



北海道大学
HOKKAIDO UNIVERSITY

巨大ガス惑星軌道付近の 原始惑星系円盤構造

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

- ギャップとは？
- 衛星形成に対するギャップ形成の重要性
 - 周惑星円盤へのガス供給
- 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
- 今後の展望

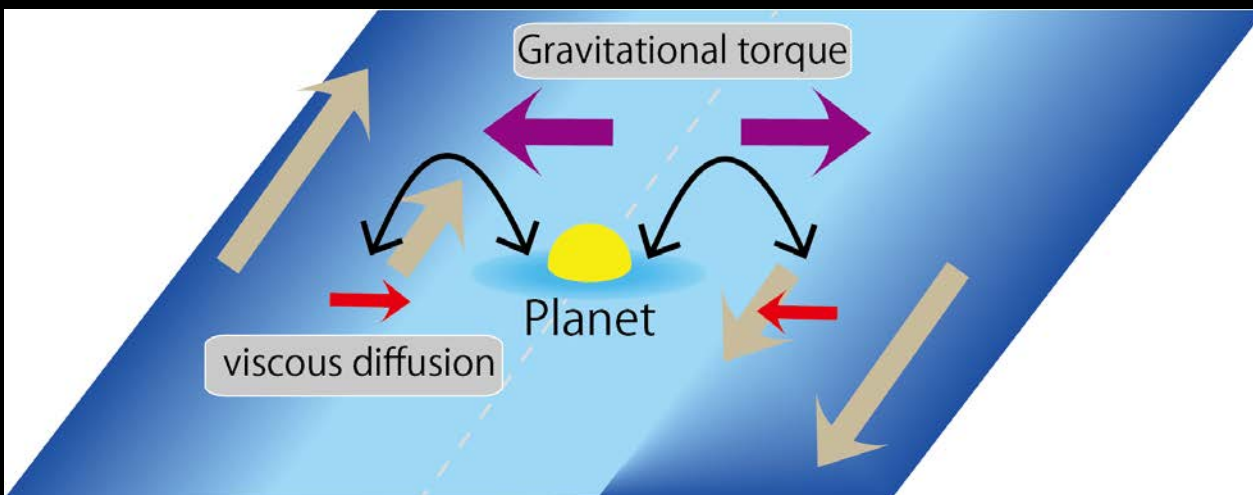
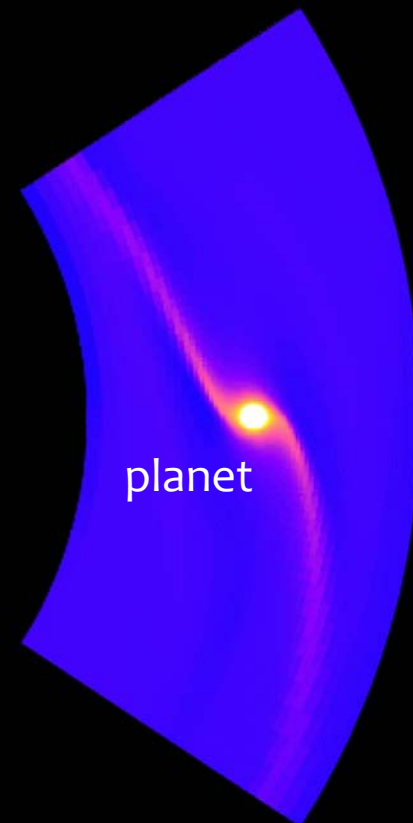
巨大惑星の形成と円盤進化

- 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)



