

原始惑星系円盤内に存在する 惑星周囲の粒子軌道

武藤恭之（京都大学）

共同研究者

犬塚修一郎（京都大学）

Muto and Inutsuka 2008
arXiv:0810.5314

概要

- 原始惑星系円盤内の惑星周囲のダスト粒子軌道の解析的計算
 - ガスの効果をfullに考慮
 - 数値計算(3体問題+ガス)によって確認
 - 幅広いパラメタレンジで、円盤中のダストの運動を理解できる
- 応用例:ダスト粒子の軌道長半径の長時間進化モデル
- 議論:ダスト観測を通じた、ガス円盤中の惑星の検出可能性?

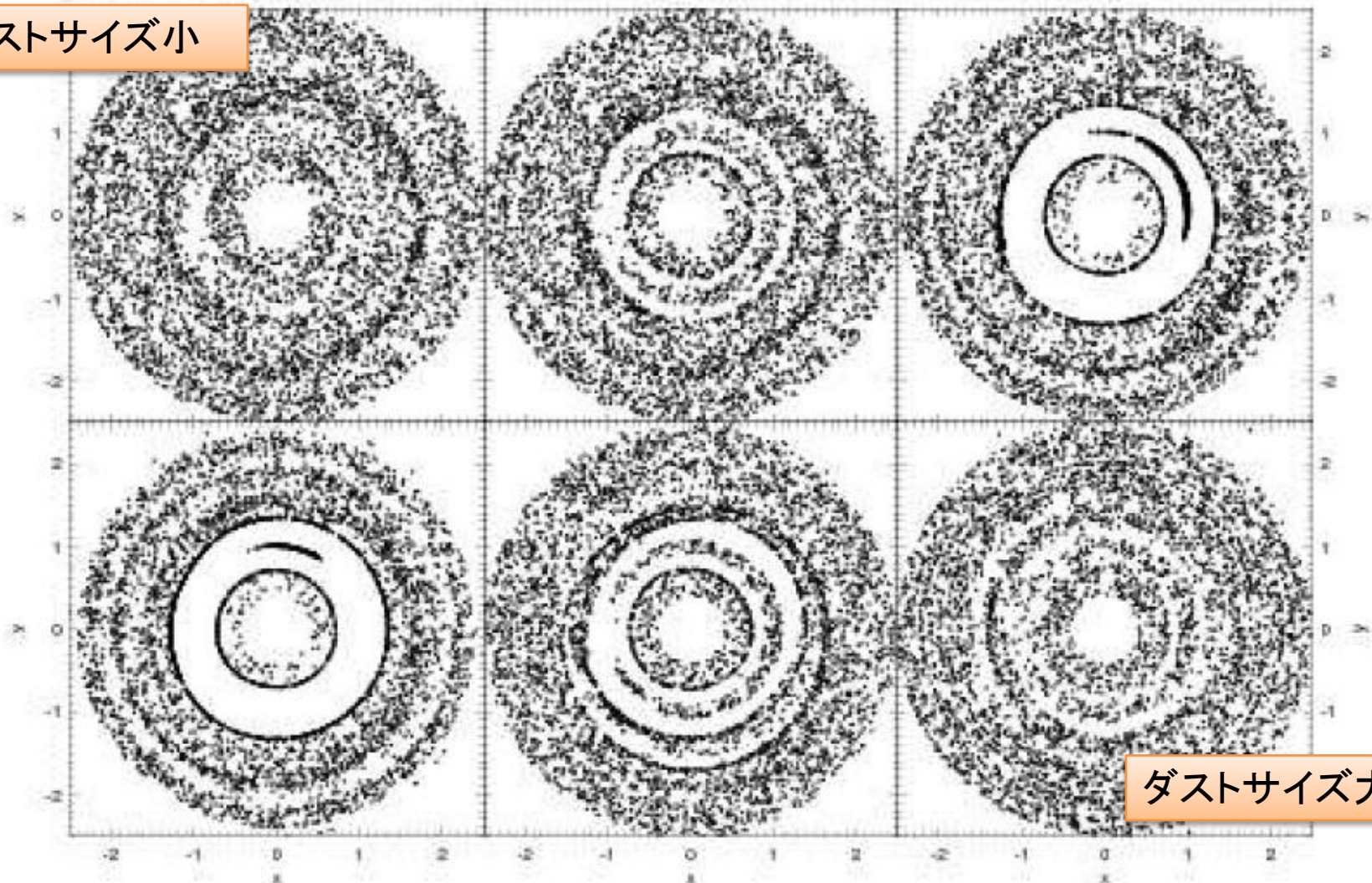
Introduction: dust gap formation

- 海王星～木星程度の質量の惑星＋ガス円盤＋ダスト粒子のシミュレーション
- ガスのgapがはっきりしていなくても、**ダストのgap**を作る可能性がある
 - Paardekooper 2006など
- 円盤直接撮像による観測可能性

