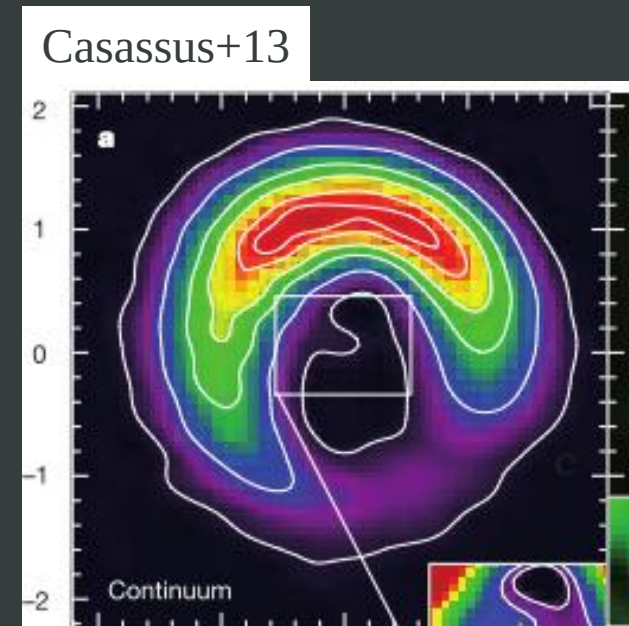
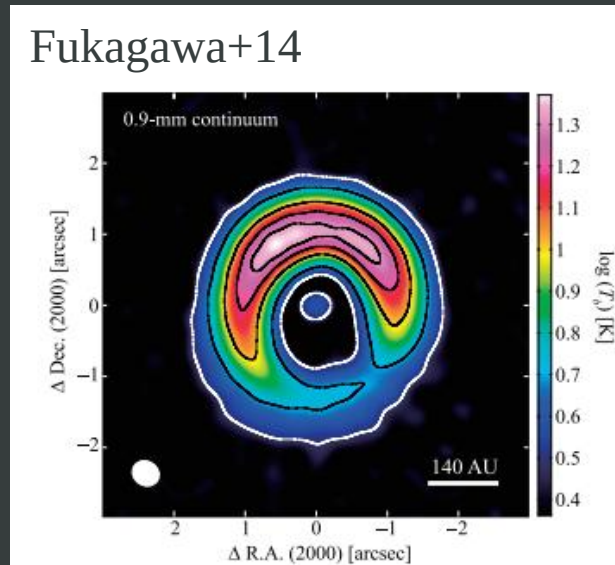
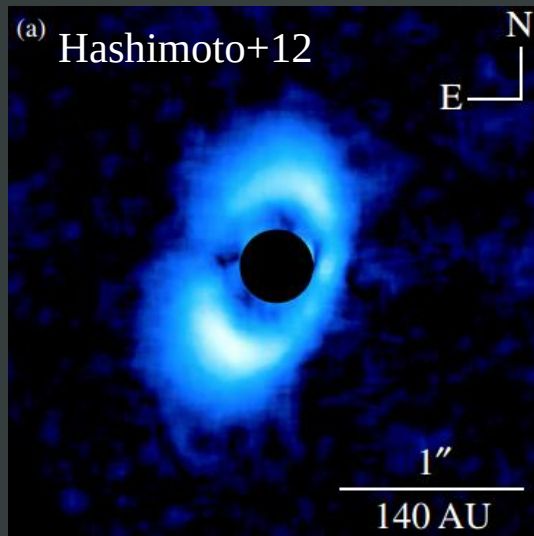


巨大惑星周辺の原始惑星系 円盤ガス構造について

金川和弘 (北海道大学 低温科学研究所)
田中秀和(北大低温研), 武藤恭之(工学院大),
谷川享行(産医大), 竹内拓(東工大)

原始惑星系円盤のギャップ構造

サブミリ波・赤外線観測によって続々と「ギャップ構造」を持った円盤が見つまっている



巨大惑星が作ったギャップ？

巨大ガス惑星による円盤ギャップ形成から衛星系の形成に関していえること

- 周惑星円盤への物質供給について
- 比較的大きな衛星の軌道進化 (巨大惑星の移動と同じメカニズム)

