

# 巨大惑星による円盤ギャップの形成 円盤回転則の変化とレイリー条件を考慮した 定常ギャップ構造

金川和弘 (北海道大学低温科学研究所),  
武藤恭之 (工学院大学), 田中秀和, 谷川享行 (北海道大学低温科学研究所), 竹内拓 (東京工業大学)

# アウトライン

- 円盤ギャップとは
- ギャップ形成の重要性
  - 惑星成長 & 惑星移動
  - インナーホール形成
- 円盤ギャップ構造の 1 D モデル
  - ギャップ形成による円盤回転則の変化
  - レイリー条件
- 観測への応用
  - ギャップの深さと惑星質量を関連付ける
- 今後の展望

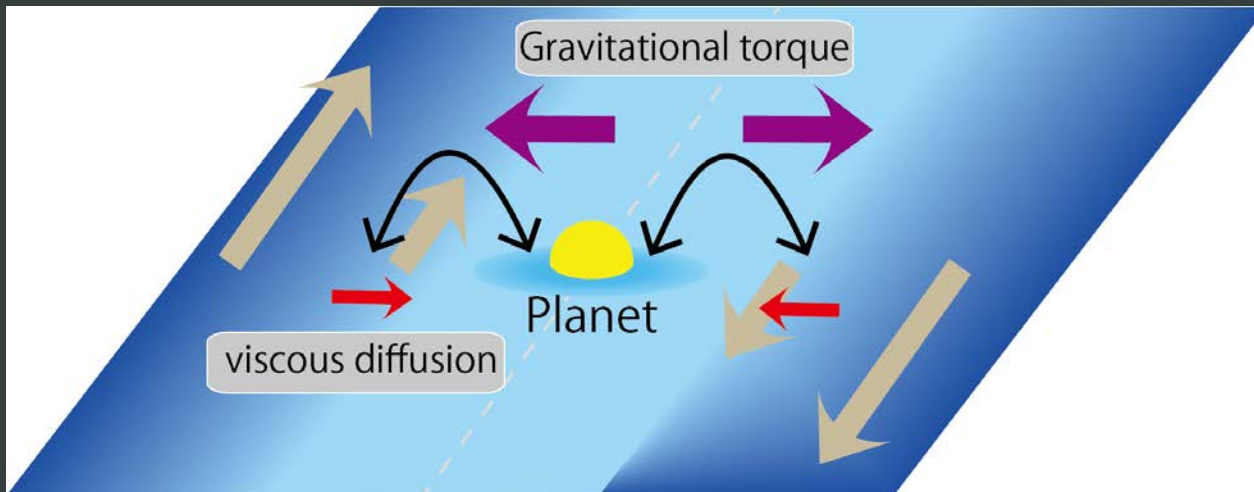
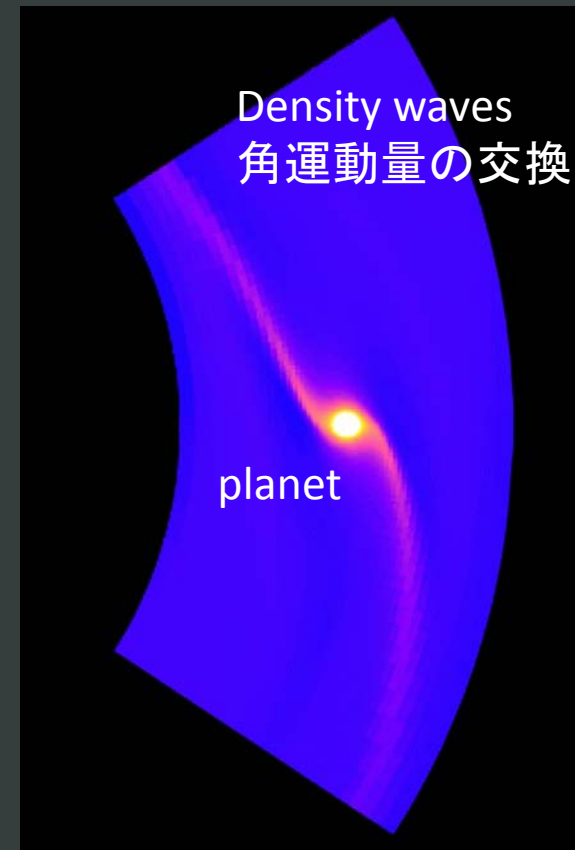
# 円盤ギャップとは 巨大惑星によるギャップ形成

## • ギャップの形成

惑星と円盤の重力相互作用によって惑星周りのガスが吹き飛ばされ、ガス密度を低下させる  
(ギャップの形成)

## • ギャップが形成されると…

- 惑星 & 周惑星円盤への円盤ガスの供給を抑制
- 惑星移動メカニズムを変化させる(タイプII 惑星移動)
- ギャップを横切る流れを抑制する(インナーホール形成)

