

巨大ガス惑星周りの衛星系形成と 周惑星円盤数値流体シミュレーション

谷川 享行

Takayuki Tanigawa

一関工業高等専門学校

National Institute of Technology, Ichinoseki College

町田正博(九州大学)、大槻圭史(神戸大学)

巨大ガス惑星周りの衛星系

- 巨大ガス惑星周りに普遍的に存在
- 規則衛星 と 不規則衛星 に分類

ー 規則衛星

- ほぼ円軌道・惑星赤道面
- 公転半径小(惑星に近い軌道)
- 質量で全衛星の大部分
- → 周惑星円盤の中での形成を示唆

ー 不規則衛星

- 公転半径大(惑星から遠い軌道)
- 大きな離心率 and/or 大きな軌道傾斜角
- → 小天体の捕獲を示唆

外惑星の衛星

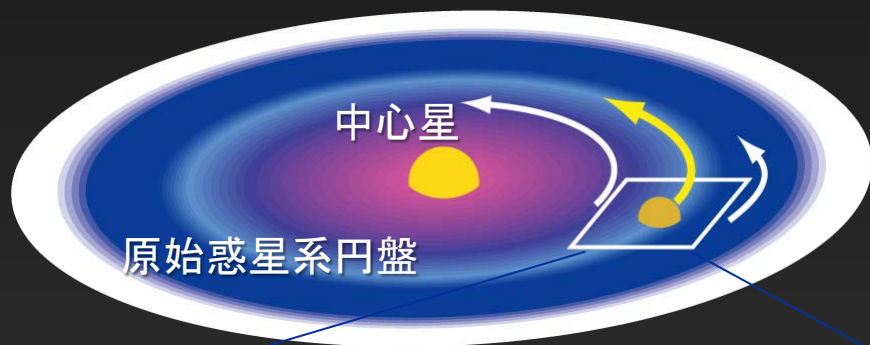


木星とガリレオ衛星



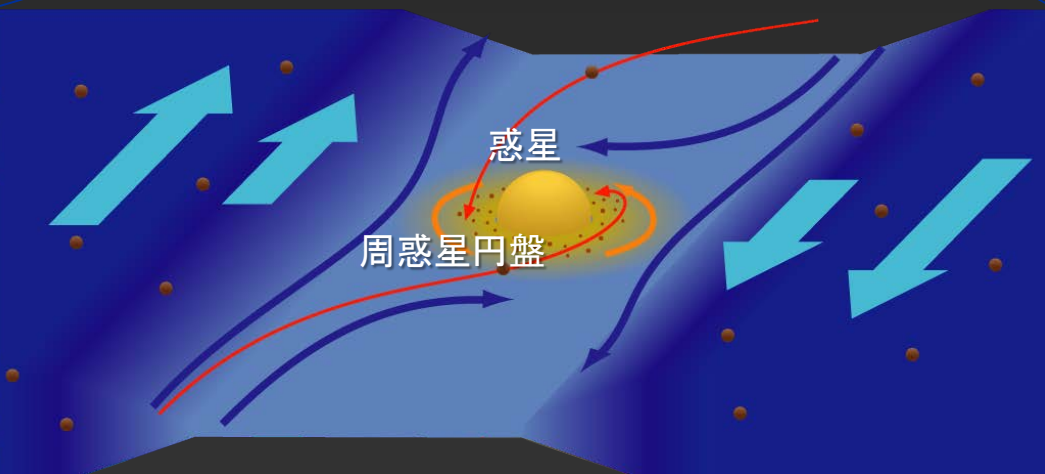
Courtesy of Y. Ueda

原始惑星系円盤中における 周惑星円盤



原始惑星系円盤中における
ガス惑星形成

- ガス降着
- 周惑星円盤
- 規則衛星

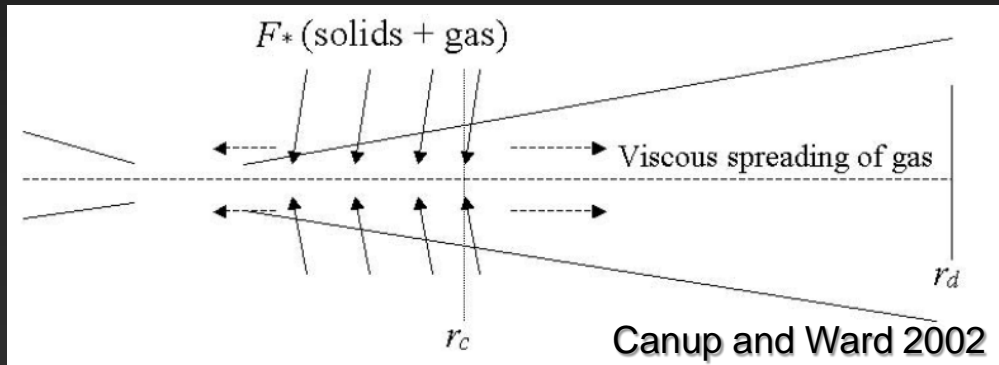


Jupiter and Galilean satellites

2つの規則衛星形成モデル

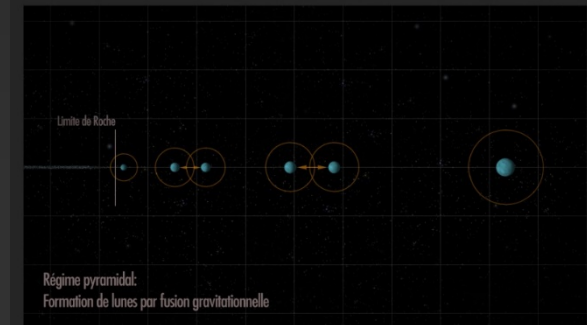
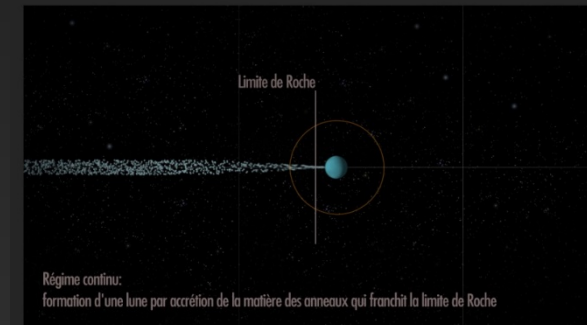
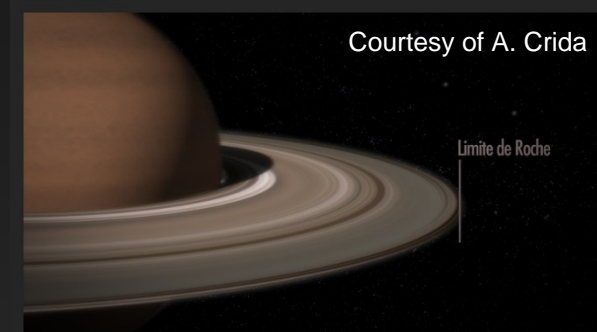
- Gas-starved disk model