色々なサイズのダスト分布

$M=1M_J$

ダストサイズ小



ダストサイズ大

今回の研究：解析的取り扱い

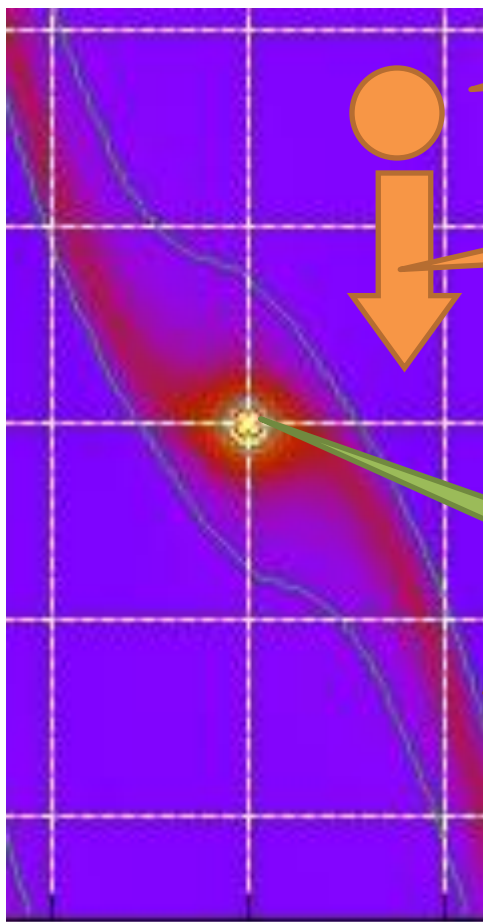
- **長時間の進化**を追いたい
 - Paardekooperの計算は、数10～100 orbits
- **一般的な結果**があると有効
 - 軽い惑星の場合はどうなるのか？
 - 地球質量程度の惑星を、dust gapとして検出できるか？
- Dust gap formationの物理の理解
 - 何の効果がどの程度効いているのか？

ダスト粒子軌道の解析的計算

系のセットアップ: 局所近似

方位角方向

中心星



粒子

粒子運動

惑星

ガスのス
パイラル

動径方向

ダストの運動の基礎方程式

- 惑星周囲の運動を考える

- Hill系 + ガス摩擦

ガス摩擦

惑星重力

$$\ddot{x} - 2\Omega_p \dot{y} = 3\Omega_p^2 x - \nu(\dot{x} - v_{x,\text{gas}}) - \frac{\partial}{\partial x} \psi_p$$

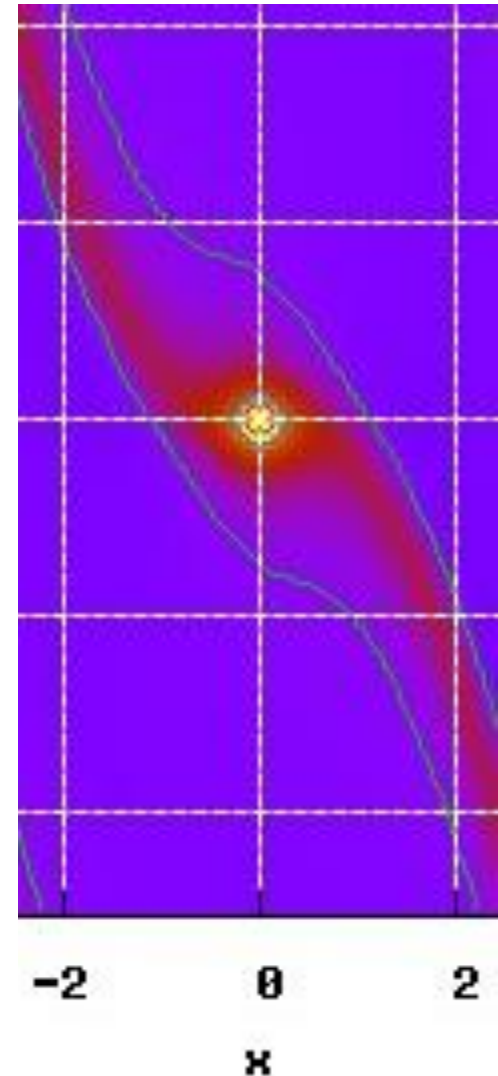
$$\ddot{y} + 2\Omega_p \dot{x} = -\nu(\dot{y} - v_{y,\text{gas}}) - \frac{\partial}{\partial y} \psi_p$$