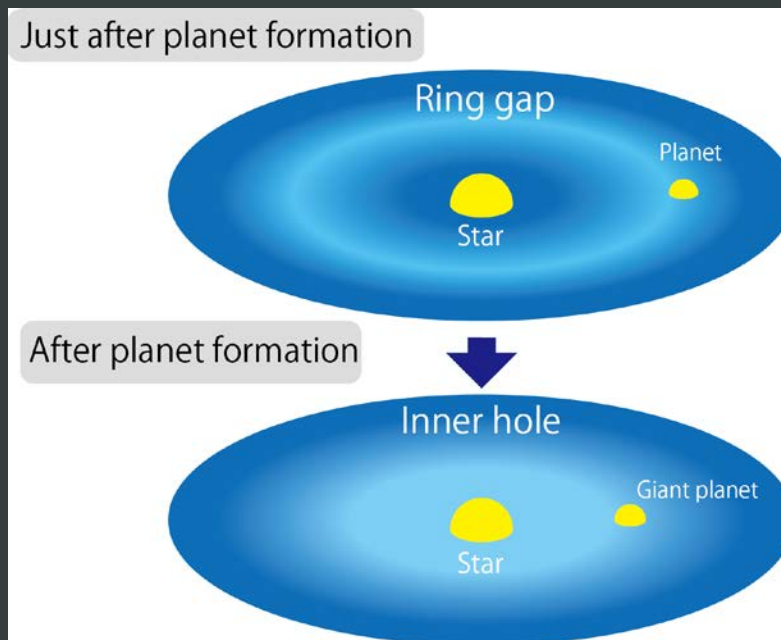


# 巨大惑星と原始惑星系円盤の共進化

前遷移円盤

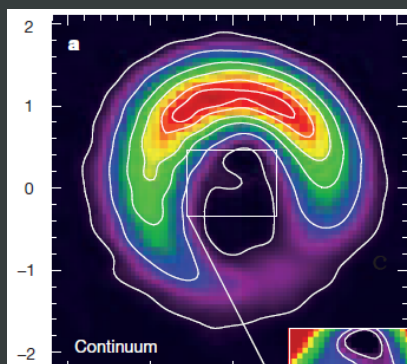


時間  
進化



- ギャップの形成
- タイプII 惑星移動の開始
- 惑星へのガス降着の開始
- 周惑星円盤の形成

遷移円盤



Casassus et al. 2013

- インナーホールの形成
- タイプII 惑星移動の停止
- 惑星へのガス供給の停止
- ギャップを横切る流れ

# ギャップ形成の重要性

- 惑星&周惑星円盤へのガス供給を制限
  - 巨大ガス惑星の最終質量
  - 周惑星円盤の構造・衛星の形成
- 惑星移動
  - タイプI惑星移動からタイプII惑星移動への遷移
  - タイプII惑星移動の効率(ギャップを横切る流れ)
- 原始惑星系円盤の構造・進化
  - インナーホール形成 (ギャップを横切る流れ)
  - ギャップ構造は観測可能

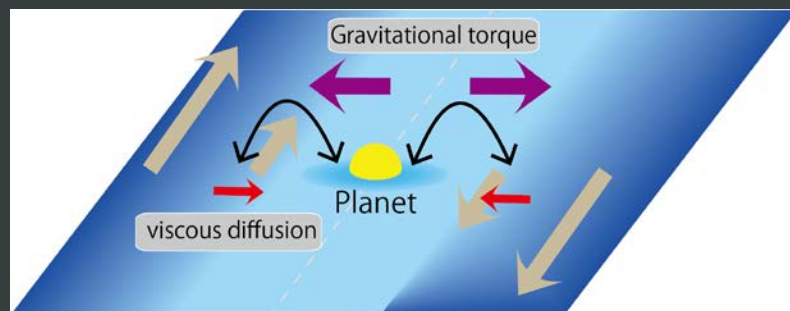
# 先行研究

- 数値流体計算によるもの
  - Klahr & Kley 2006  
3D Radio-hydro
  - Zhu et al. 2012  
2D 長時間計算
  - Duffell & MacFadyen 2013  
2D 低粘性でのギャップ形成条件について
- 1D円盤モデルを用いた研究
  - Varniere et al. 2004
  - Crida et al. 2006
  - Tanigawa & Ikoma 2007

# ギャップの形成 in 1D モデル

## • ギャップの構造

- 惑星-円盤相互作用 (ギャップを掘る効果)
- 円盤ガスの粘性拡散 (ギャップを埋める効果)



## • 基礎方程式 (定常状態)

質量フラックス

粘性

惑星由来の角運動量フラックス  
積分の中身:トルク密度

$$R^2 \Omega F_M - 2\pi R^3 \Sigma \nu \frac{d\Omega}{dR} = F_{J0}$$

$$\int_R^\infty 2\pi R' \Sigma \Lambda(R') dR'$$

非軸対称性に由来する  
角運動量フラックス  
(pressure torque)

惑星がないときの定常粘性円盤

- Varniere et al. 2004 (ケプラー回転)
- Crida et al. 2006 (ケプラー回転)
- Tanigawa & Ikoma 2007 (ケプラー回転)

## レイリー条件

回転粘性円盤の安定条件  
急激な密度勾配を持つギャップは動的に不安定

# ケプラー回転している円盤でのギャップ構造

- ケプラー回転

$$\Omega = \Omega_K = \sqrt{\frac{GM_*}{R^3}}, \quad \frac{d\Omega}{dR} = -\frac{3}{2} \frac{\Omega_K}{R}$$

- 基礎方程式

$$R^2 \Omega_K F_M + 3\pi R^2 \Sigma \nu \Omega_K = F_{J0} - \int_R^\infty 2\pi R' \Sigma \Lambda(R') dR'$$

面密度の積分方程式

惑星近傍では( $\Sigma$ は $\Omega$ や $F_M$ より早く変化)

$$\Sigma_K(R)/\Sigma_\infty = \exp\left(\frac{-1}{3\pi\nu\Omega_p R_p^2} \int_R^\infty 2\pi R_p \Lambda(R') dR'\right)$$

トルク密度が分かれば、面密度分布は完全に決まる



# 円盤回転速度の変化とレイリー条件

- 動径方向の力の釣り合い

$$R\Omega^2 = \frac{GM_*}{R^2} + \frac{1}{\Sigma} \frac{dP}{dR}$$

$$P = c^2 \Sigma$$

遠心力 = 中心星重力 + 圧力勾配

- 回転速度は面密度勾配に依存

$$R^2 \Omega F_M - 2\pi R^3 \Sigma \nu \frac{d\Omega}{dR} = F_{J0} - \int_R^\infty 2\pi R' \Sigma \Lambda(R') dR'$$

- 基礎方程式は面密度の2階の微分方程式になる

- レイリー条件

$$\frac{(R^2 \Omega)}{dR} \geq 0$$

or

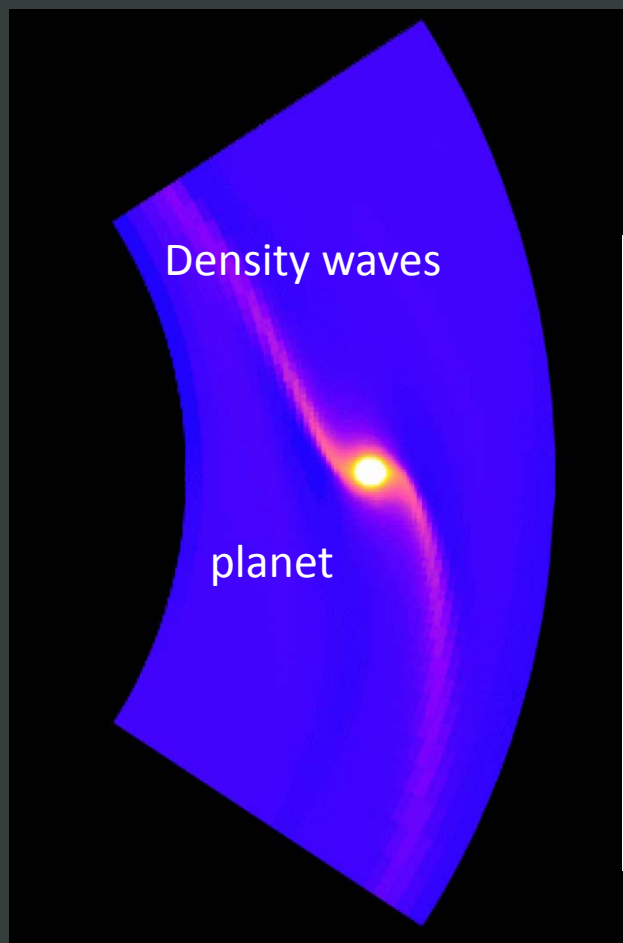
$$\frac{d^2 \ln \Sigma}{dR^2} = -1$$

- 回転円盤の安定条件
- ギャップ形成によってレイリー条件は破れる  
(Tanigawa&Ikoma 2007)