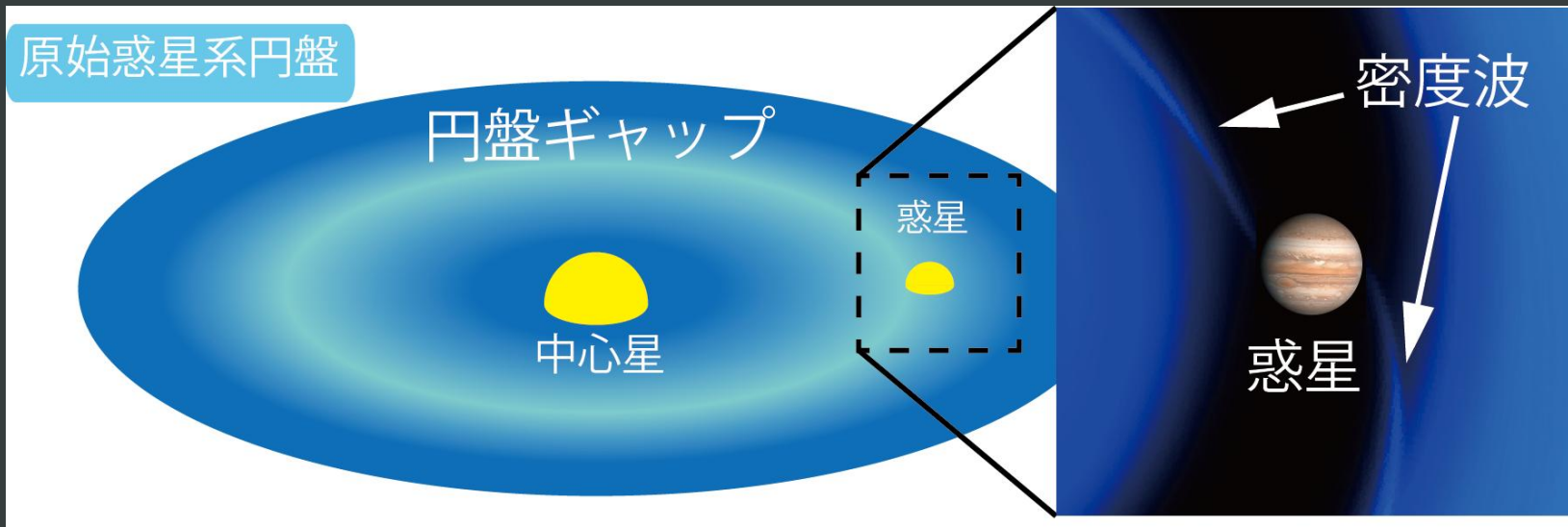
巨大惑星による円盤ギャップの形成

①密度波の励起

惑星は円盤との重力相互作用により、円盤に密度波を励起し、ガスと角運動量をやりとりする（惑星移動の原因）

②ギャップの形成

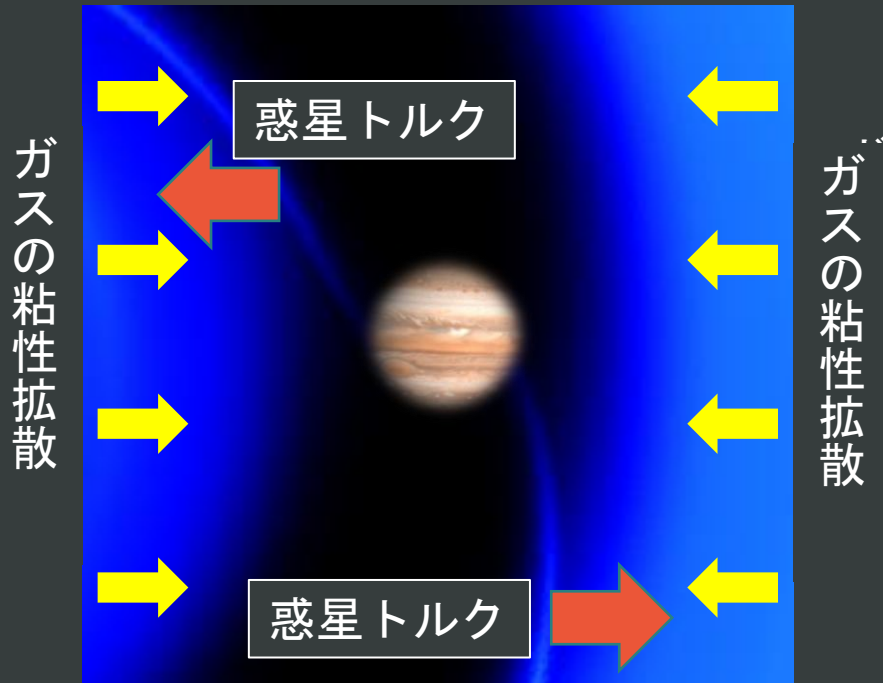
巨大な惑星は強力な重力相互作用によって周辺のガスを吹き飛ばし、惑星軌道に沿ってガス密度が低下したギャップ領域を作る



ギャップが形成されると...

- 惑星移動が遅くなる (i.e., Type II migration) ⇒ 比較的大きい衛星でも同じ
- 惑星周りのガス(ダスト)密度が低下 ⇒ 周惑星円盤への物質供給率を下げる