- Canup and Ward 2002, 2006



- Spreading particle-disk model

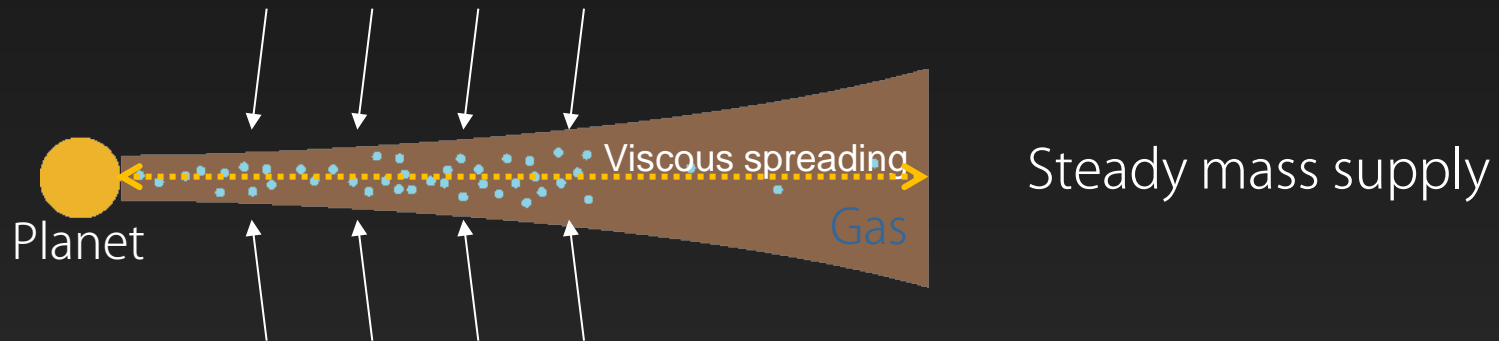
- Crida and Charnoz 2012



Naissances de lunes dans les anneaux | Régime de formation

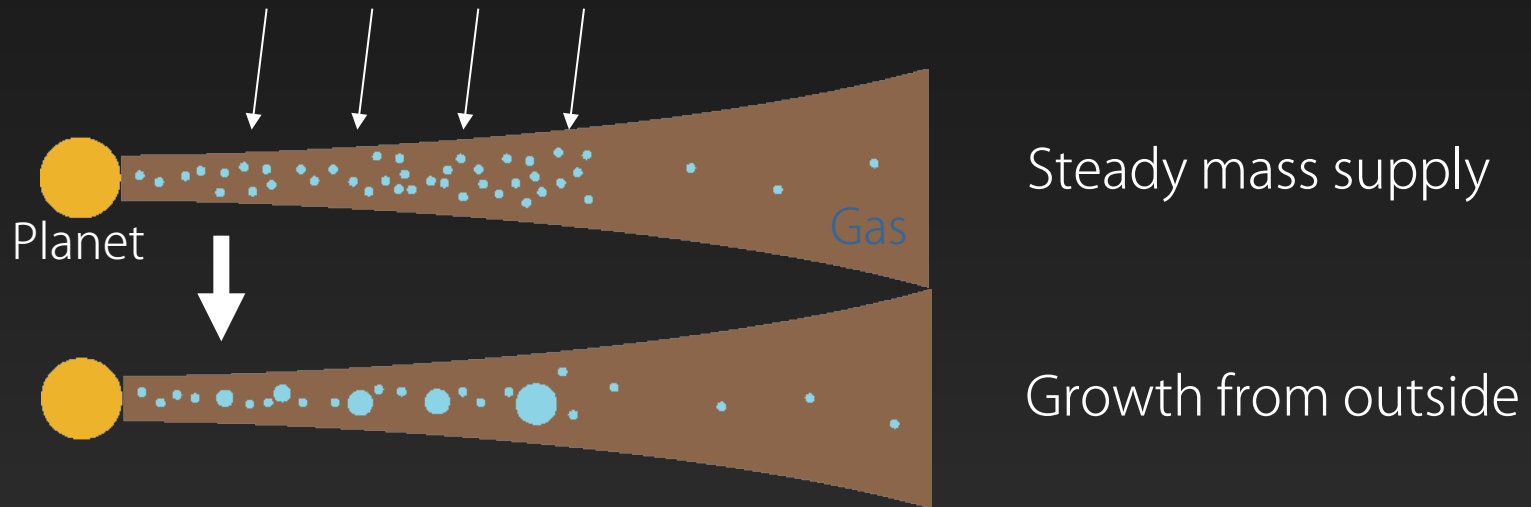
Gas-starved disk model

Canup and Ward 2002, 2006



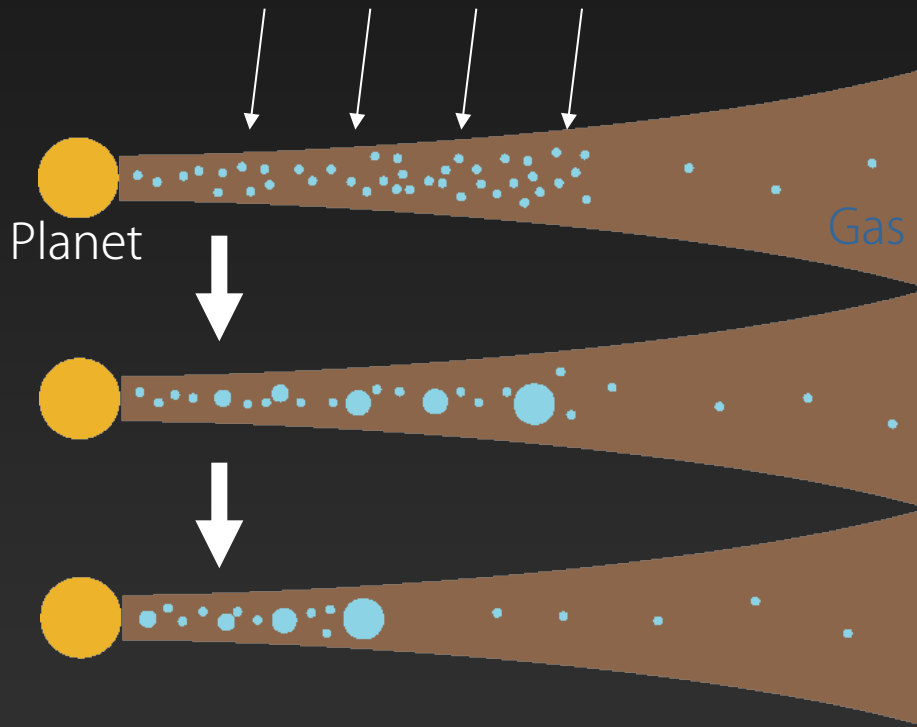
Gas-starved disk model

