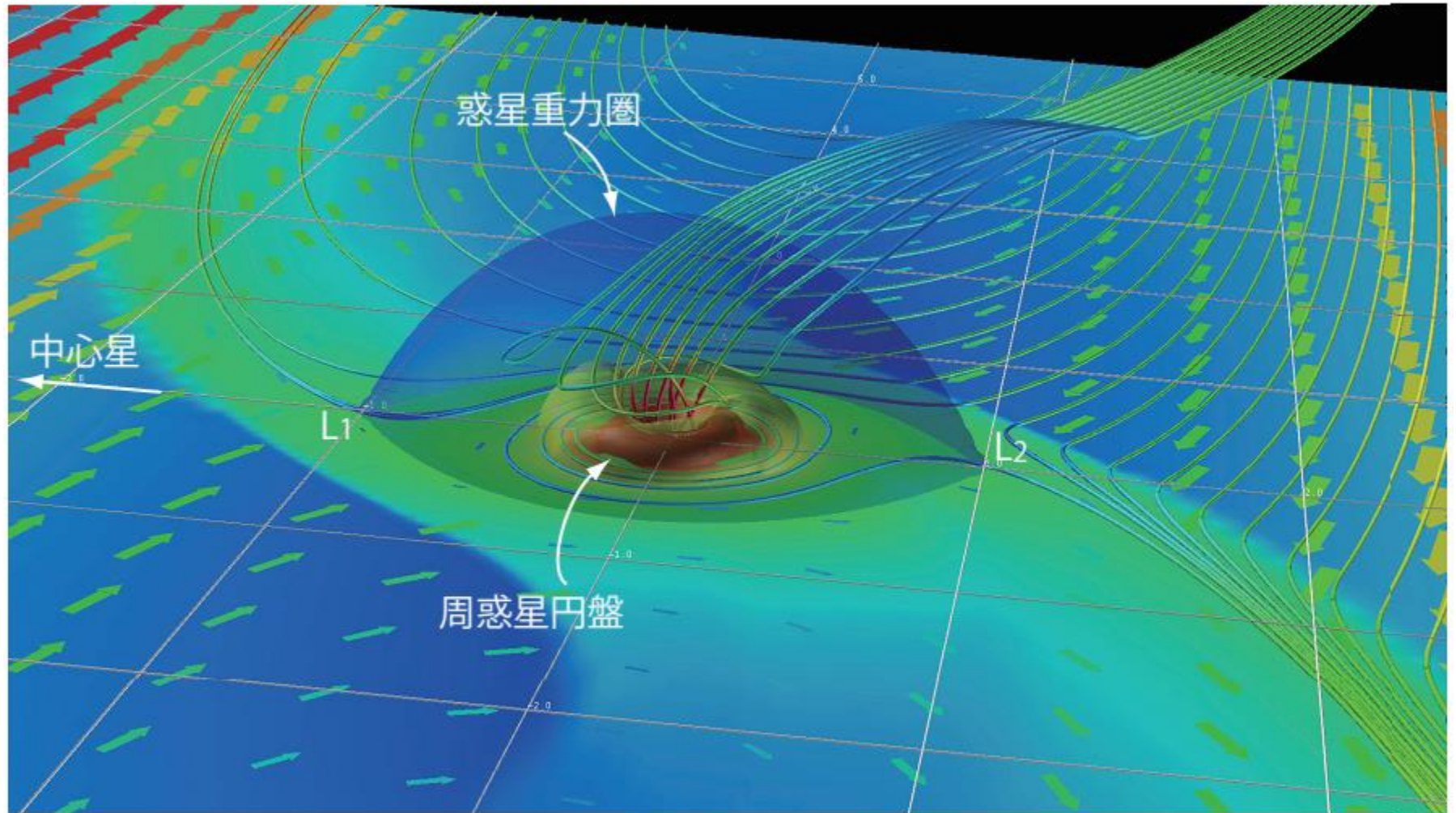
本研究結果



もっと低面密度領域を見たい！

円盤外側領域のALMAによる高感度観測に期待

谷川さん達の3Dシミュレーション



Tanigawa+2011

Tanigawa+2012と比較

Tanigawa+2012の結果の考察

周惑星円盤の周りにガスが充満している

Infallによって周惑星円盤は定常的



面密度勾配が急になり難く
回転不安定も置きない

しかし、時間が経てばギャップを形成し
周りにガスがなくなる



面密度勾配が急になり易い
回転不安定が起こりやすくなる

まとめ

- 粘性進化する円盤の外側領域では
回転不安定により角運動量が輸送され得る
- 回転不安定が起こると
ダスト分布への影響も期待される
- 原始惑星系円盤においては
回転不安定領域の観測が期待される
- 衛星系研究に使えないか？