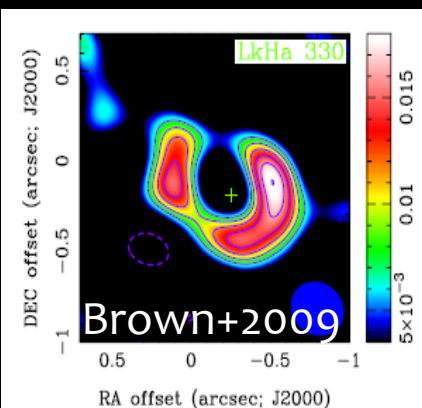
巨大惑星と原始惑星系円盤の共進化

前遷移円盤

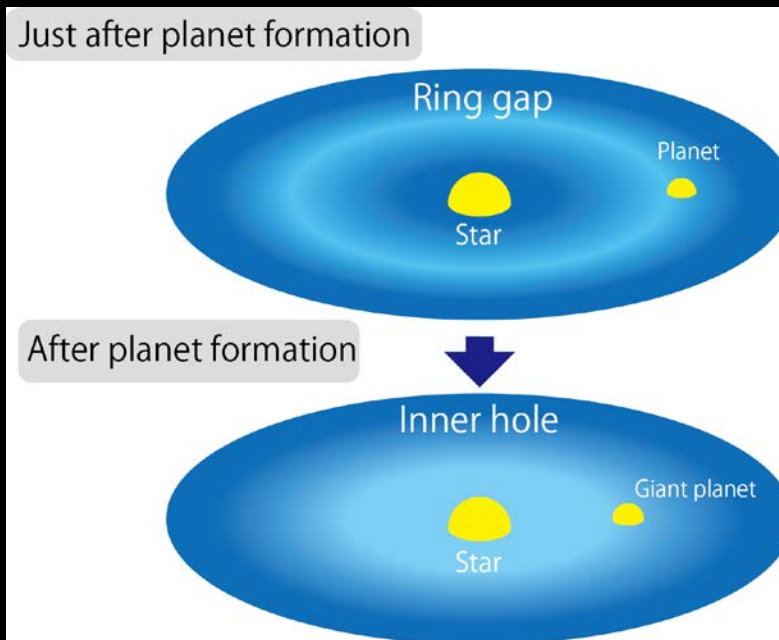
PDS70

Hashimoto+2012

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

- 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

周惑星円盤への円盤ガス供給

- 周惑星円盤へは常に原始惑星系円盤からガスが供給されている
- 周惑星系円盤構造 & 衛星形成は原始惑星系円盤からのガス供給に依存
- 原始惑星系円盤からのガス供給の長時間進化は衛星形成にとって重要
 - 惑星周りのガスの運動
Tanigawa et al. 2012などによって詳細に調べられている
 - 惑星-円盤相互作用によるギャップの形成 + 進化
ギャップの深さ・構造 (本研究の内容)

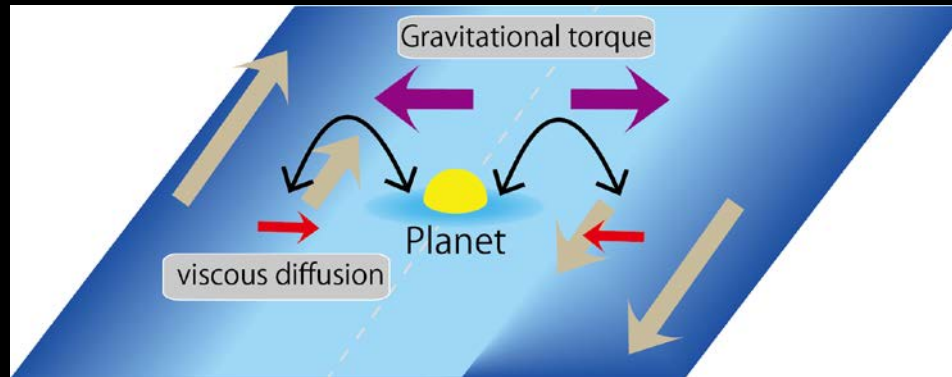
先行研究

- 数値流体シミュレーションを用いた研究
 - Klahr & Kley 2006
3D radio-hydro の計算
 - Zhu et al. 2012
2Dの長時間計算
 - Duffell & MacFadyen 2013
 - low viscosityのときの2Dギャップ形成
- 1D円盤モデルを用いた研究
 - Varniere et al. 2004
粘性、惑星-円盤相互作用による角運動量輸送の釣り合い
 - Crida et al. 2006
粘性・惑星-円盤相互作用による角運動量輸送に加え、プレッシャートルクによる角運動量輸送を考慮
 - Tanigawa & Ikoma 2007
レイリー条件を考慮