惑星質量と（定常）ギャップ深さの関係



惑星トルクでギャップを掘る

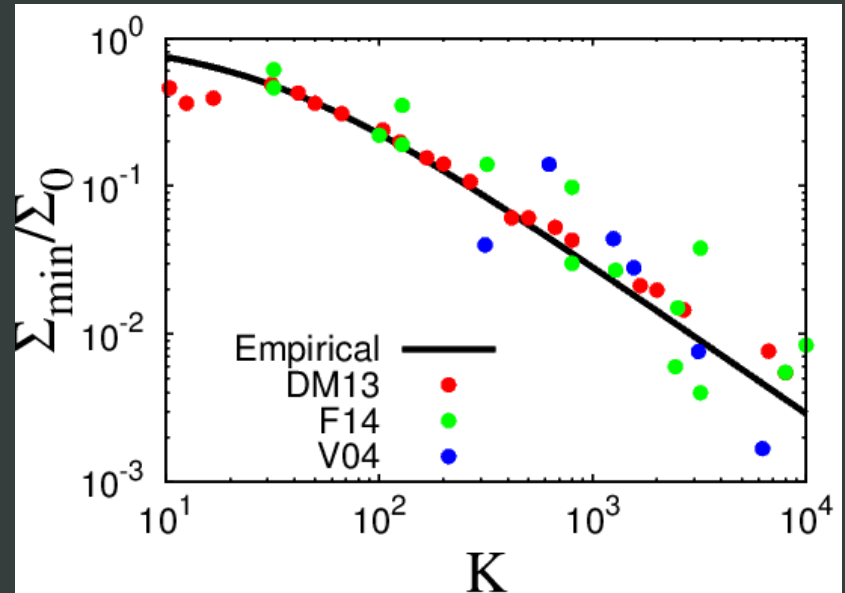
vs.

ガスの粘性拡散でギャップを埋める

最新の数値流体シミュレーション(Duffell & MacFadyen 2013, Fung et al 2014)

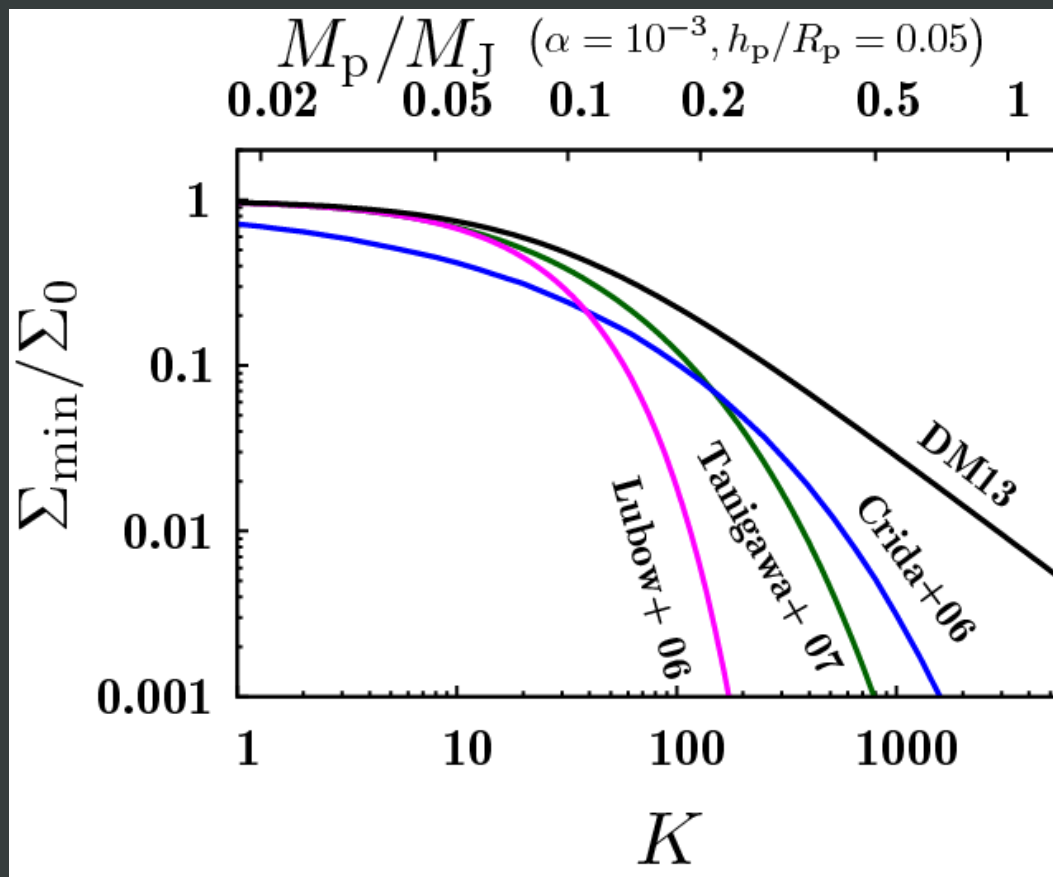
$$\frac{\Sigma_{\min}}{\Sigma_0} = \frac{29}{29 + K}$$

$$K \equiv \alpha^{-1} \left(\frac{M_p}{M_*} \right)^2 \left(\frac{h}{R} \right)^{-5}$$