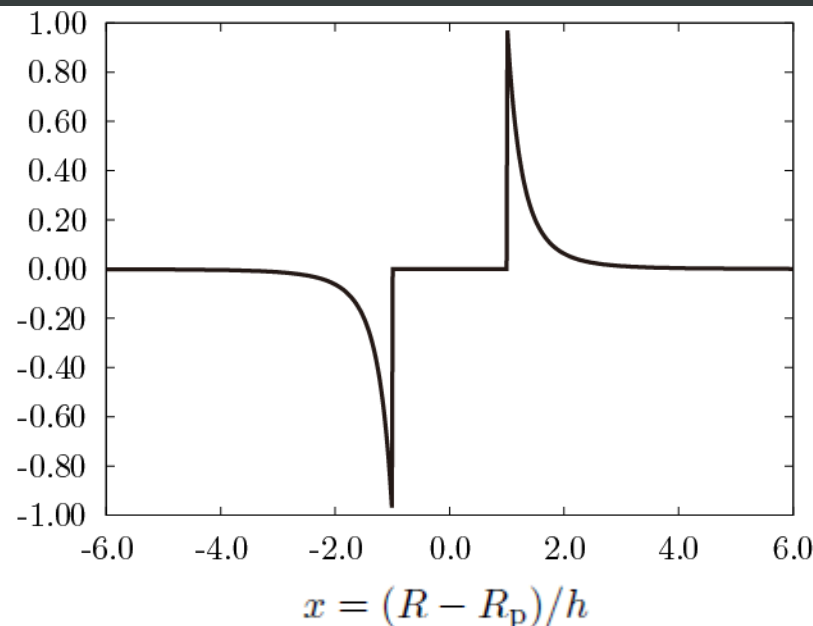
# 円盤が受け取る角運動量の分布

今回用いたモデル (ほぼ線形理論)

$$2\pi R\Lambda = \frac{1}{\Sigma} \frac{dT}{dR} = \begin{cases} \frac{T_0}{R_p} (R - R_p)^{-4} & (|R - R_p| > h), \\ 0 & (|R - R_p| < h). \end{cases}$$



単位質量あたりの円盤に与えられる角運動量

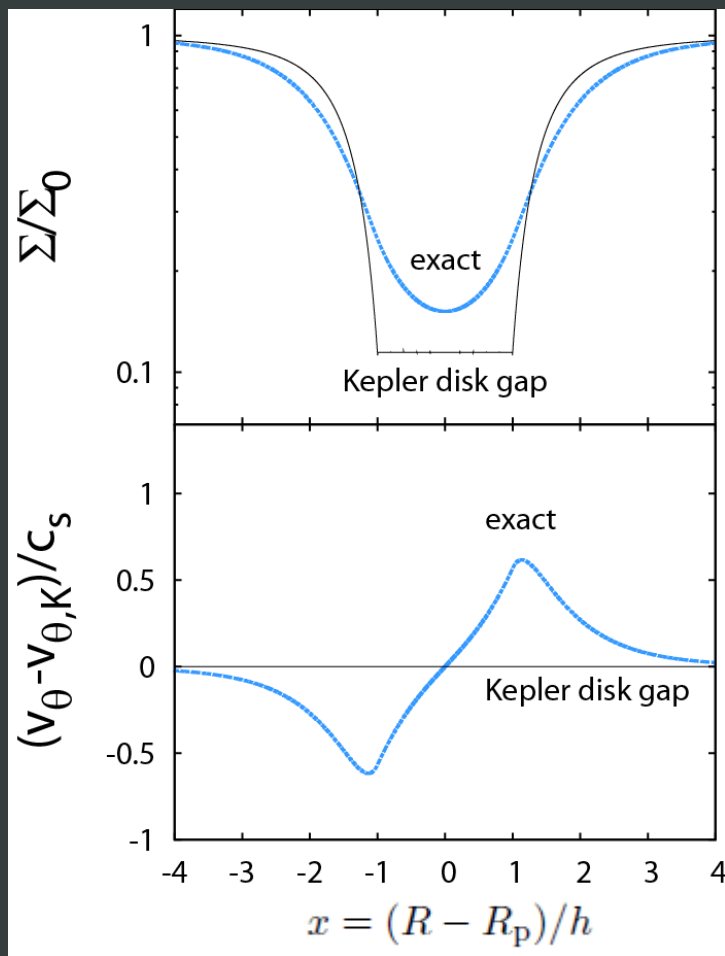


実際には、密度波の伝播・減衰を考える必要がある

- 粘性による減衰 (Takeuchi et al. 1996)
- 衝撃波による減衰 (Goodman&Rafkov 2001)