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-円盤相互作用

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

半径Rの円環が惑星から
受け取る角運動量
(トルク密度)

ケプラー回転している円盤でのギャップ構造

- 従来の研究: ガスはケプラー回転していると仮定していた

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

- 基礎方程式

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

惑星近傍では(Σ は Ω や F_M より早く変化)

面密度の積分方程式

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

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

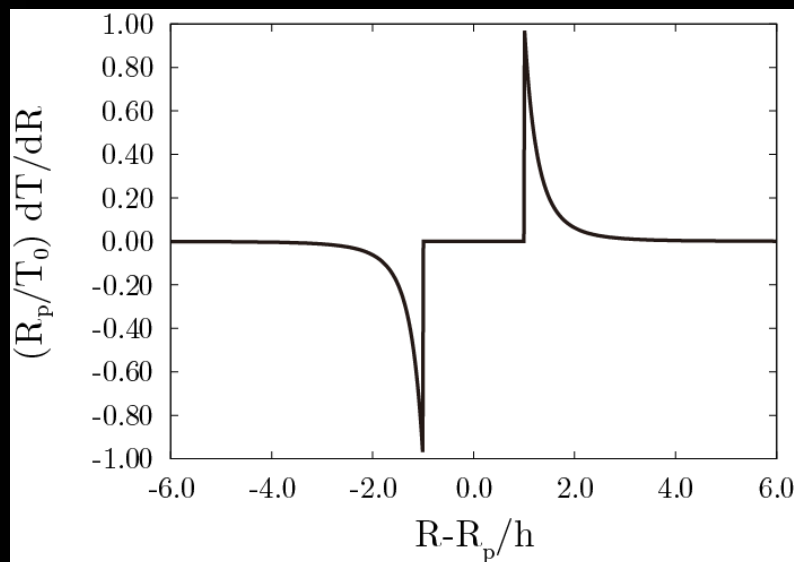
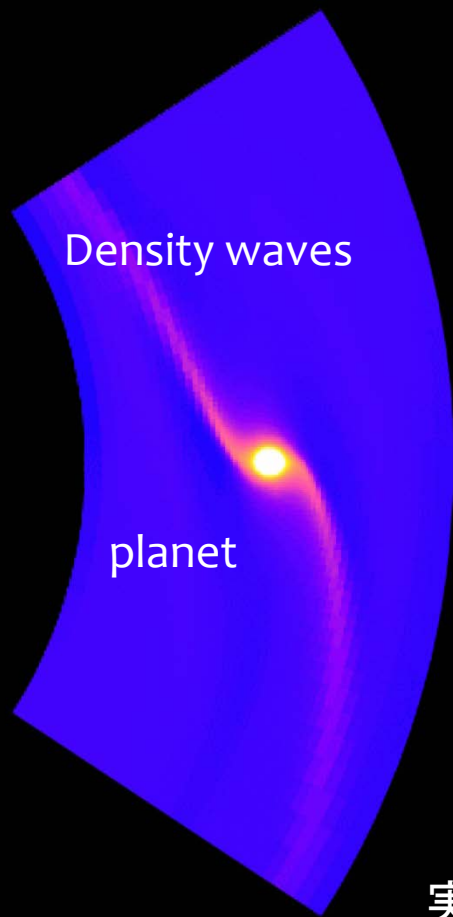
$$\frac{(R^2 \Omega)}{dR} \geq 0$$

- 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)