$$\psi_p = -\frac{GM_p}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

ν : 摩擦係数 (ダストサイズに対応) ← 定数を仮定

考慮するガスの効果

- 動径方向の圧力勾配
- 中心星へのaccretion flow
- Spiral density wave
 - 摂動計算で求める(2次まで計算)



解析計算：近似

- Impulse近似
- 初期にダスト粒子は円軌道
- 一回の惑星とのencounterによる軌道長半径変化を計算

今回の計算で見えない主な効果：
共鳴とclose encounter

惑星の軌道長半径変化率

$$\begin{aligned}\frac{\Delta b}{T} = & 2\eta v_{\text{p}} \frac{\nu \Omega_{\text{p}}}{\nu^2 + \Omega_{\text{p}}^2} + \zeta v_{\text{p}} \frac{\nu^2}{\nu^2 + \Omega_{\text{p}}^2} \\ & - \text{sgn}(b) \frac{4 r_{\text{H}}^3}{T b^2} \frac{\nu \Omega_{\text{p}}}{\nu^2 + \Omega_{\text{p}}^2} + \frac{\alpha r_{\text{H}}^6}{T b^5} \frac{\Omega_{\text{p}}^2}{\nu^2 + \Omega_{\text{p}}^2} \\ & + \text{sgn}(b) \frac{2 r_{\text{H}}^3}{T b H} \left[e^{-(b/H)} \text{Ei} \left(\frac{b}{H} \right) - e^{b/H} \text{Ei} \left(-\frac{b}{H} \right) \right] \frac{\nu \Omega_{\text{p}}}{\nu^2 + \Omega_{\text{p}}^2},\end{aligned}$$

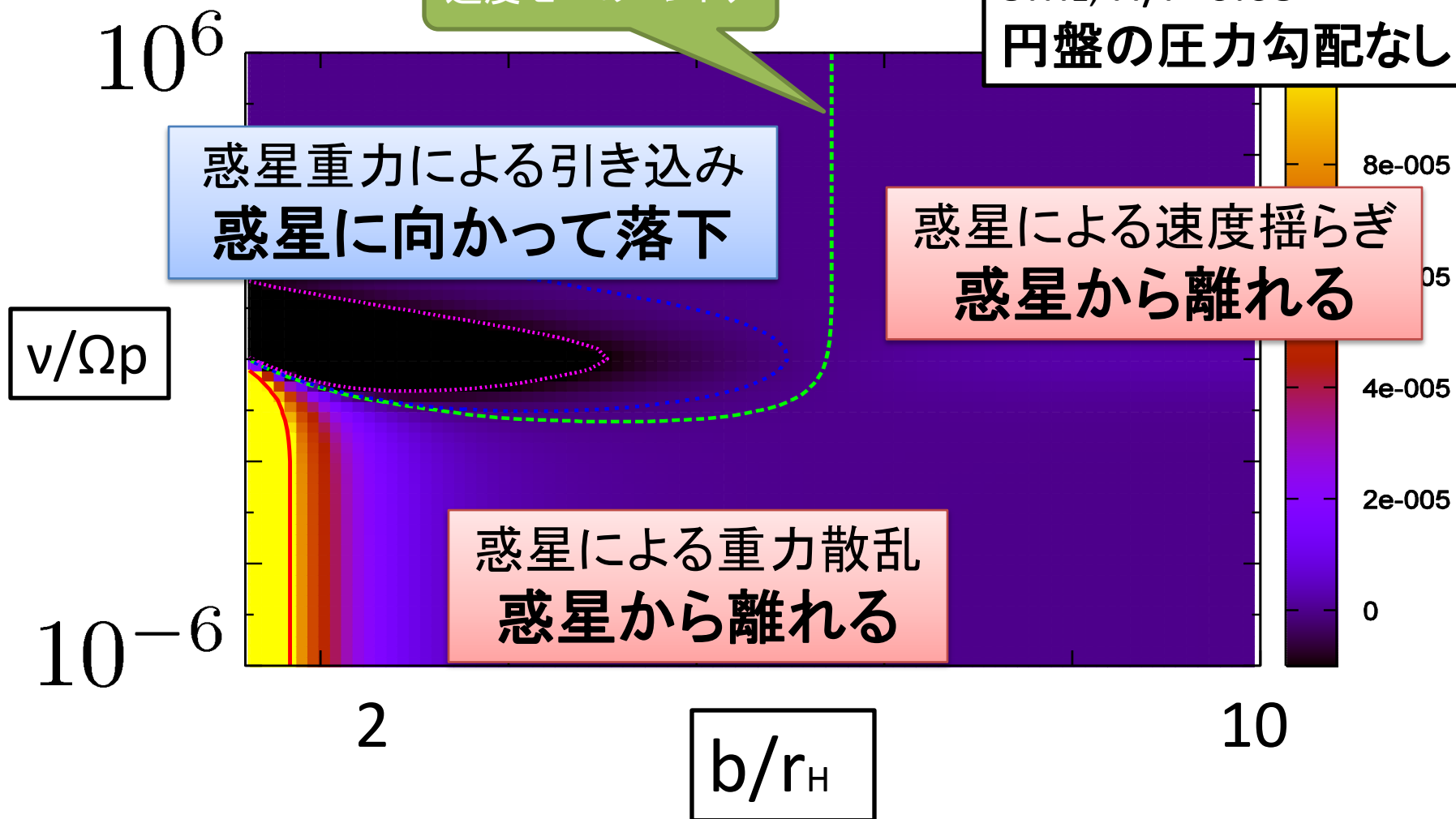
$$\alpha \equiv \frac{128}{27} \left[K_1 \left(\frac{2}{3} \right) + 2K_0 \left(\frac{2}{3} \right) \right]^2 = 30.094$$