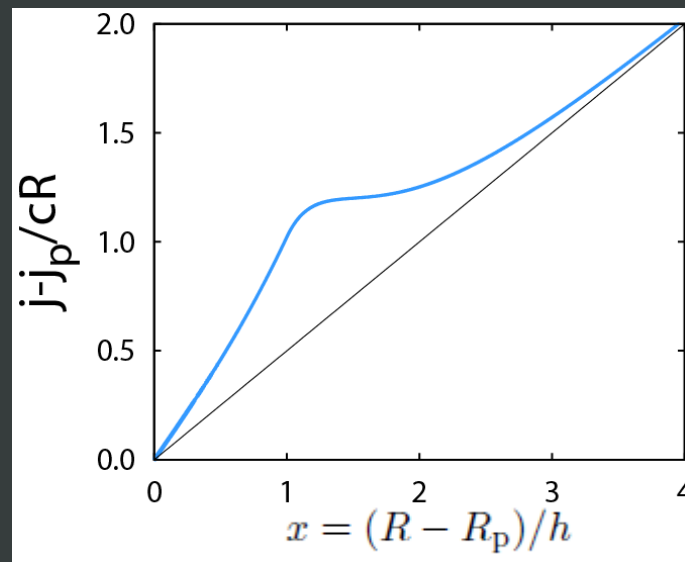
# 1 Dモデルの結果 ギャップの構造 (惑星が小さいとき)

$$M_p = 10M_{\oplus}, h/R_p = 1/30, \alpha = 10^{-3}$$



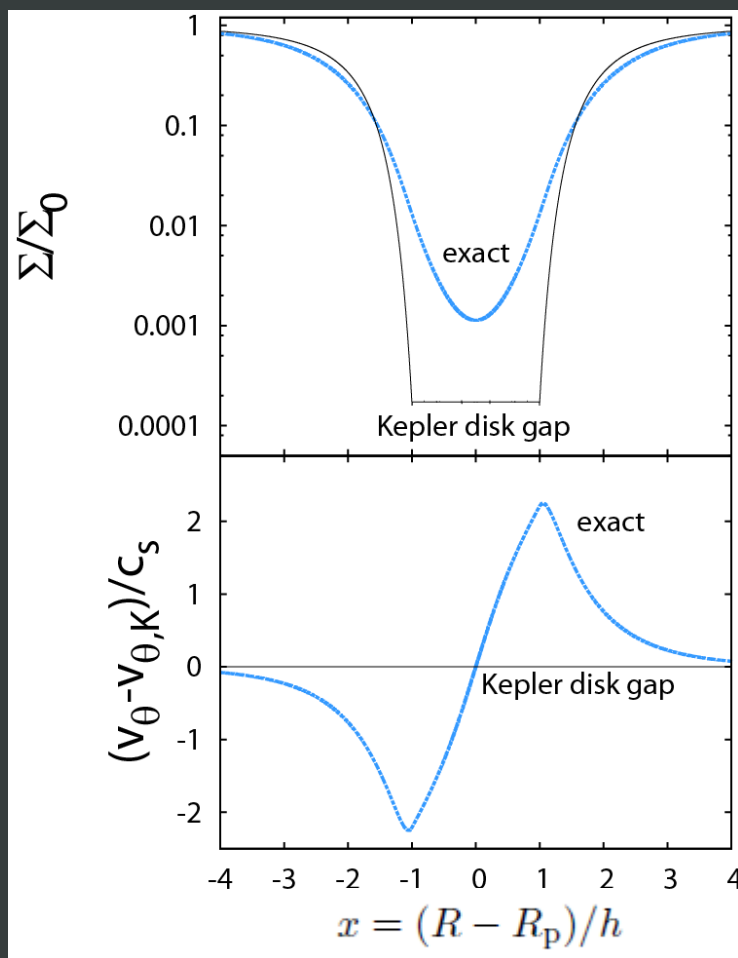
## 回転則変化の影響

- 面密度が滑らかに変化
- 急激な密度変化が抑えられる
- 回転速度は音速程度ケプラー速度からずれる



# ギャップの構造 (惑星が大きいとき)

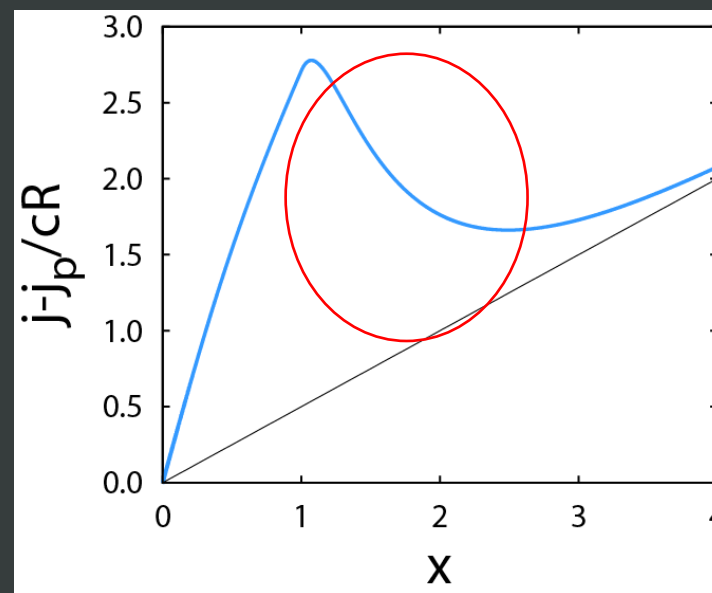
$$M_p = 20M_{\oplus}, h/R_p = 1/30, \alpha = 10^{-3}$$