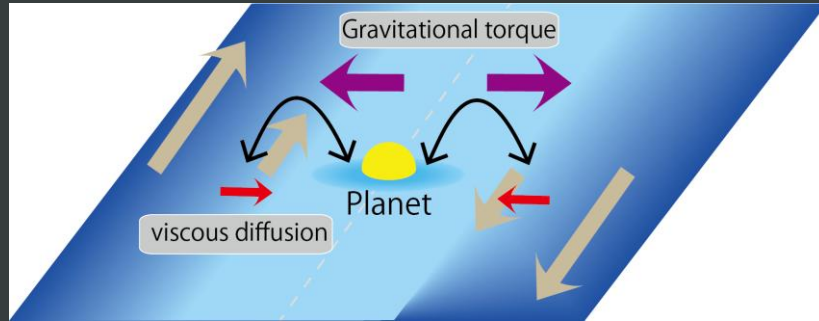
惑星移動・成長率（周惑星円盤へのガス供給量）を決めるためには幅も重要
1D粘性円盤を用いた惑星周辺のギャップ構造のモデル化が必要

従来研究の 1 次元モデル



従来研究のモデルでは数値計算の結果を説明できない

円盤ギャップの1次元モデル



仮定

- 惑星移動・成長なし
- 等温な円盤
- 局所近似
- 定常状態

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

ケプラー回転からずれる
回転則の変化による流体不安
定(レイリー条件)も考慮

角運動量保存

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

粘性拡散

+

$$- \int_R^\infty \Lambda(R') dR'$$

惑星トルク

密度波が伝播する効果も考慮

惑星トルクと粘性角運動量輸送の釣り合い

$$T_0 \propto \left(\frac{M_p}{M_*} \right)^2 \left(\frac{h}{R} \right)^{-3} R_p^4 \Omega_K^2 \Sigma_0$$

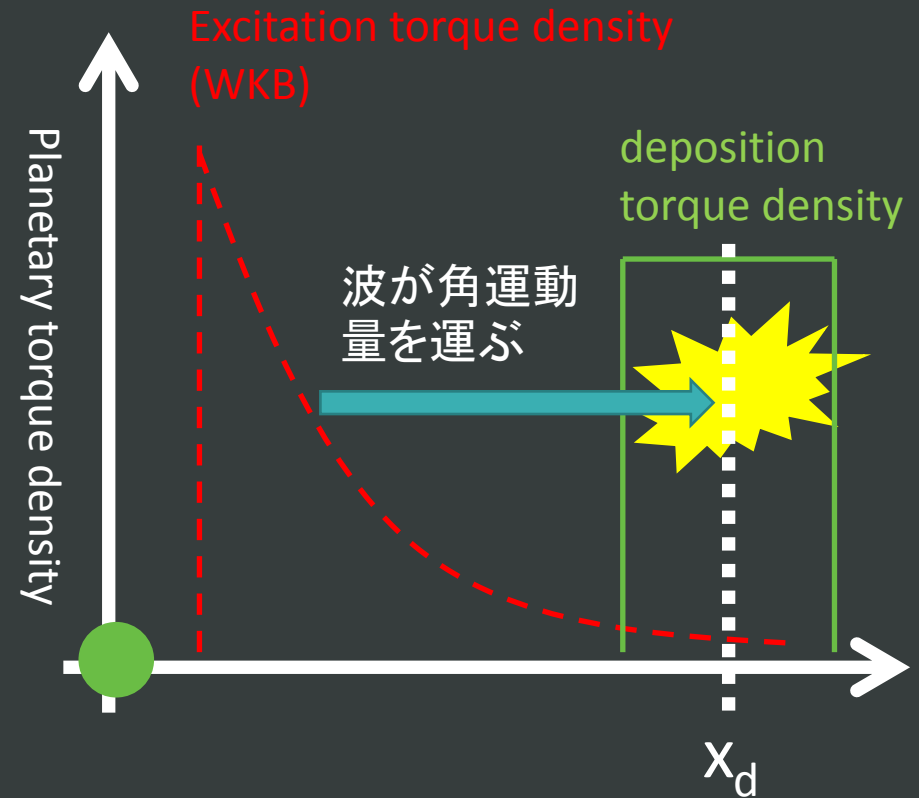
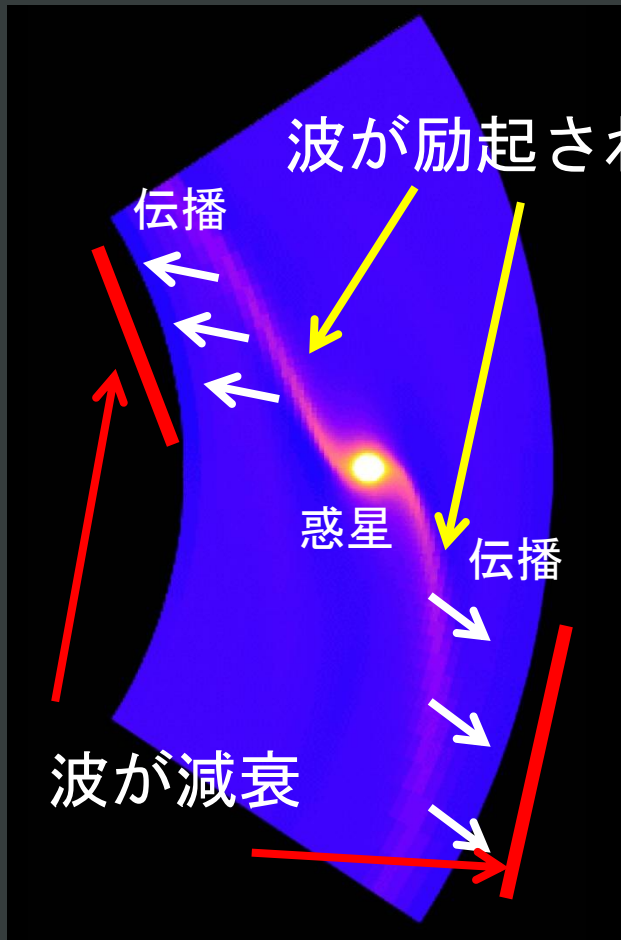
$$F_{0,\nu} \propto \alpha \left(\frac{h}{R} \right)^2 R_p^4 \Omega_K^2 \Sigma_0$$