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

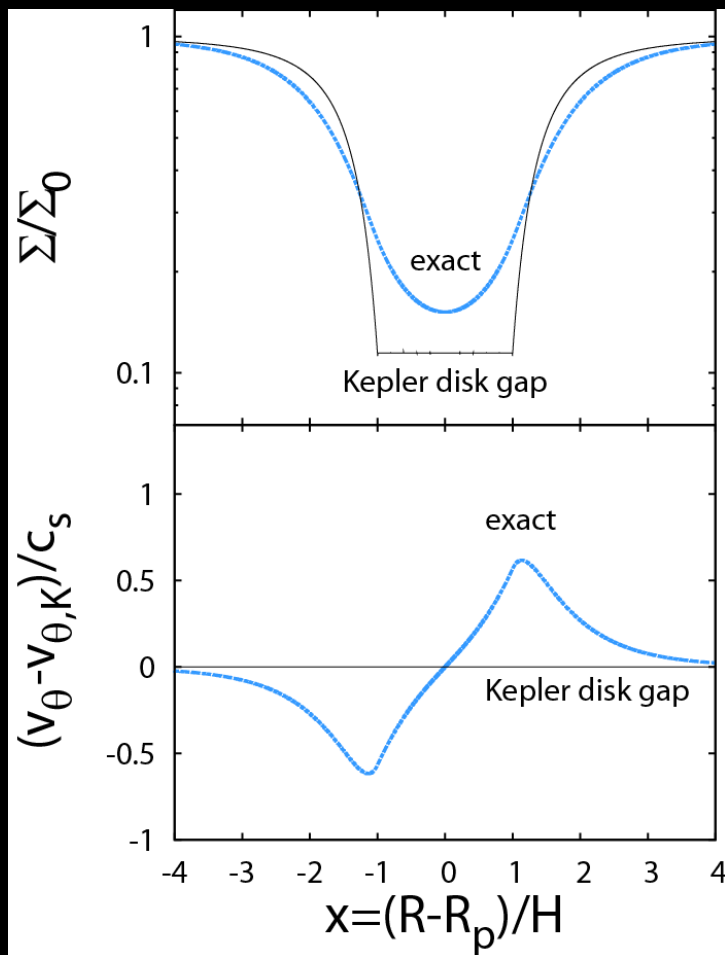


実際には、密度波の伝播・減衰を考える必要がある

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

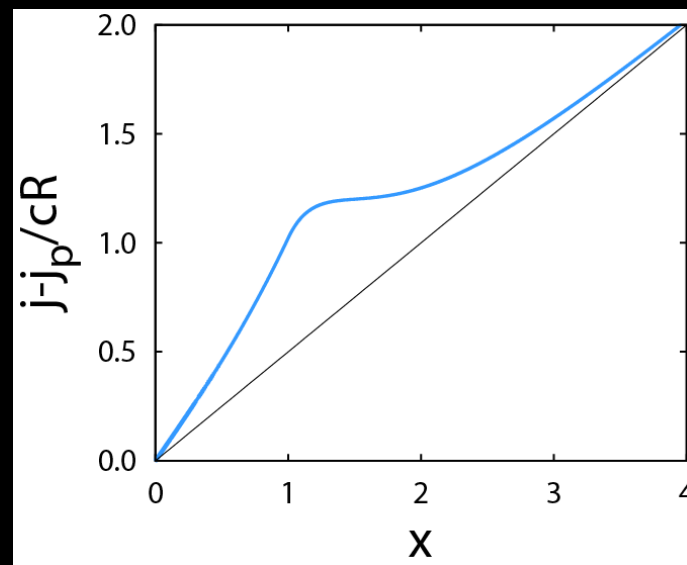
1Dモデルの結果 ギャップの構造 (惑星が小さいとき)