Canup and Ward 2002, 2006



Gas-starved disk model

Canup and Ward 2002, 2006



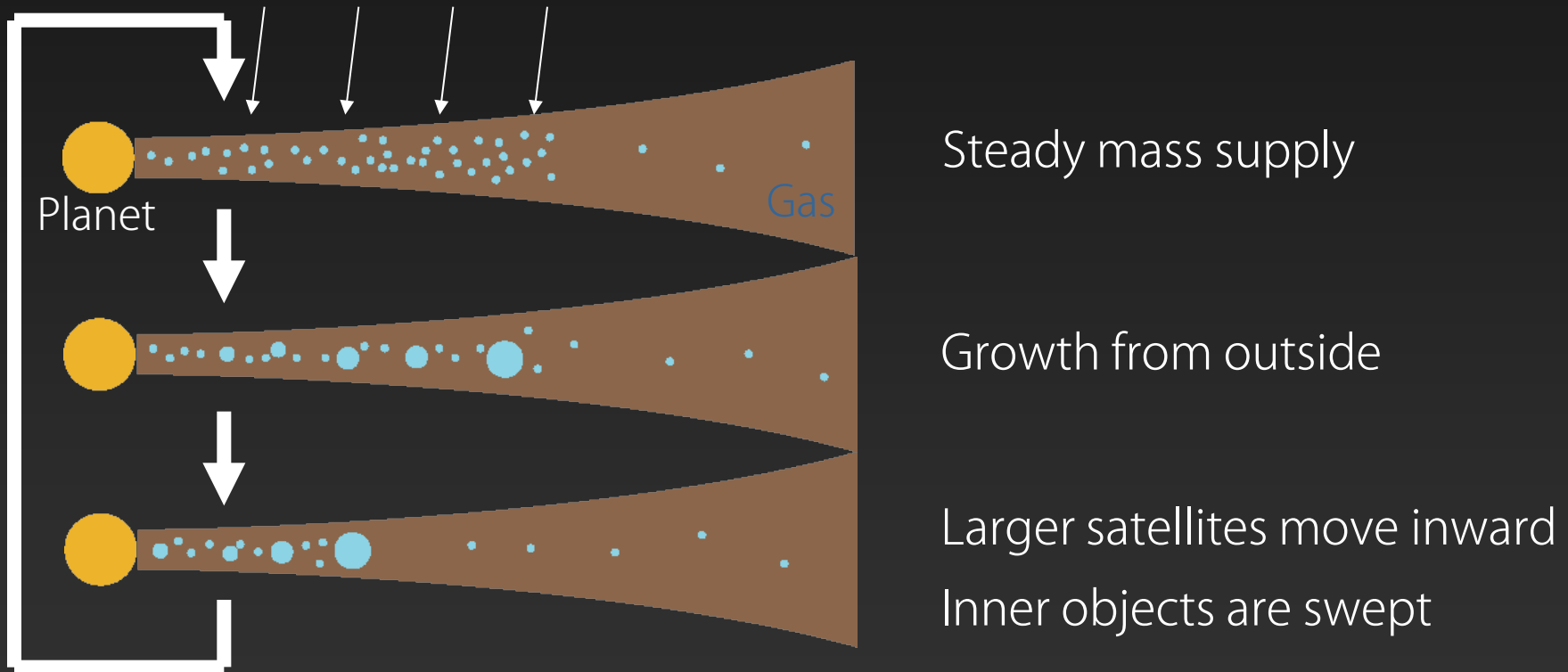
Steady mass supply

Growth from outside

Larger satellites move inward
Inner objects are swept

Gas-starved disk model

Canup and Ward 2002, 2006

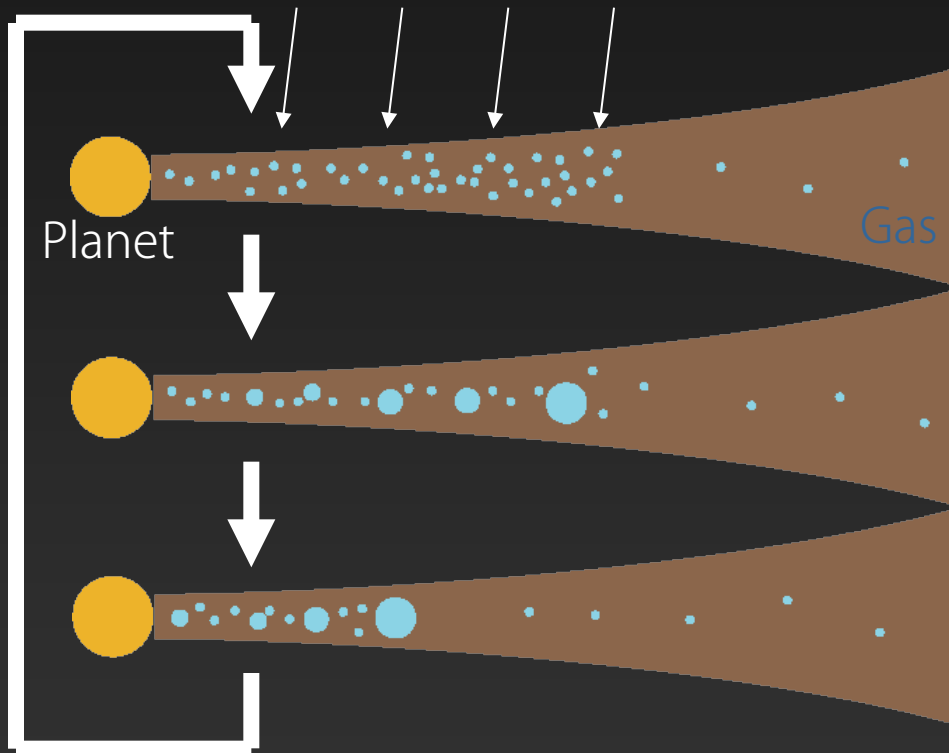


Continue until the mass supply terminates.