## 回転則変化の影響

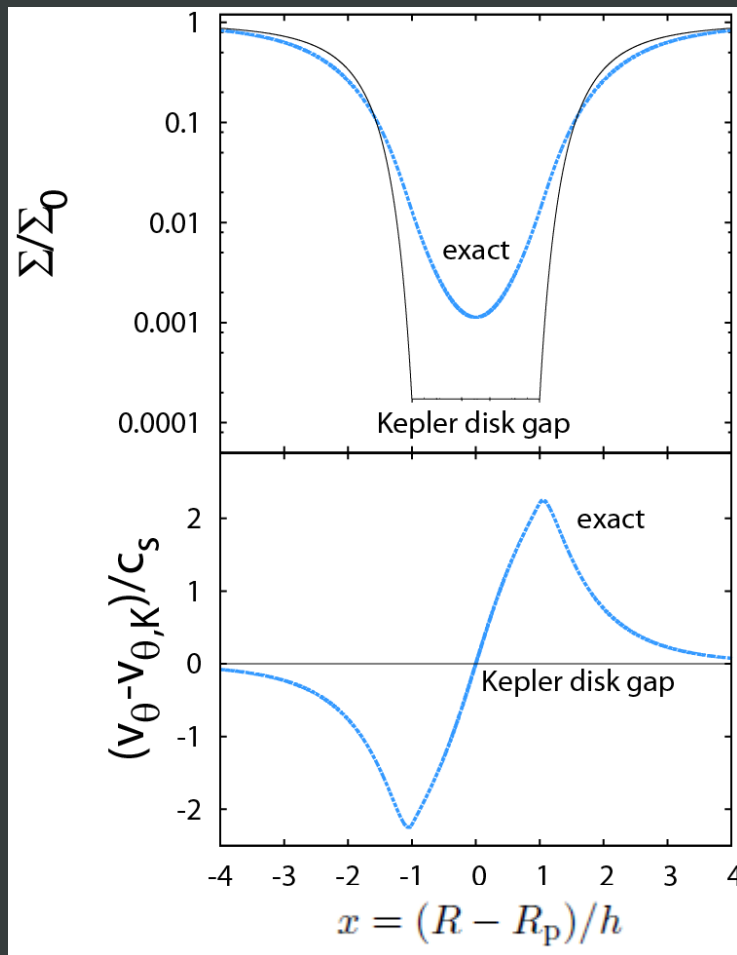
- レイリー条件が破れる

$$\frac{(R^2\Omega)}{dR} \geq 0$$



# ギャップの構造 (惑星が大きいとき)

$$M_p = 20M_{\oplus}, h/R_p = 1/30, \alpha = 10^{-3}$$

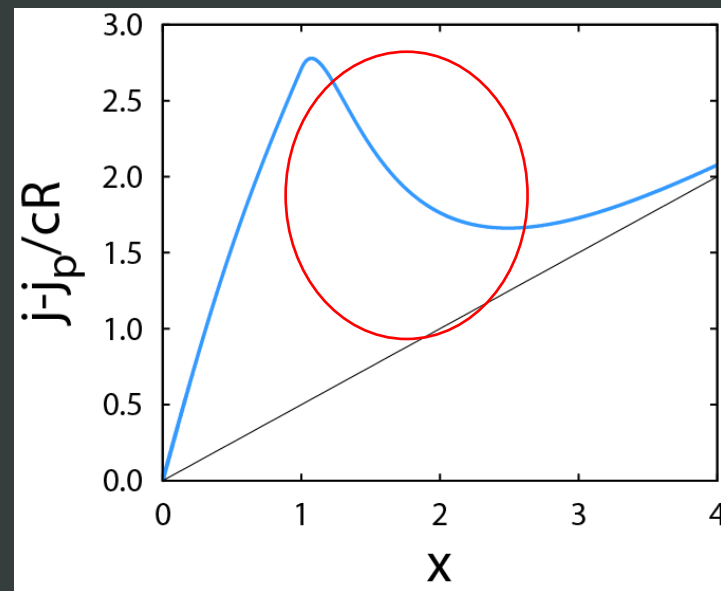


レイリー条件を考慮した基礎方程式

$$R^2 \Omega F_M - 2\pi R^3 \Sigma \nu \frac{d\Omega}{dR} = F_{J0} - \int_R^{\infty} 2\pi R' \Sigma \Lambda(R') dR'$$

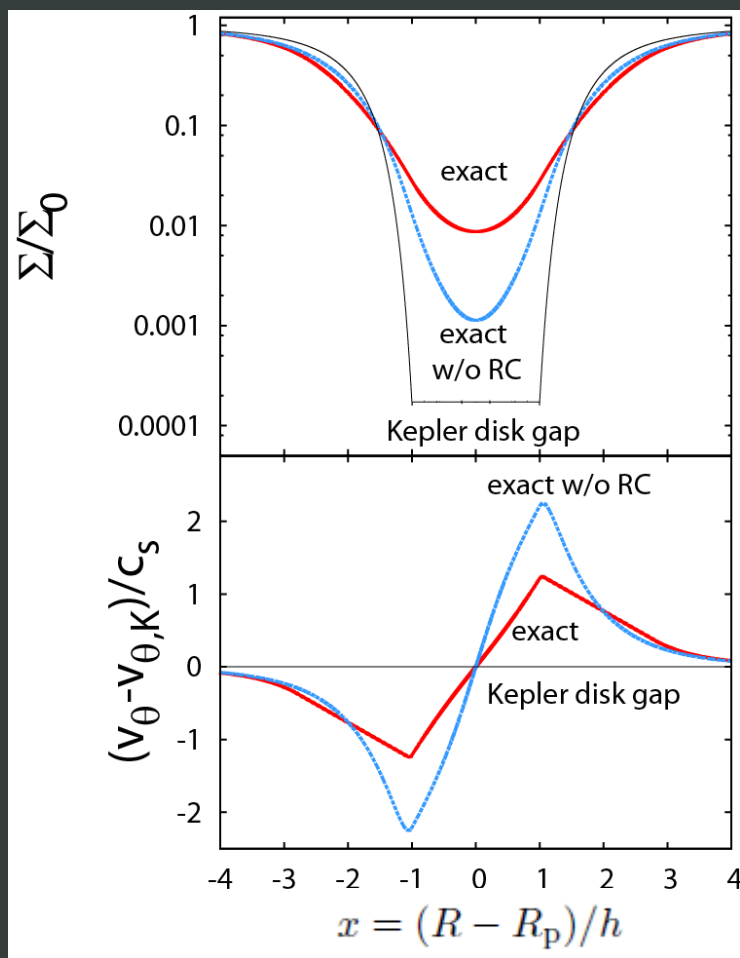
$$\frac{d^2 \ln \Sigma}{dR^2} = -1$$

← 上の式でレイリー条件を破っている場合はこっちの式を使う



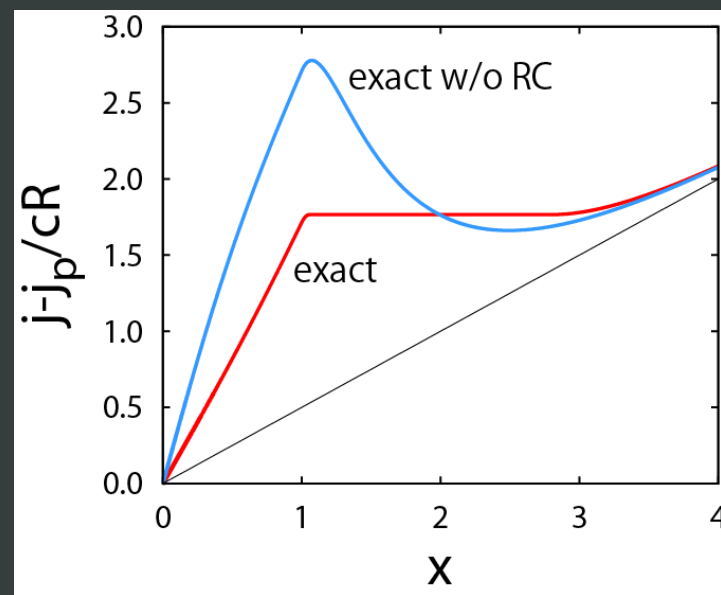
# ギャップの構造 (惑星が大きいとき+レイリー条件を考慮)