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



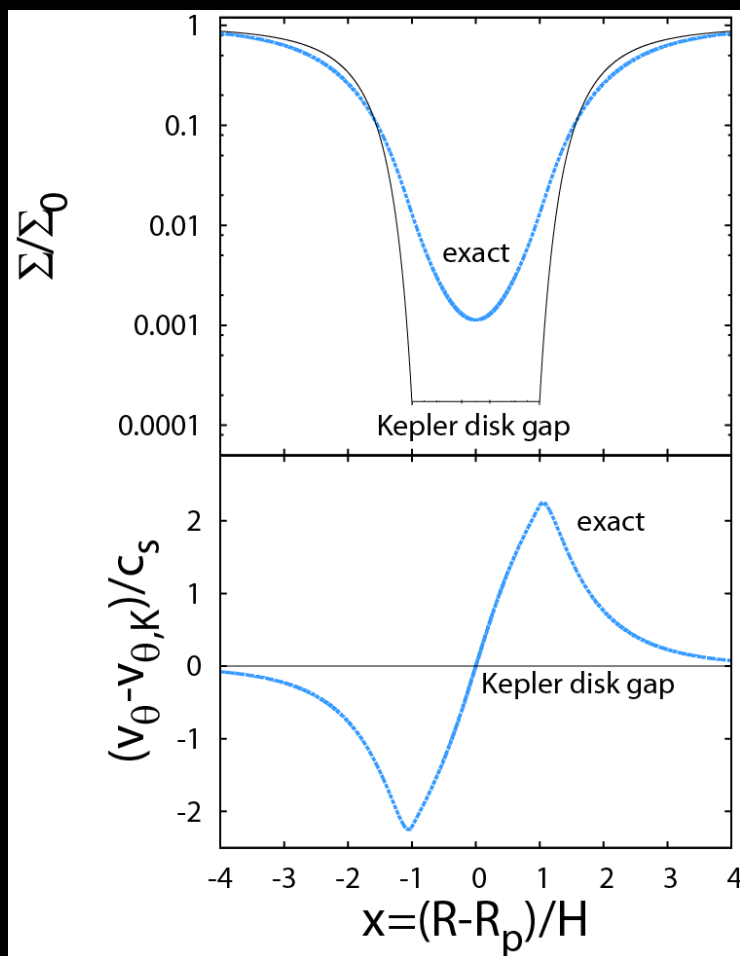
回転則変化の影響

- 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)

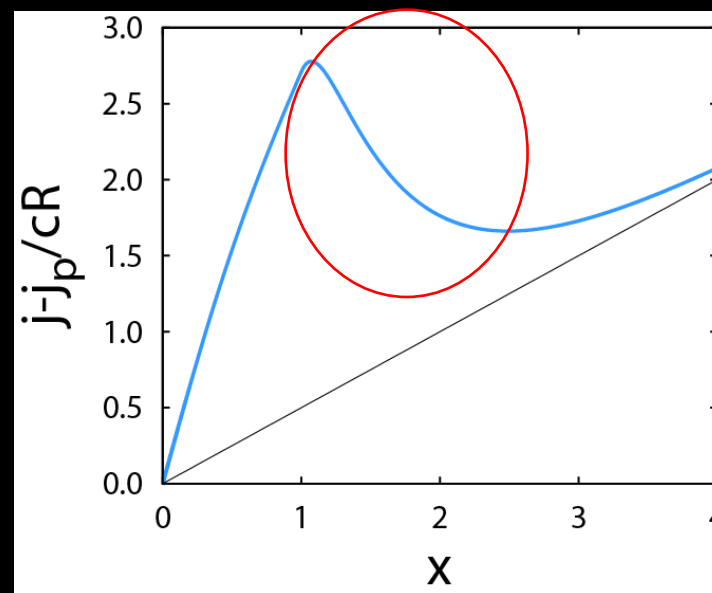
$$M_p = 20M_{\oplus}, H/R = 1/30, \alpha = 10^{-3}$$