粒子の動径方向移動速度

速度ゼロのコントア

3M_E, H/r=0.05

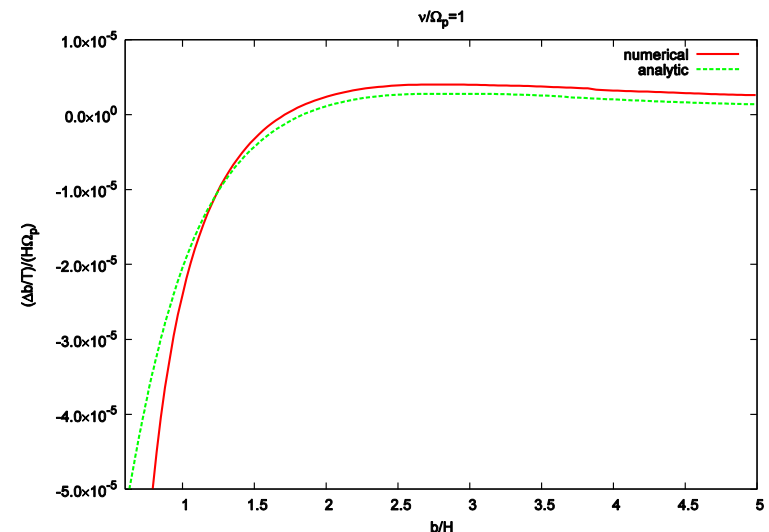
円盤の圧力勾配なし



数値計算との比較

- Hill系による計算や、global計算との比較
- わかったこと：
 - 摩擦係数が大きいダストについては良い近似
 - 摩擦係数の小さいダストについても、定性的なふるまいは記述可能