$$M_p = 20M_{\oplus}, h/R_p = 1/30, \alpha = 10^{-3}$$



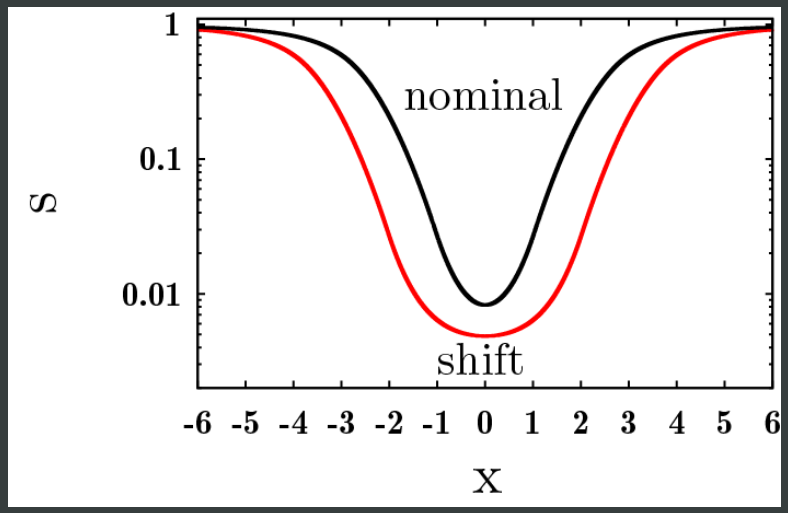
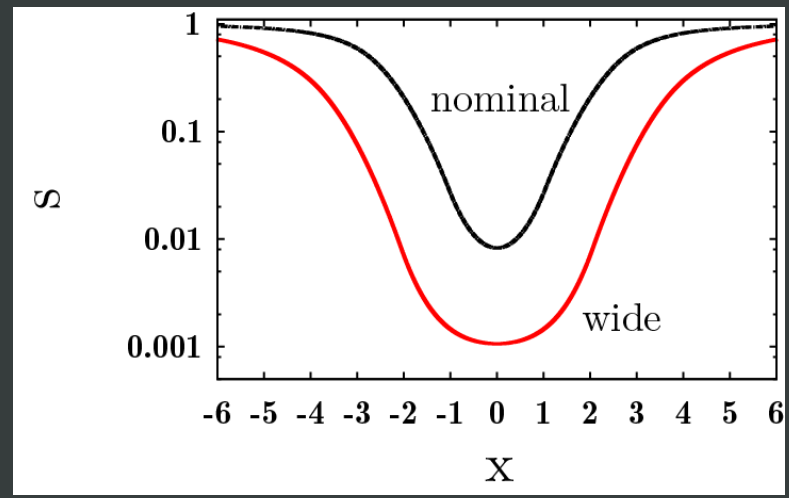
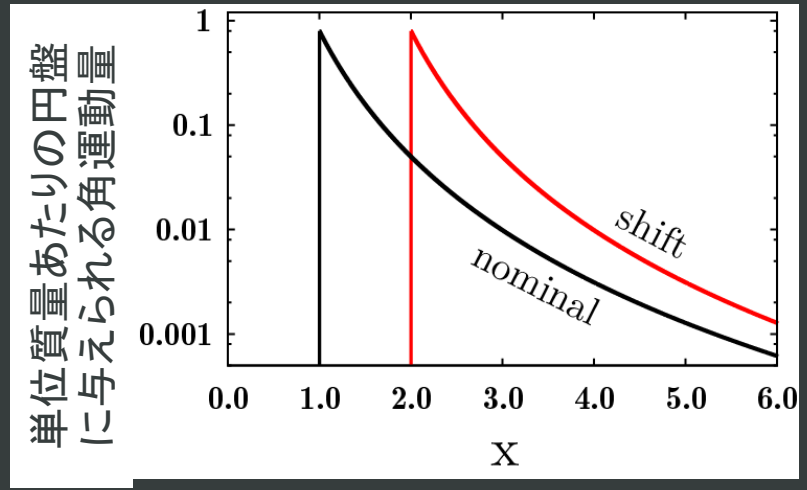
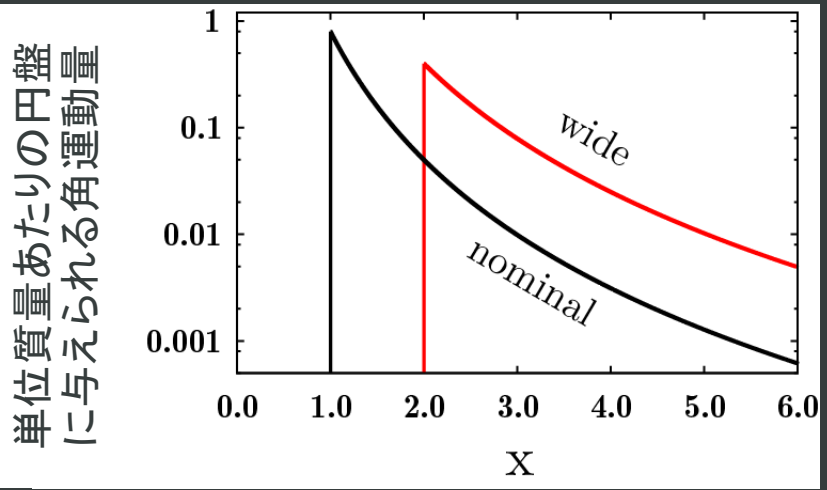
## レイリー条件

- 面密度勾配の増加を制限
- ギャップの深さは大きく変わる
- レイリー条件を破った領域だけでなくその周辺の構造も変化



# 円盤が受け取る角運動量の分布を変えると？

$M_p = 20M_{\oplus}, h/R_p = 1/30, \alpha = 10^{-3}$



## まとめ①

- ギャップの面密度分布と角速度分布を矛盾なく求めた
- ギャップ形成によって、角速度分布はレイリー条件を破るぐらいに変化する
- レイリー条件によって、面密度の勾配が大きくなれないのでギャップは浅くなる
- 惑星が受け取る角運動量の 分布によってギャップの深さ・幅が変わる