回転則変化の影響

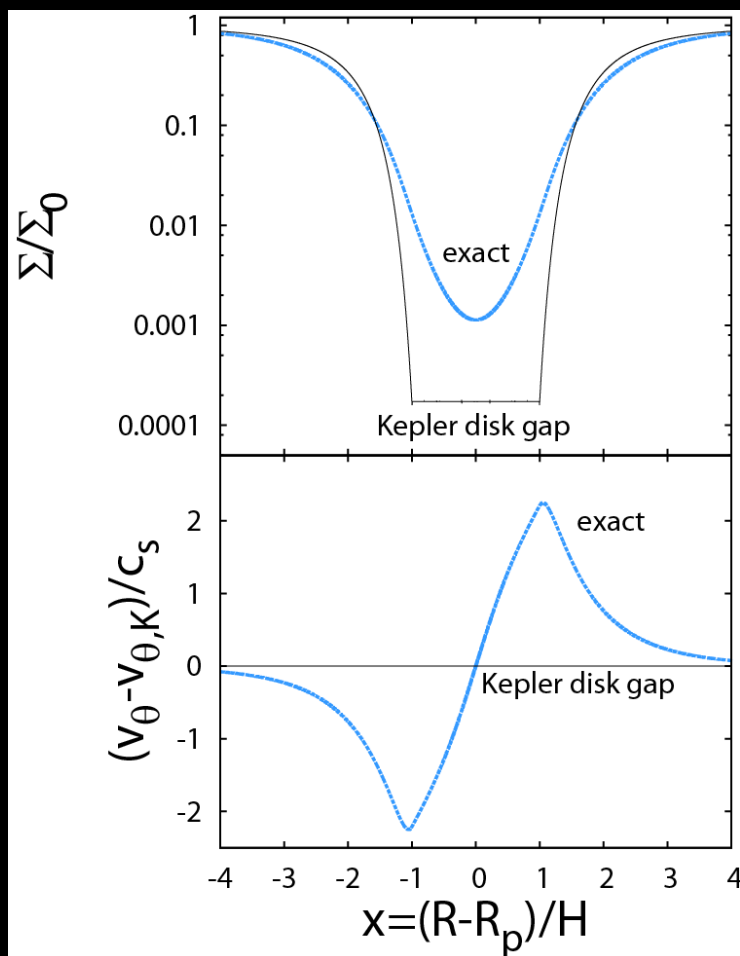
- レイリー条件が破れる

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



ギャップの構造 (惑星が大きいとき)