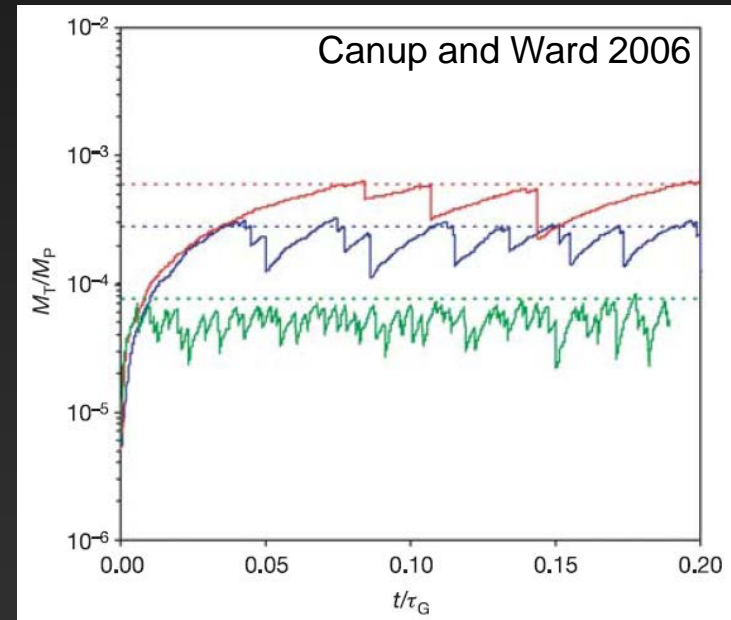
Current satellites are the last generation of this cycle

Gas-starved disk model

Canup and Ward 2002, 2006



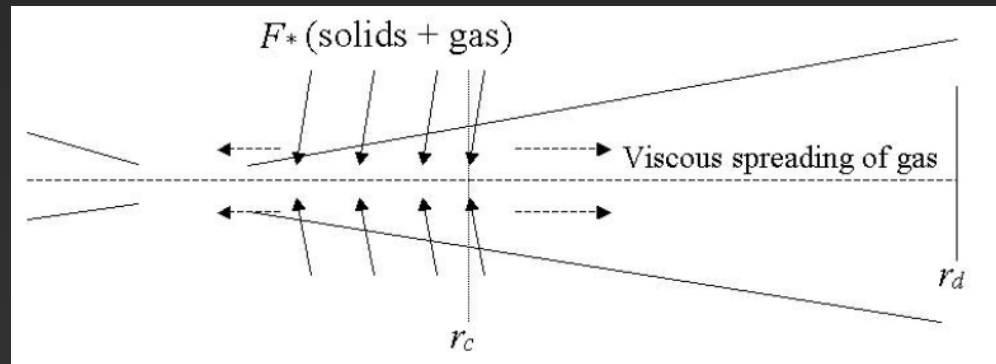
Total mass of satellites / planet mass



Size (mass) is determined
by the balance between growth and fall

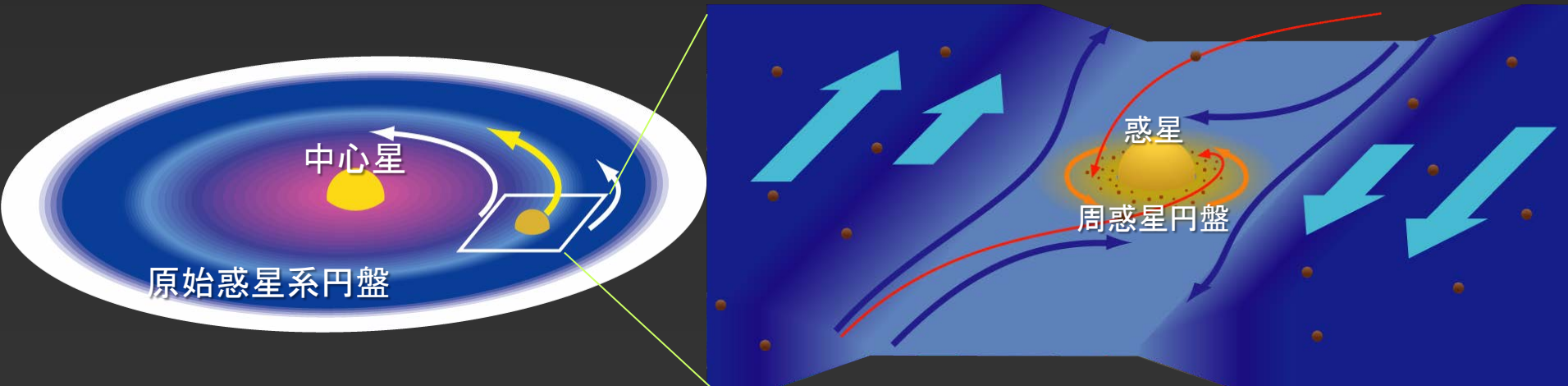
Gas-starved モデルの問題点

- 周惑星円盤の構造を仮定
 - 円盤のガス密度分布
 - ガス・粒子の円盤への降着率分布



本研究の目的

- 衛星系の形成過程を理解する：
 - － 周惑星ガス円盤の形成過程を、高解像度数値流体シミュレーションにより調べる (Tanigawa, Ohtsuki & Machida 2012)
 - － 衛星の材料物質としての粒子が周惑星円盤に捕獲される様子を、ガス抵抗を考慮した数値軌道シミュレーションにより調べる (Tanigawa, Maruta & Machida 2014)



数値流体計算:

周惑星円盤の形成過程・構造

数値計算手法

◎ 局所近似計算

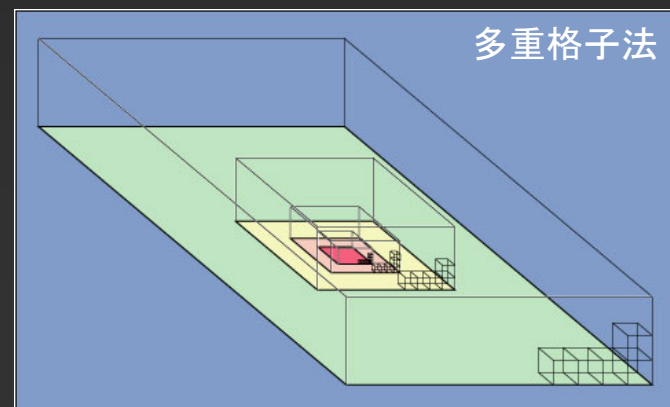
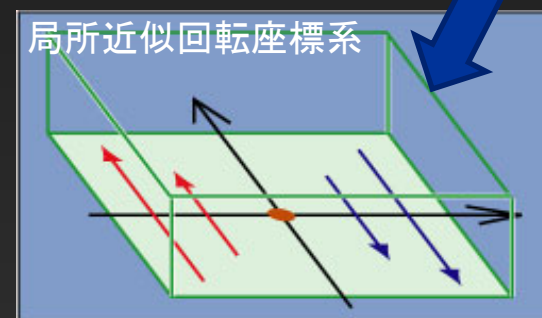
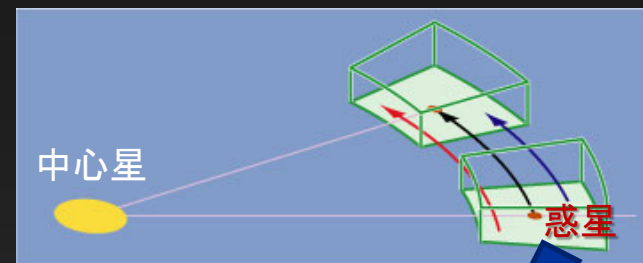
◎ 3次元多重格子法

- 数値計算領域 $24h \times 24h \times 6h$
 - (h は原始惑星系円盤の典型的厚み)
- 格子数 : $(64 \times 64 \times 16) \times 11$ levels
 - 実効的格子数 : $65536 \times 65536 \times 16384$
 - 最小格子間隔 : $0.00037h$
 - 現在の木星半径の約 $1/4$ (at 5AU)

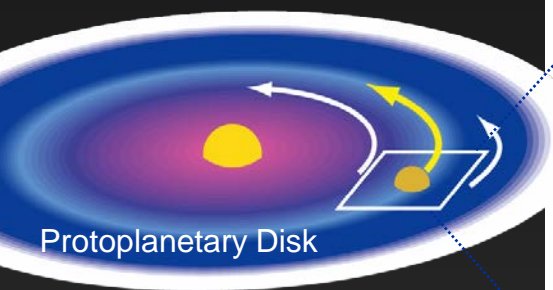
◎ 等温非粘性流体

◎ 惑星近傍の取り扱い:

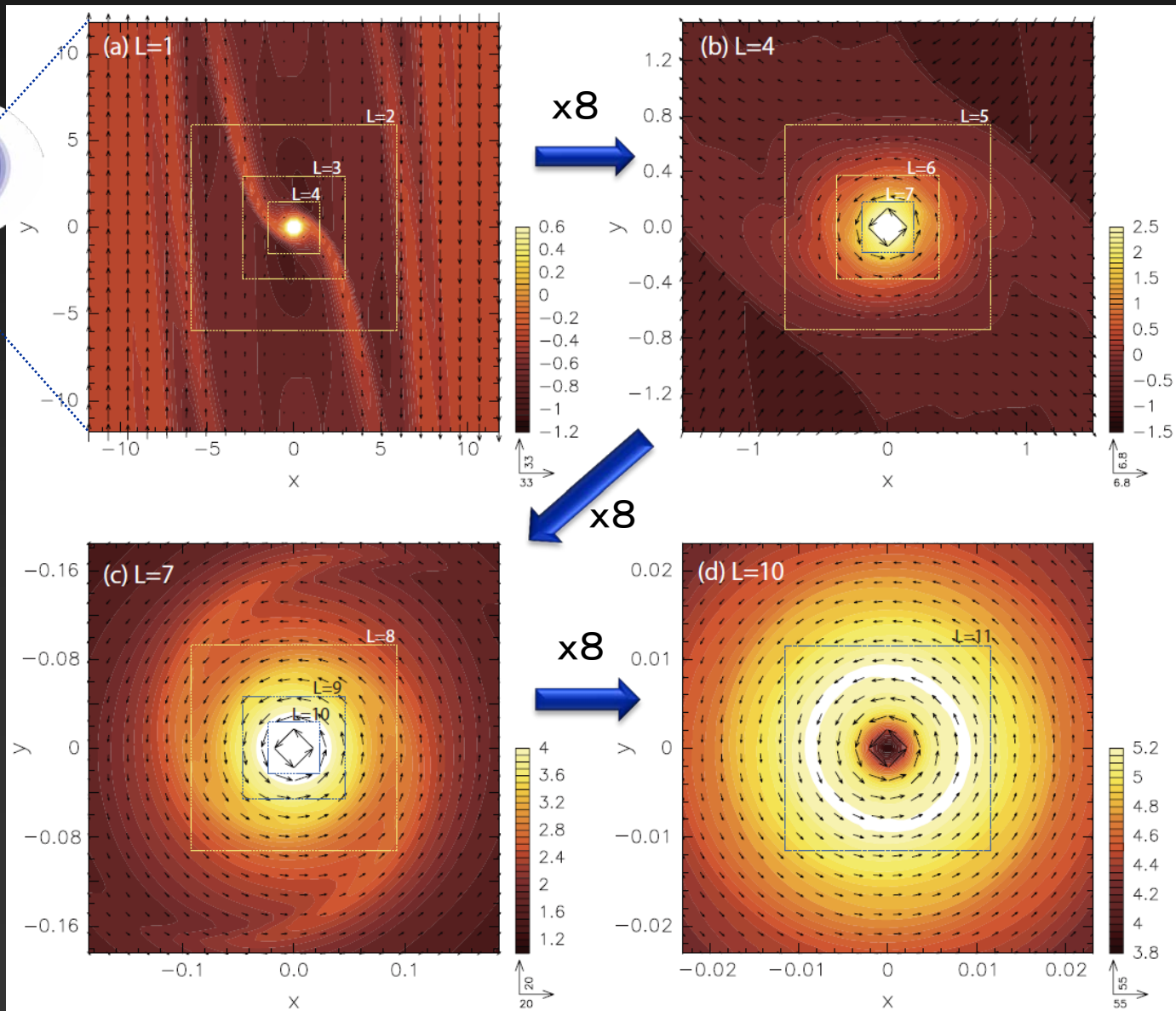
- 重力弱半径 : $0.0007h$
- 惑星へ降着したガスは系から除去



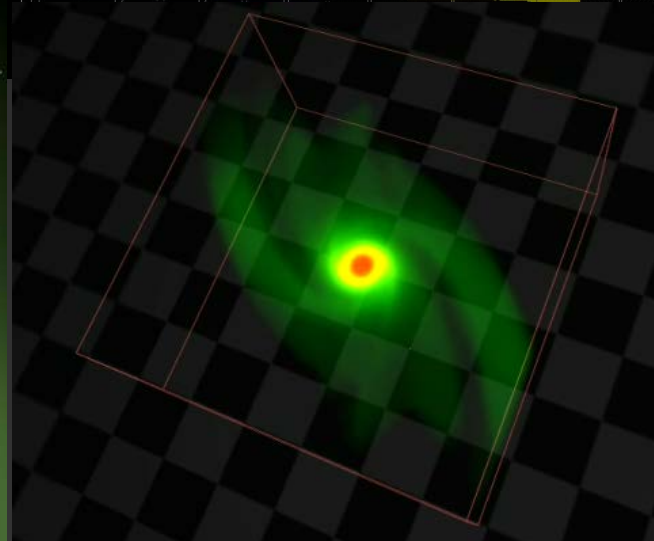
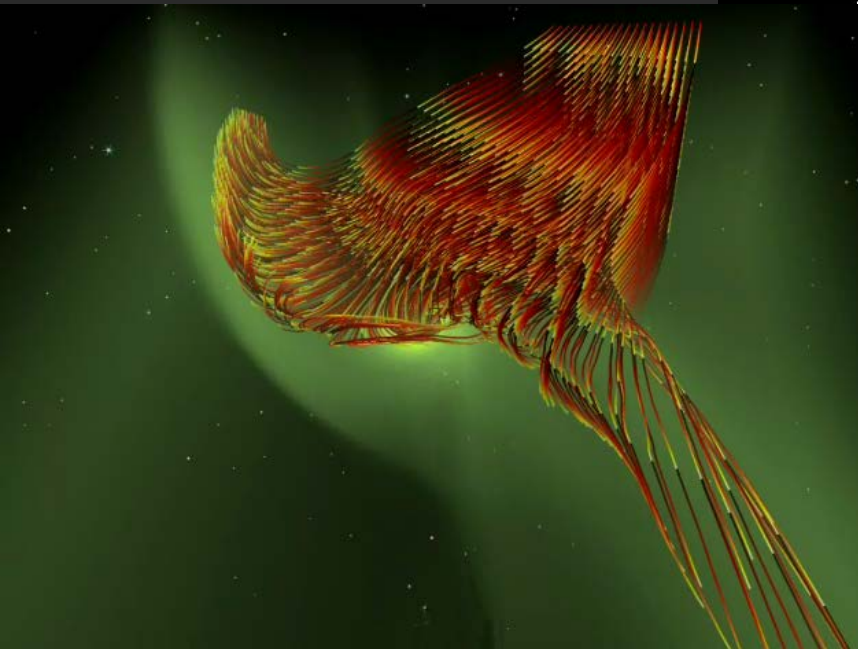
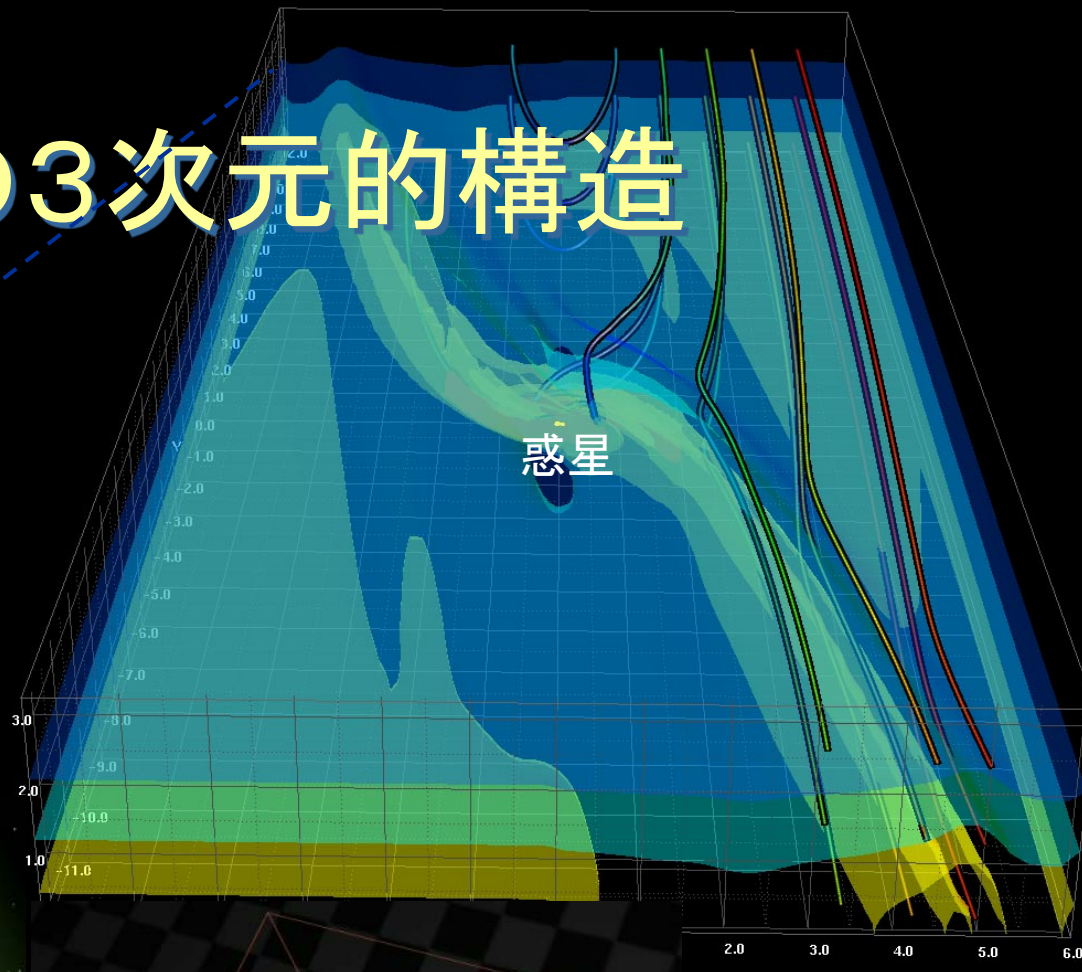
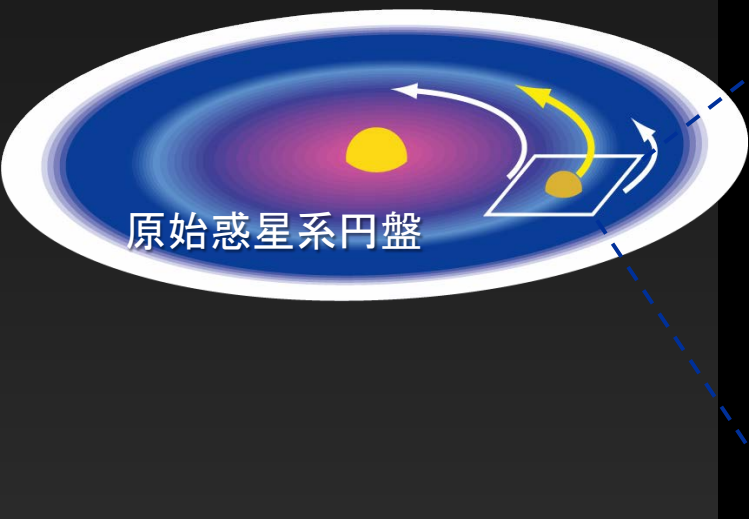
中心面における流れ