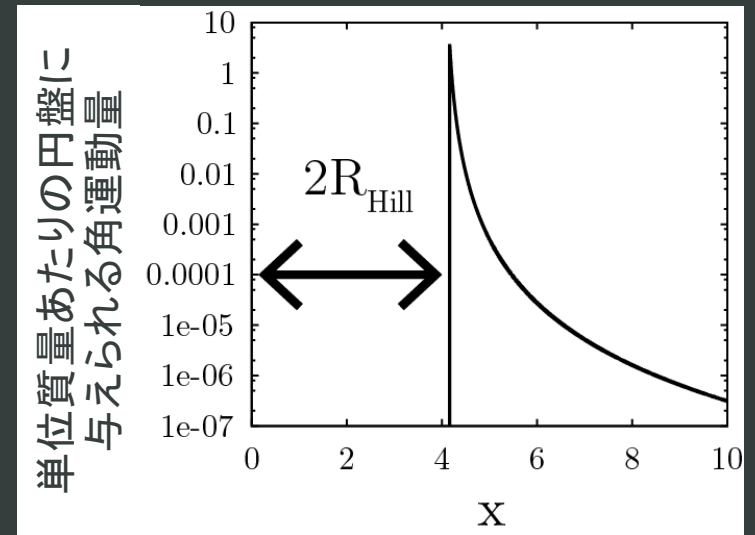
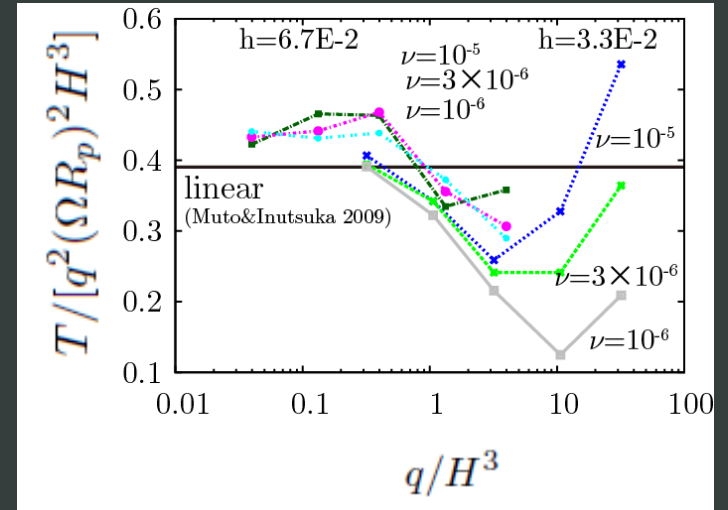


# 観測への応用

## ギャップの深さと惑星質量を関連付ける

### 考慮すべきこと

- 密度波
  - 励起の非線形性
    - 2D数値流体計算を使う
  - 減衰 (粘性 or 衝撃波)
    - 簡単なモデルを使う
- 円盤の力学不安定性
  - レイリー条件
  - 他の不安定性
- 時間進化
- ギャップの非対称性



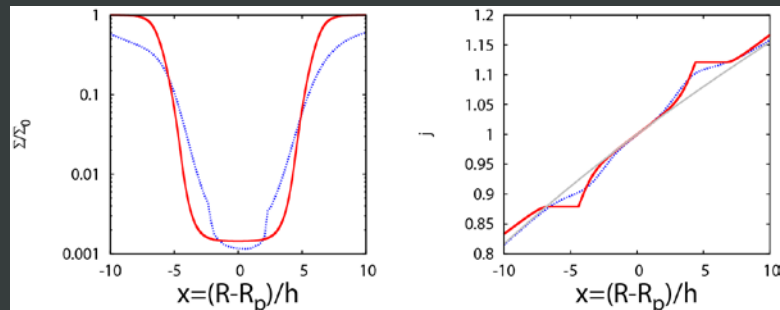
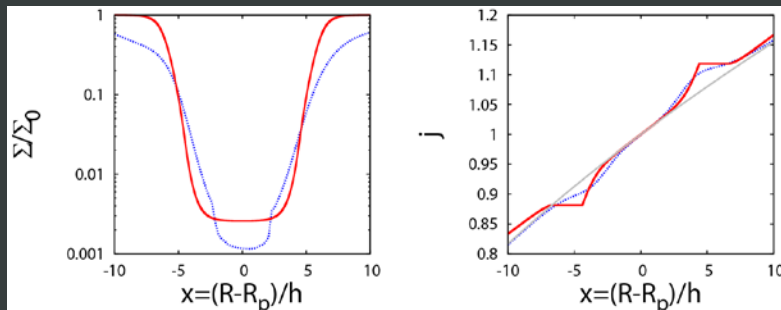
# ギャップ構造(1D vs. 2D)

赤線: モデル  
青線: 2D流体計算

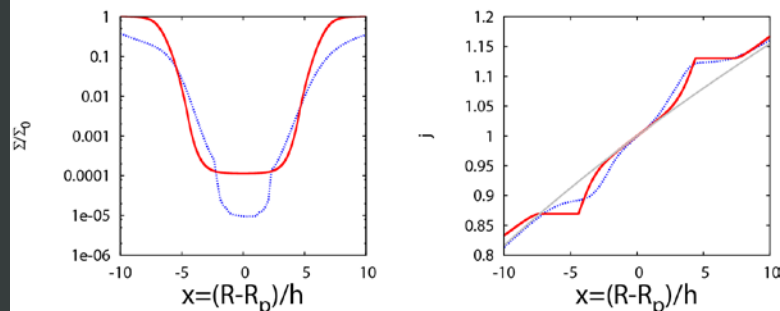
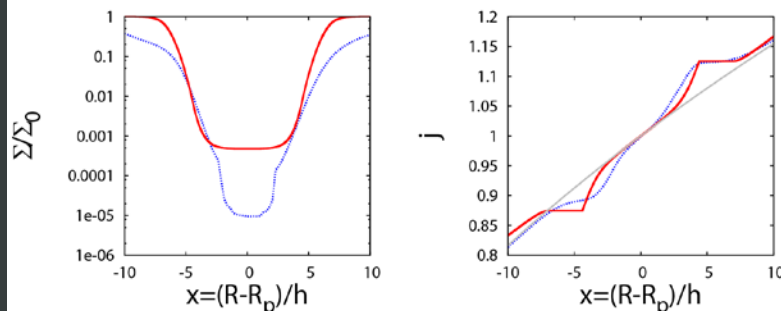
$H=0.0333, q=1.18 \times 10^{-3}$  ( $1.18M_J$ )

$H=0.0333, q=3.93 \times 10^{-4}$  ( $0.4M_J$ )