- N体シミュレーションへの適用可能性：
必要なガスの速度分布を analytic に与えられる



応用例

ダスト粒子の長時間進化モデルと
観測可能性

原始惑星系円盤内のダストの長時間 進化モデル

1次元モデル: 動径方向のみ

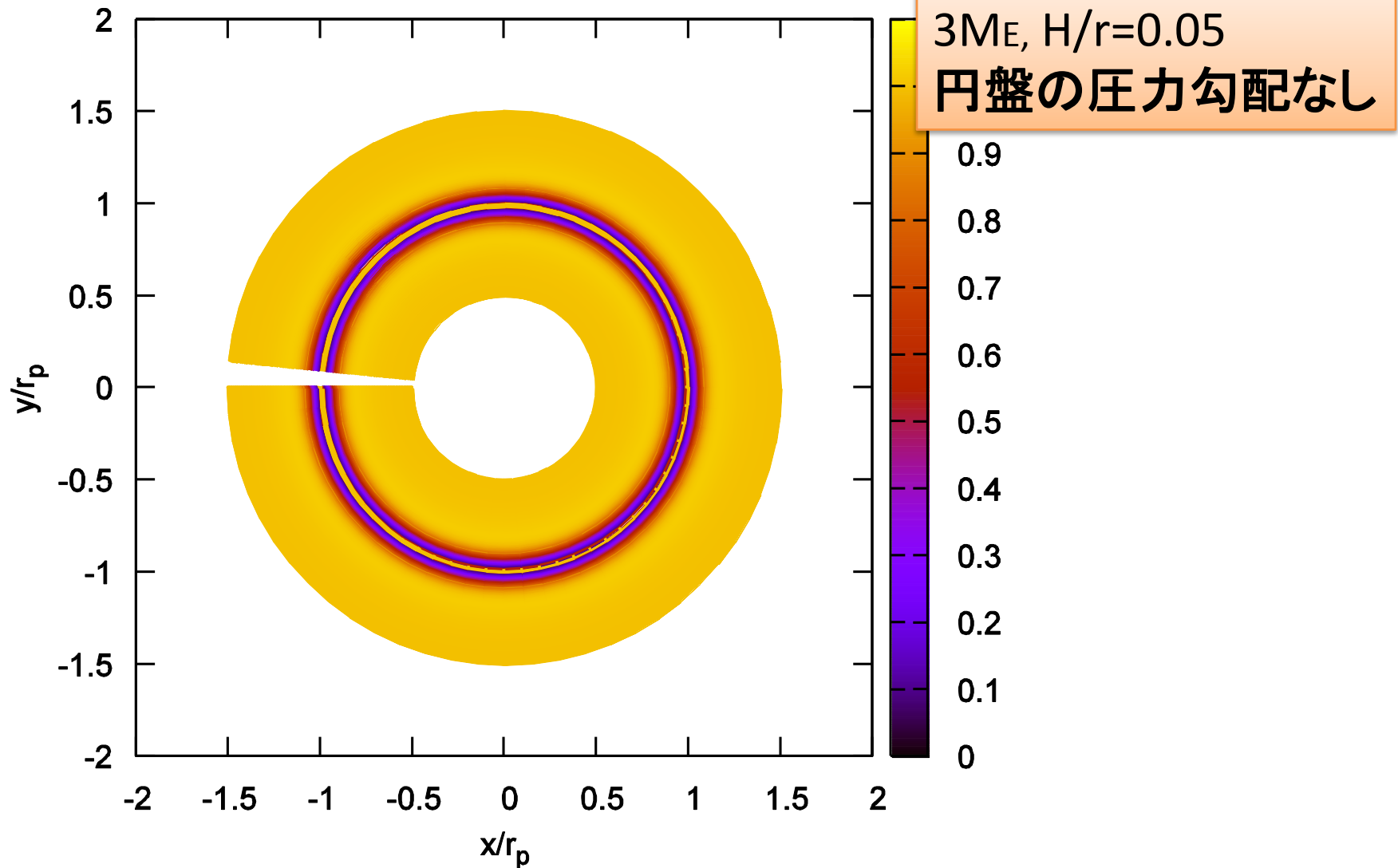
$$\frac{\partial N(t, b)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial b} [v_b(b) N(t, b)] = 0$$