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

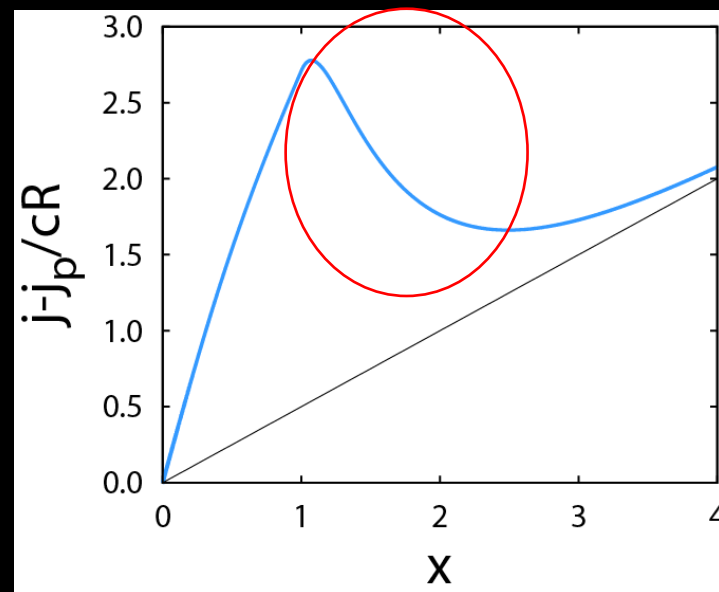


レイリー条件を考慮した基礎方程式

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

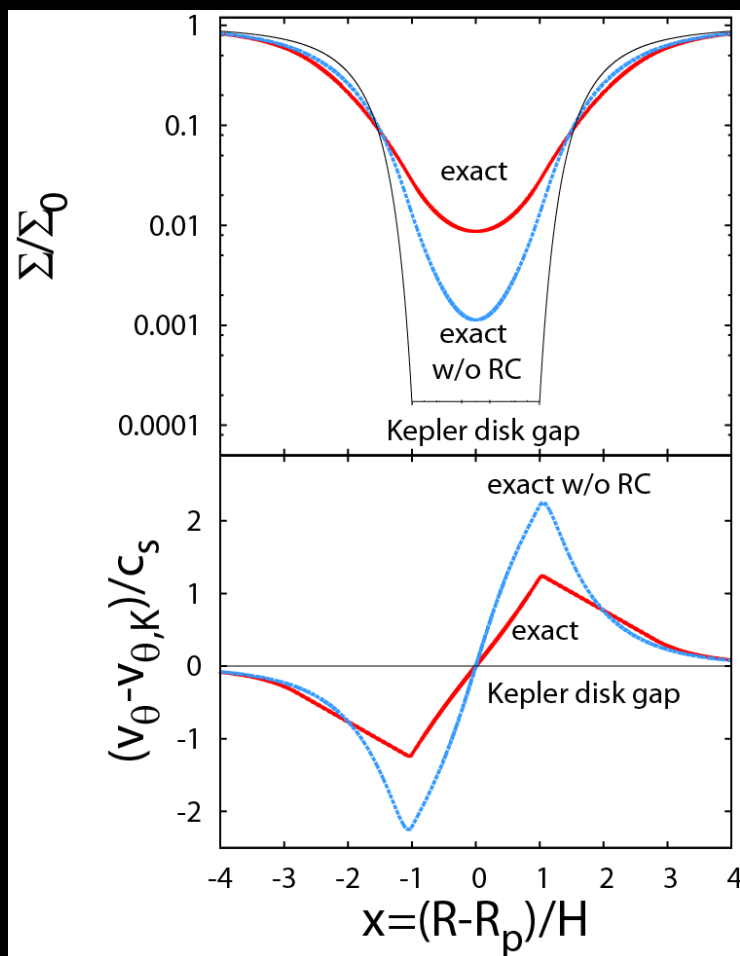
$$\frac{d^2 \ln \Sigma}{dR^2} = -1$$

← 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



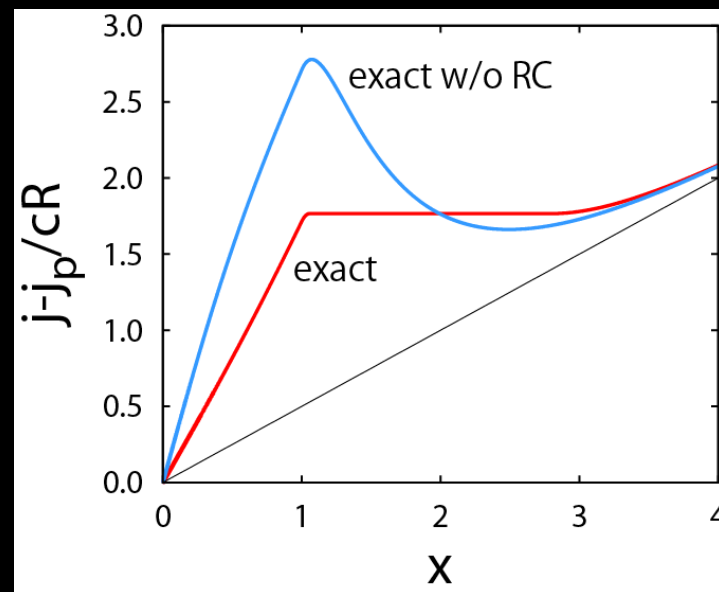
ギャップの構造 (惑星が大きいとき+レイリー条件を考慮)

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



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



まとめ

- 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

今後の展望

- 原始惑星系円盤のギャップ構造と惑星質量を結びつける
 - 重い惑星による密度波の励起
 - 円盤の力学不安定 (e.g., Rossby instability)
 - 密度波の伝播・減衰
- ギャップの時間進化を考える
 - 惑星&周惑星円盤への質量降着
 - ギャップを横切る流れ
 - 惑星移動