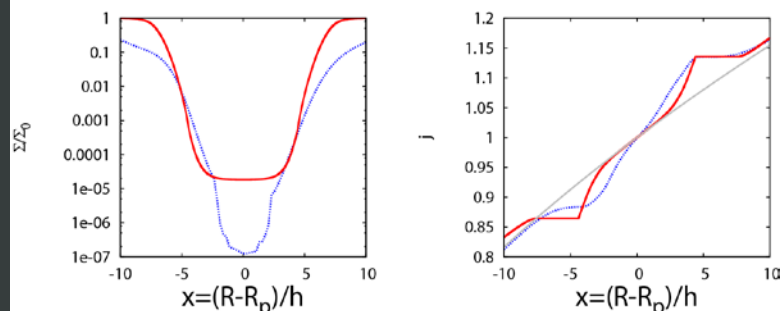
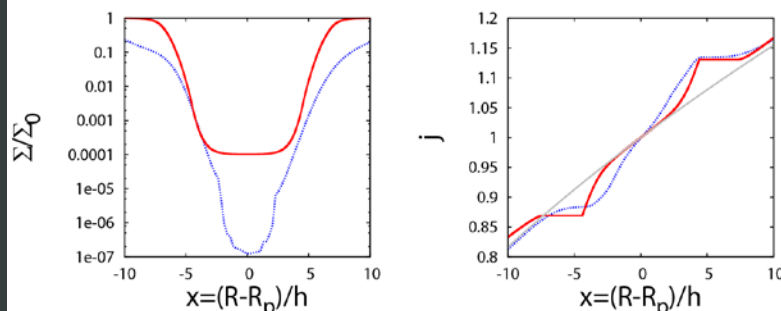
$\nu=10^{-5}$



$\nu=3 \times 10^{-6}$

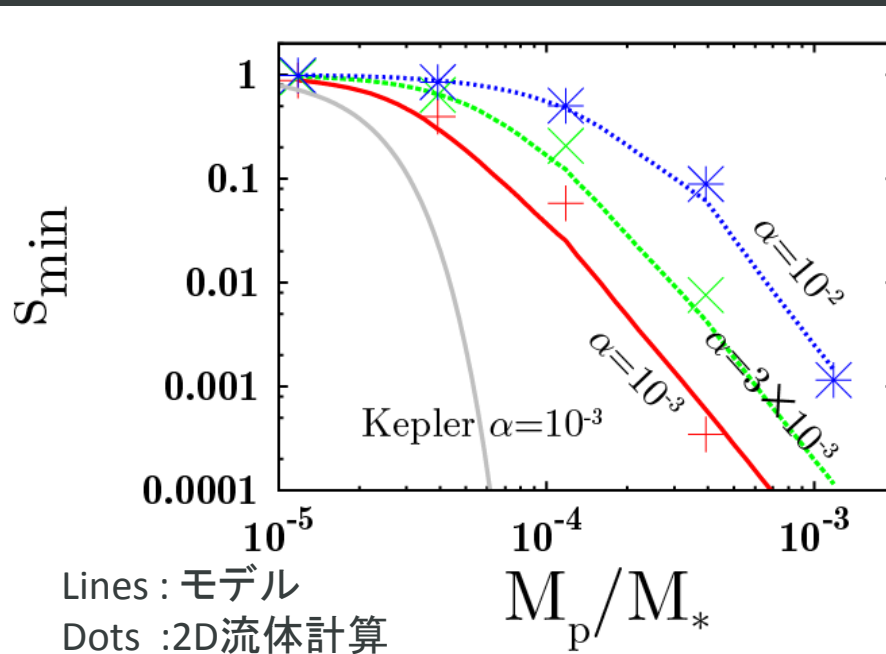


$\nu=10^{-6}$

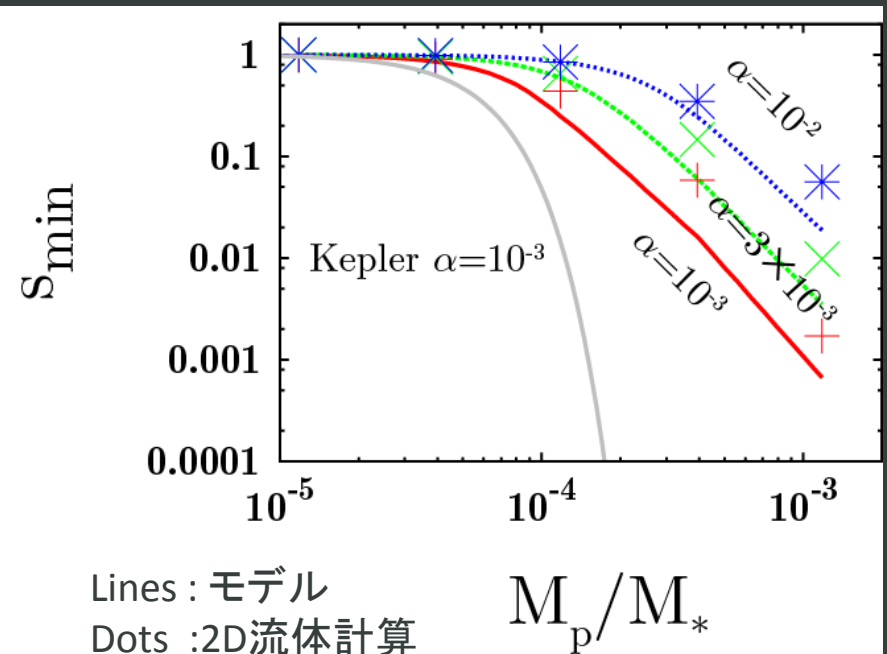


# ギャップ深さと惑星質量の関係

$H=3.3 \times 10^{-2}$



$H=6.7 \times 10^{-2}$



ギャップの深さは、円盤が受け取る角運動量の分布とレイリー条件を考慮することで説明可能

問題点

- 現実的な円盤が受け取るトルクの分布
- 他の流体不安定性 e.g., Rossby wave instability, Baroclinic instability )

# 今後の方針

- ギャップの深さと惑星質量の関連付け
  - 密度波の励起&減衰
    - 円盤が惑星から受け取る角運動量の大きさ&分布
  - 円盤の動的不安定性
- ギャップ形成と円盤進化
  - ギャップの非対称性
    - 惑星&周惑星円盤に降着するガス
    - ギャップをすり抜ける流れ
    - 惑星移動
    - インナーホール形成