$$K \equiv \alpha^{-1} \left(\frac{M_p}{M_*} \right)^2 \left(\frac{h}{R} \right)^{-5}$$

密度波の伝播・減衰

密度波の伝播を考えると惑星からもらった角運動量を円盤が受け取る場所が変わってくる

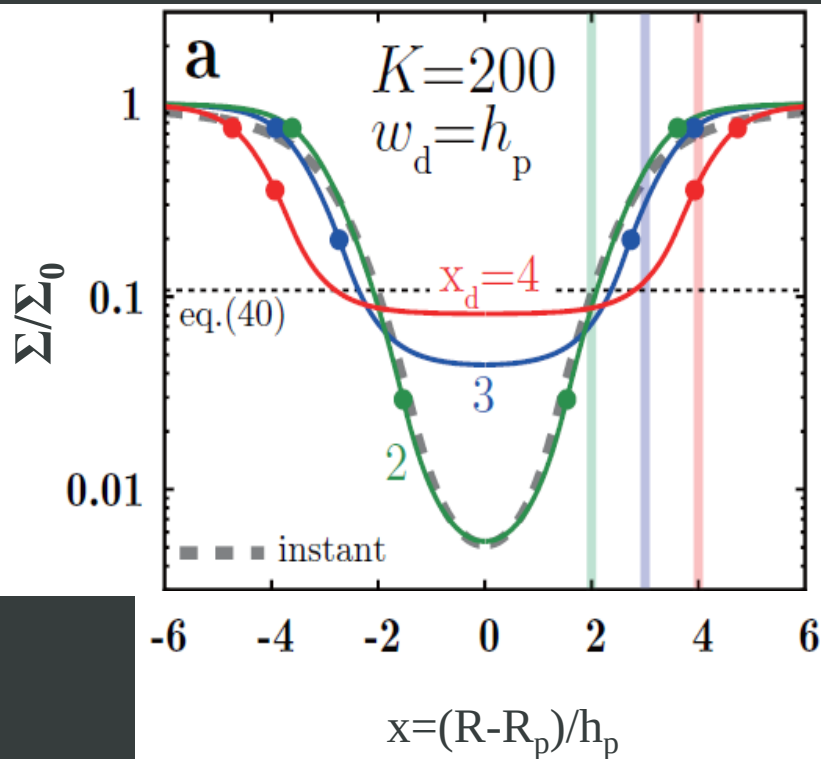


波の減衰位置はパラメータ
実際は、粘性・ショックによって減衰する

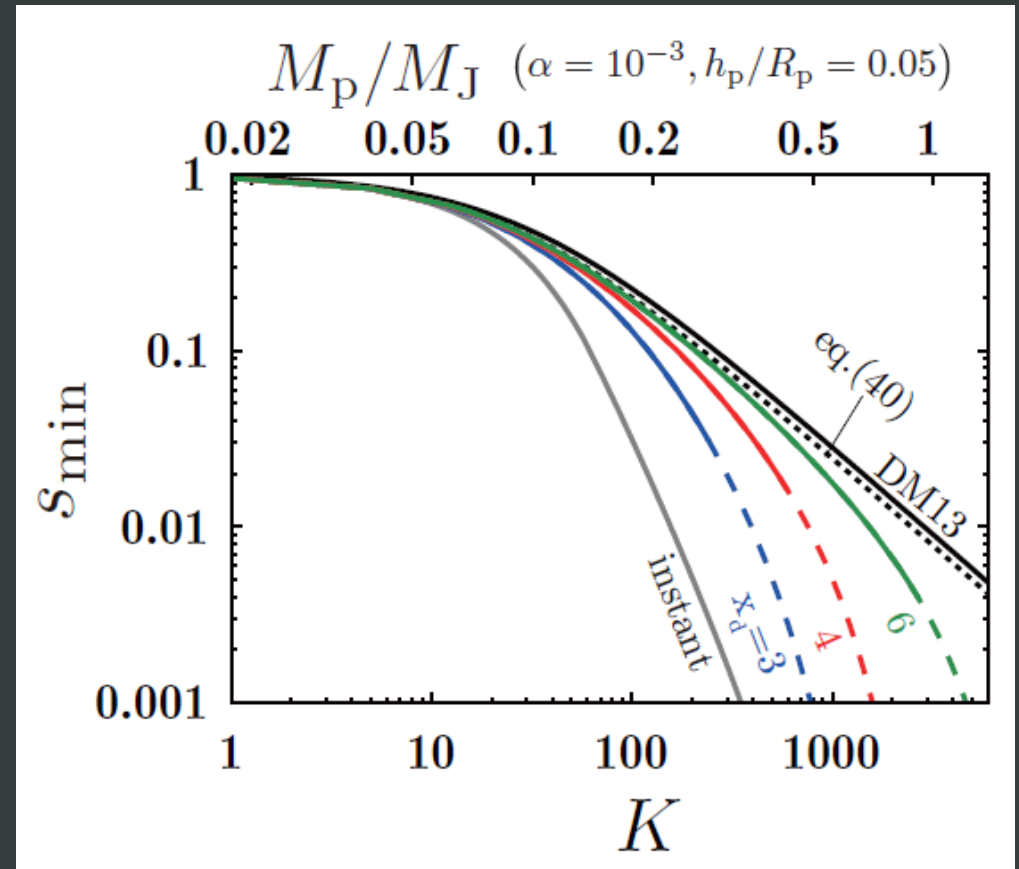
$$f(x) = \begin{cases} 1 & (x_d - 1/2 < |x| < x_d + 1/2) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