惑星重力圏の
十分外から
十分内側まで解像

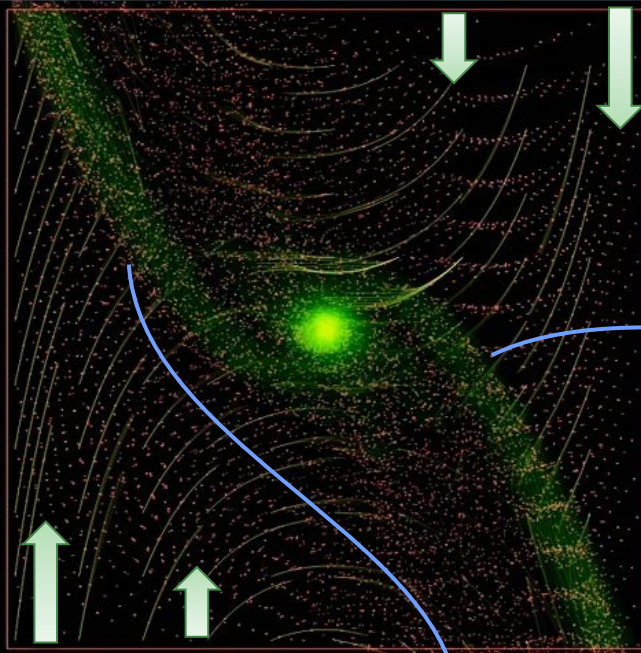
原始惑星系円盤の中で 周惑星円盤が形成する 様子を初めて解像



降着流の3次元の構造



Visualization by T. Takeda
(NAOJ / Vasa Entertainment)