ダストの動径方向の速度
解析的に求めた一回のencounterの式を使う

100万年分くらいが簡単に追える

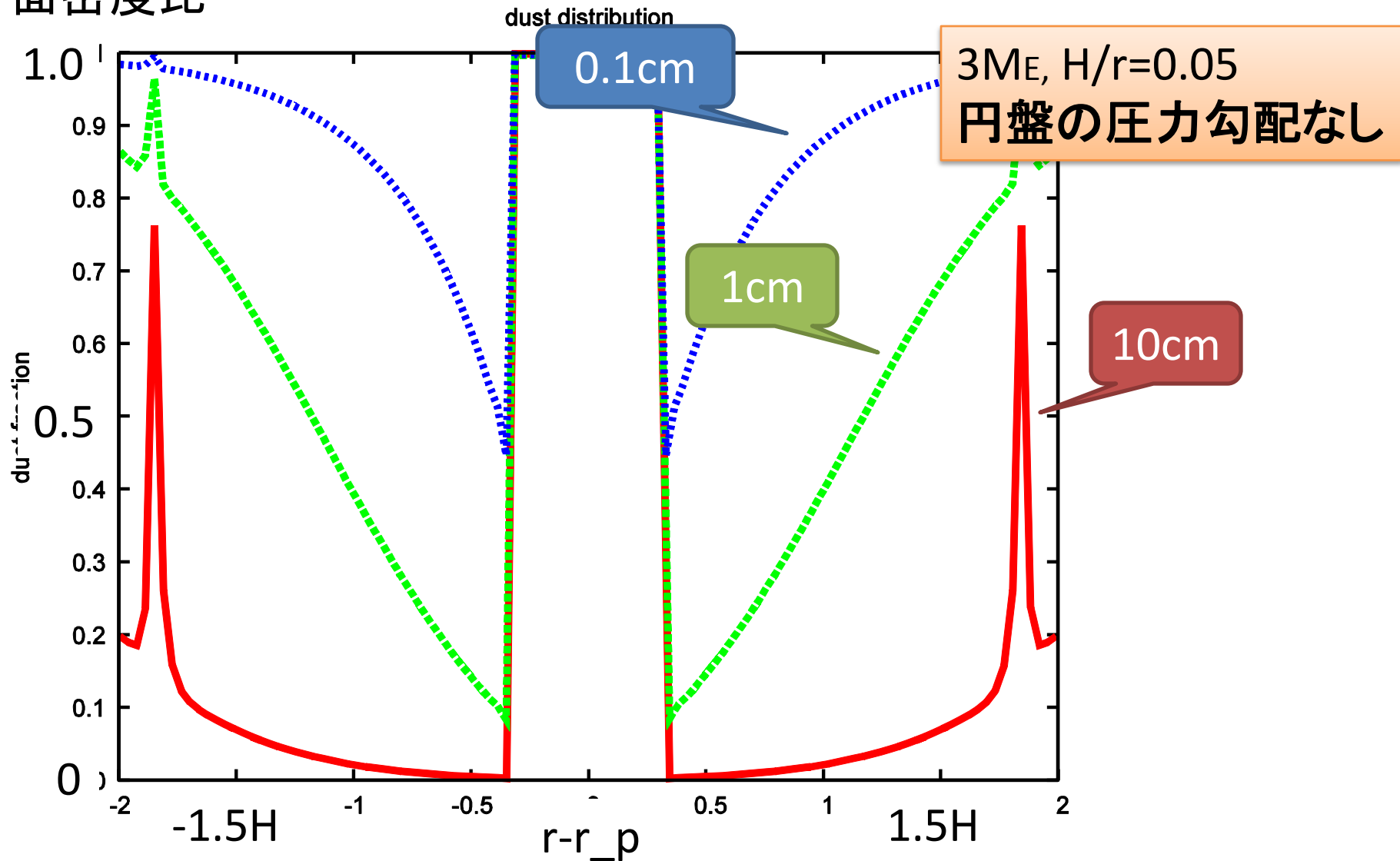
1cmダストの分布 @ $t=10^6$ yr

1cm dust at $t=10^6$ yr



ダストの分布 @ $t=10^6$ yr

面密度比



Discussion

地球サイズ惑星の観測可能性

- $GM_p\Omega^2/H^3=0.1$ 、1cm以上のダストで、ほぼスケールハイト程度のgap
- $H/r_p=0.05$ 、 $3M_E@30AU$ でgap幅 $\sim 1-2AU$
- 必要な分解能：**100pcで0.01秒角 with $\lambda>1cm$**
- ただし、より小さなダストが消えていれば、より短い波長でも大丈夫かもしれない
- ALMAでぎりぎり。SKAでは可能かもしれない。

まとめ

- 惑星周囲のダスト粒子軌道進化の解析的公式を導出
 - ガスの効果をfullに考慮
 - 幅広いパラメタレンジで、円盤中のダストの運動を理解できる
- ダスト粒子の軌道長半径の長時間進化モデルと、円盤中の低質量系外惑星の観測可能性
 - Dust gapとして低質量の惑星を検出できる可能性
 - ALMAやSKAでの直接撮像
 - Gap幅 → 惑星質量の目安