円盤ギャップのガス密度構造と深さ

K=200 のときのガス面密度の分布
 $M_p = 1/4 M_J$, $\alpha = 10^{-3}$, $h/R = 0.05$



ギャップの深さ



密度波が減衰する場所によって、ギャップの幅・深さが変化
 数値計算結果を説明するためには、 $1/4 M_J$ の場合 3-4 スケールハイト程度離れた位置で波が減衰する必要がある

円盤ギャップモデルまとめ

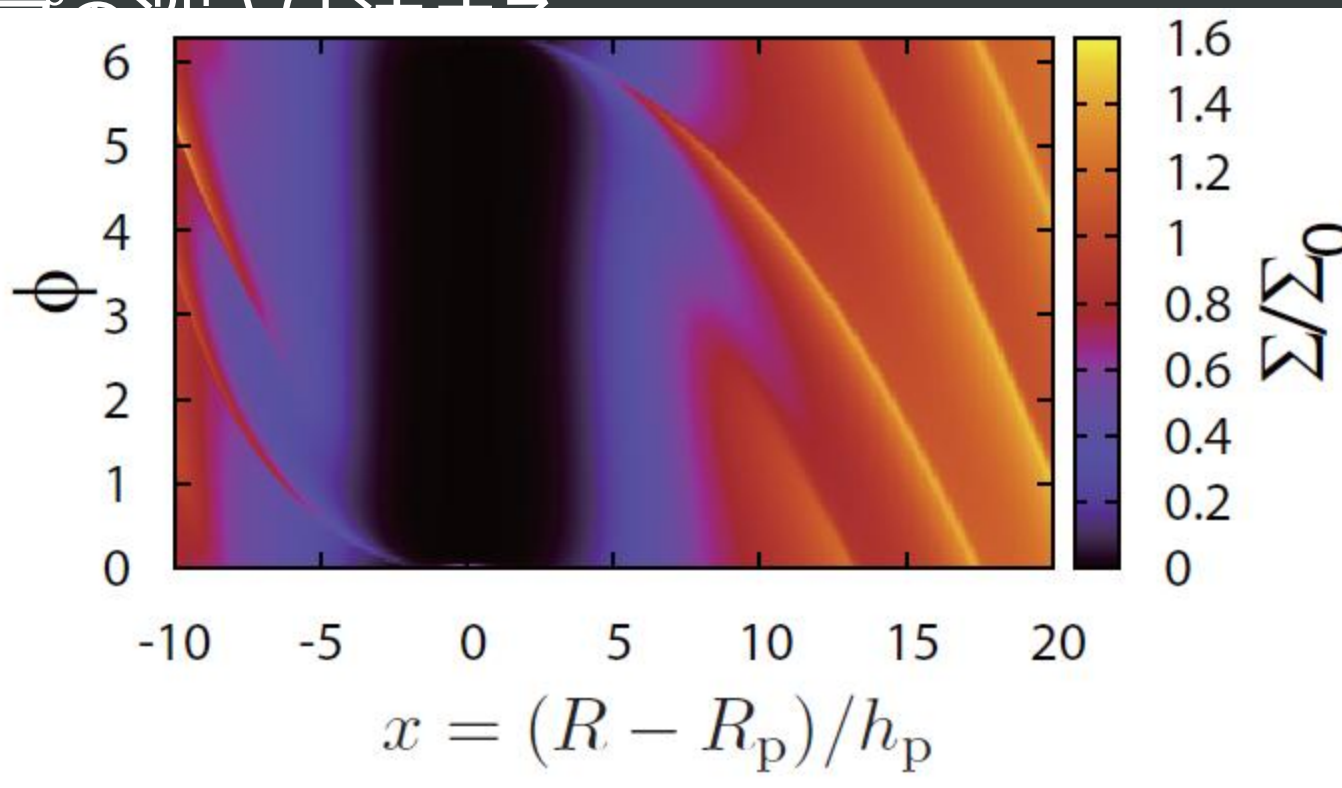
- ・粘性による角運動量輸送と惑星トルクのつり合いで
ギャップの深さが決まる

- ・密度
所で

- ・数値
量が
減衰

- ・密度
えで重要

- ・今後調べていく必要がある



す場

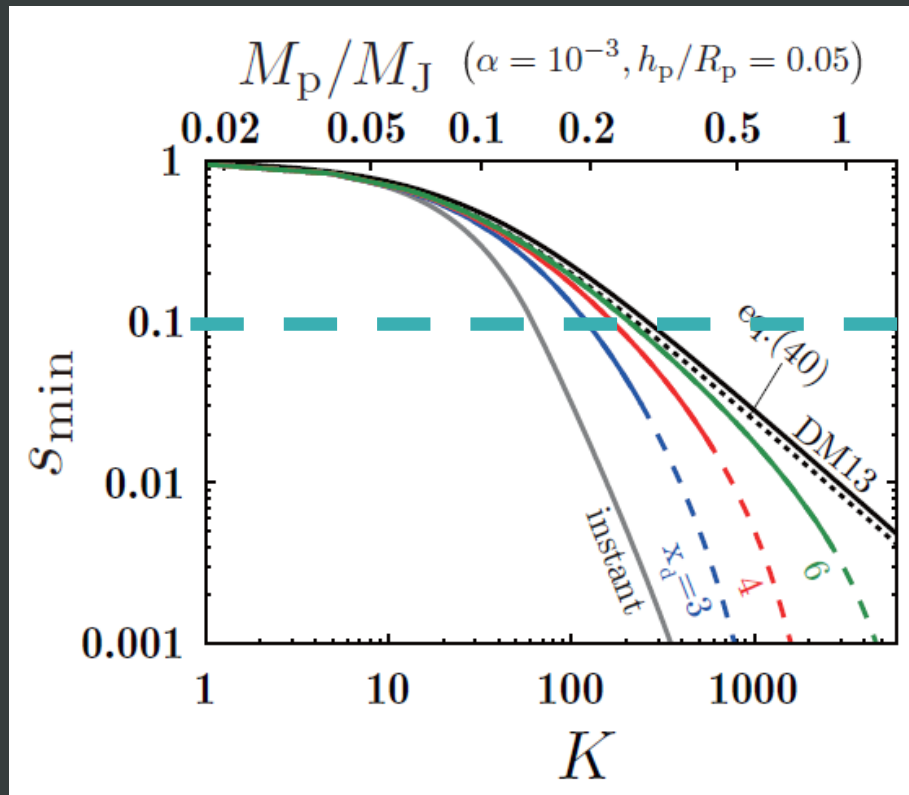
星質
位置で

めるう

観測への適用：ギャップ内の惑星質量の推定

サブミリ波・赤外線で観測されたギャップ構造から惑星質量を推定できるか？  ガス密度が分かれば **YES**

もし、底が端のガス密度の0.1倍であるギャップが見つかった場合 $K \sim 200$



惑星が作ったギャップであれば
幅は 6~8 スケールハイト程度

観測への適用：ギャップ内の惑星質量の推定

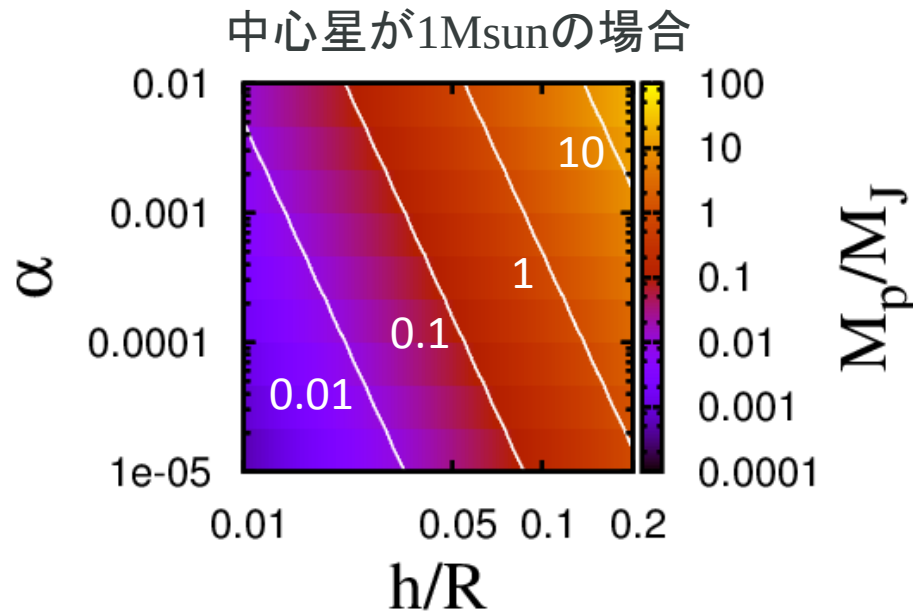
サブミリ波・赤外線で観測されたギャップ構造から惑星質量を推定できるか？  ガス密度が分かれば **YES**

もし、底が端のガス密度の0.1倍であるギャップが見つかった場合 $K \sim 200$

$$\frac{\Sigma_{\min}}{\Sigma_0} = \frac{29}{29 + K}$$

$$K \equiv \alpha^{-1} \left(\frac{M_p}{M_*} \right)^2 \left(\frac{h}{R} \right)^{-5}$$

ギャップの深さに対応する惑星質量は円盤スケールハイト・粘性に依存



- 円盤スケールハイト
惑星の場所でだいたい決まる？
- 円盤粘性
典型的には $\alpha = 10^{-3}$

円盤モデル

MMSNモデルを仮定

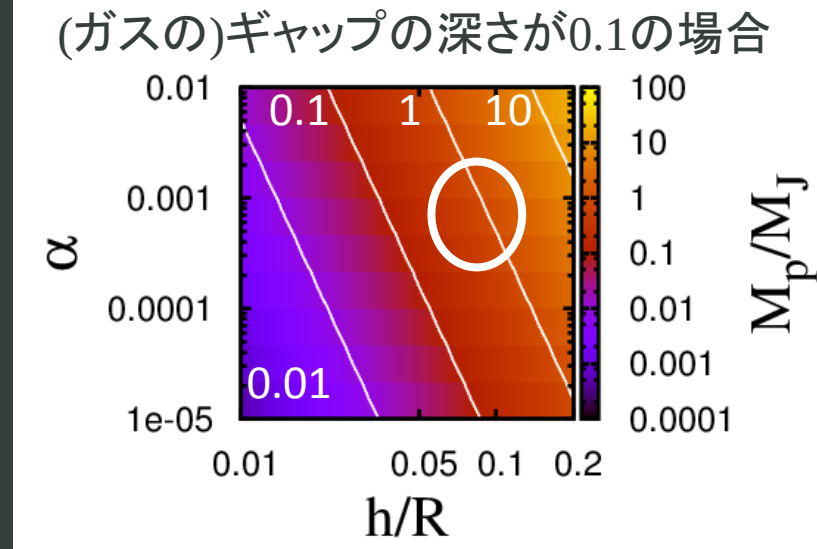
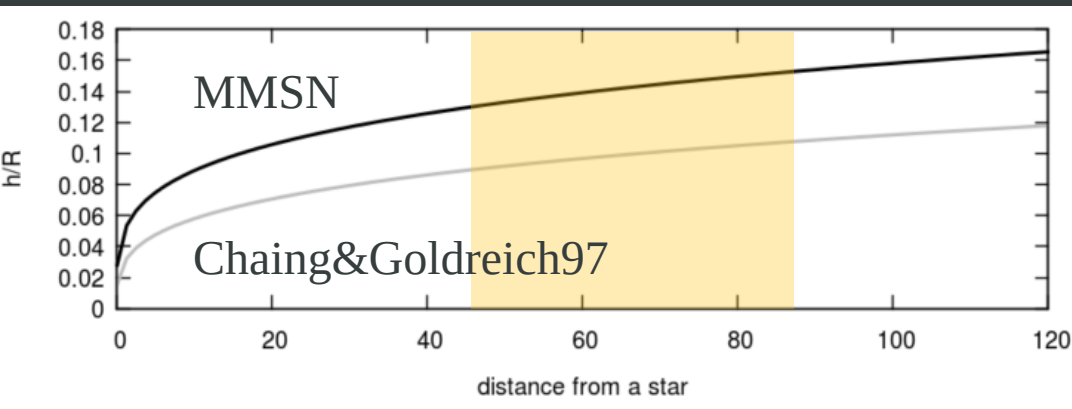
$$\frac{h}{R} = 0.05 \left(\frac{R}{1 \text{ AU}} \right)^{1/4} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-1/8}$$

中心星質量の依存性は弱い
中心星からの距離で大体決まる

$$T = 280 \left(\frac{R}{1 \text{ AU}} \right)^{-1/2} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{3/4}$$

円盤粘性: 標準的な円盤寿命
(~1Myr) から推定すると $\alpha \sim 10^{-3}$

現在観測されているような
領域では $h/R = 0.1$ 程度



まとめ

- 惑星による円盤ギャップの形成
 - 周惑星円盤への物質供給に重要
 - 原始惑星系円盤のギャップ構造の起源？
- ギャップの深さ・幅と惑星質量の関係
 - 密度波がどこで減衰するのが重要
 - しかし、理論モデル・数値流体計算によって大体分かってきた
- サブミリ波・赤外線の内盤観測への応用
 - ガスのギャップの深さがわかればギャップ内の惑星質量を推定できる