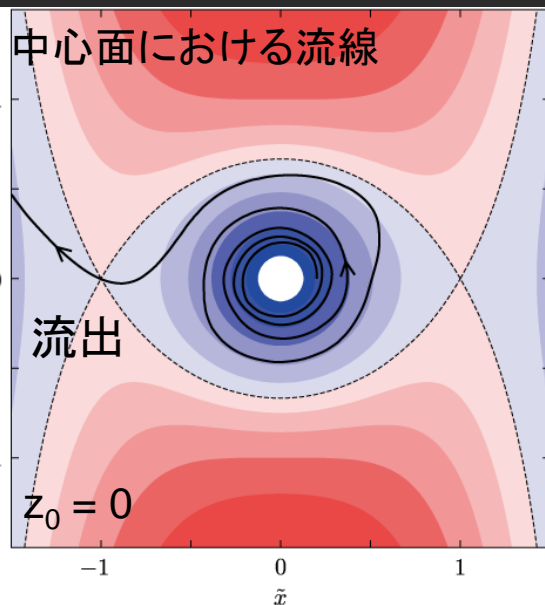


Shock surface

Shock surface

laminar flow

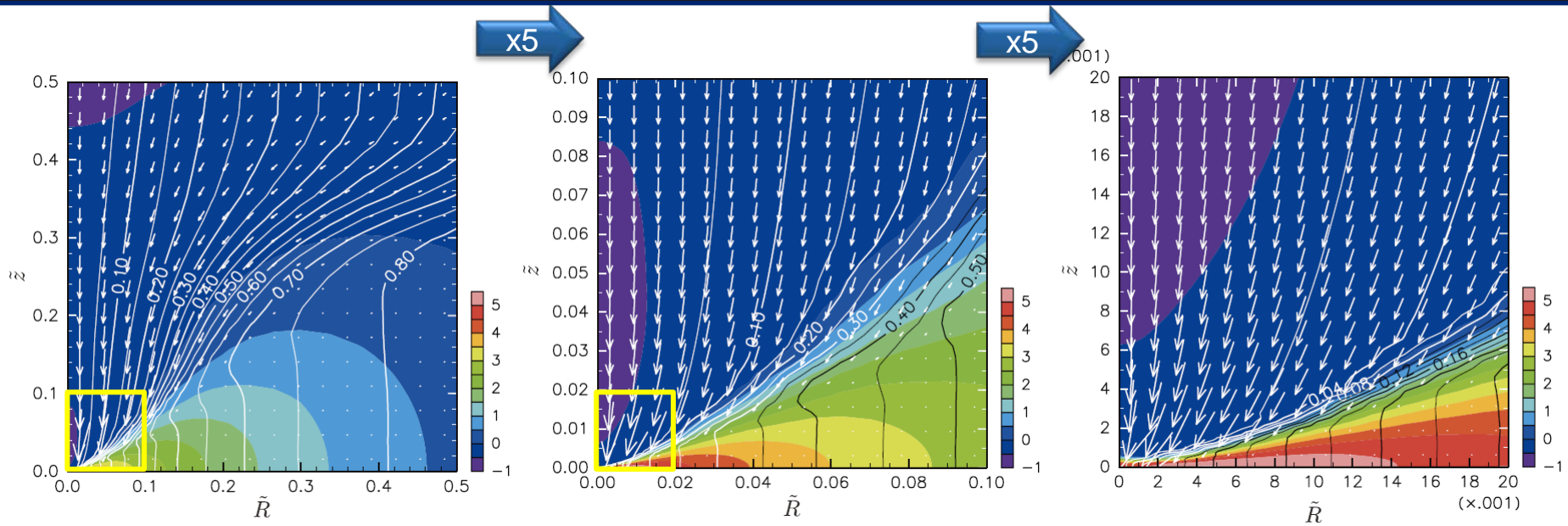
High altitude:
→ Fall and accretion



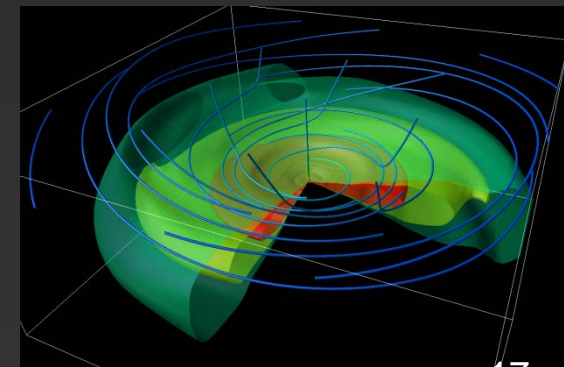
Circumplanetary disk

Midplane:
→ No accretion!

円盤鉛直断面図(回転角平均)



- 内部は明確な円盤構造
 - 静水圧平衡、ケプラー回転
- 上空から高速(ほぼ自由落下)な降着流
 - 円盤表面で衝撃波



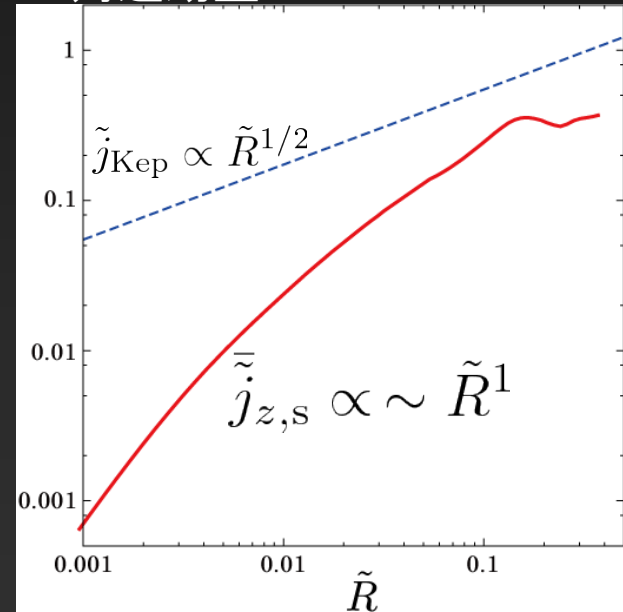
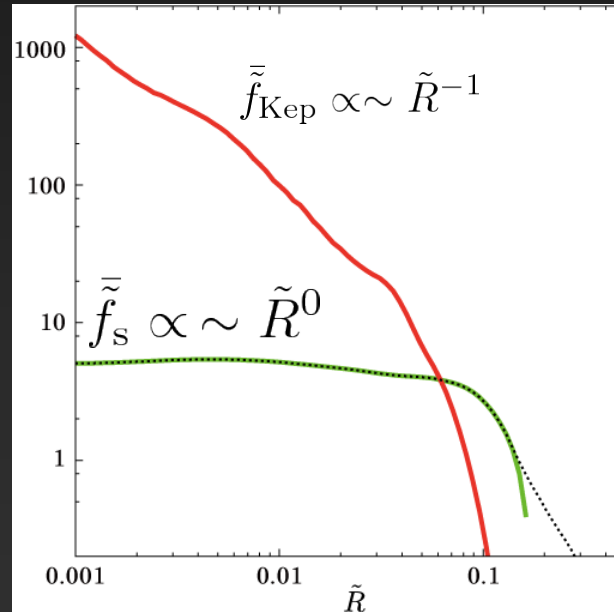
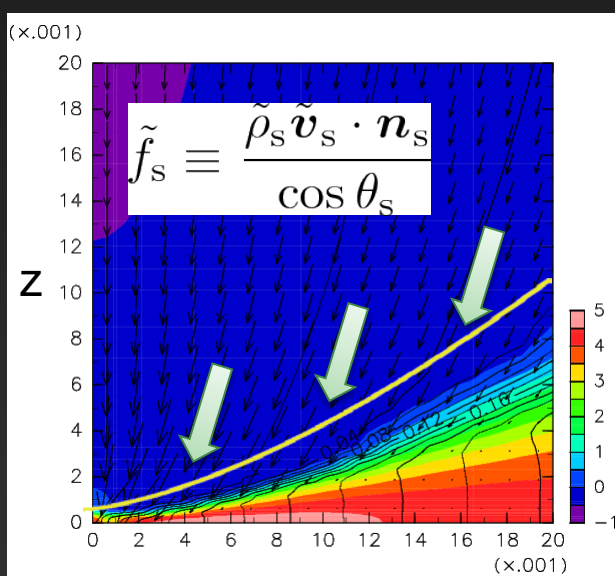
質量と角運動量の降着フラックス分布

Tanigawa, Ohtsuki & Machida 2012

降着流中の単位質量当たりの
角運動量

円盤表面への質量フラックス

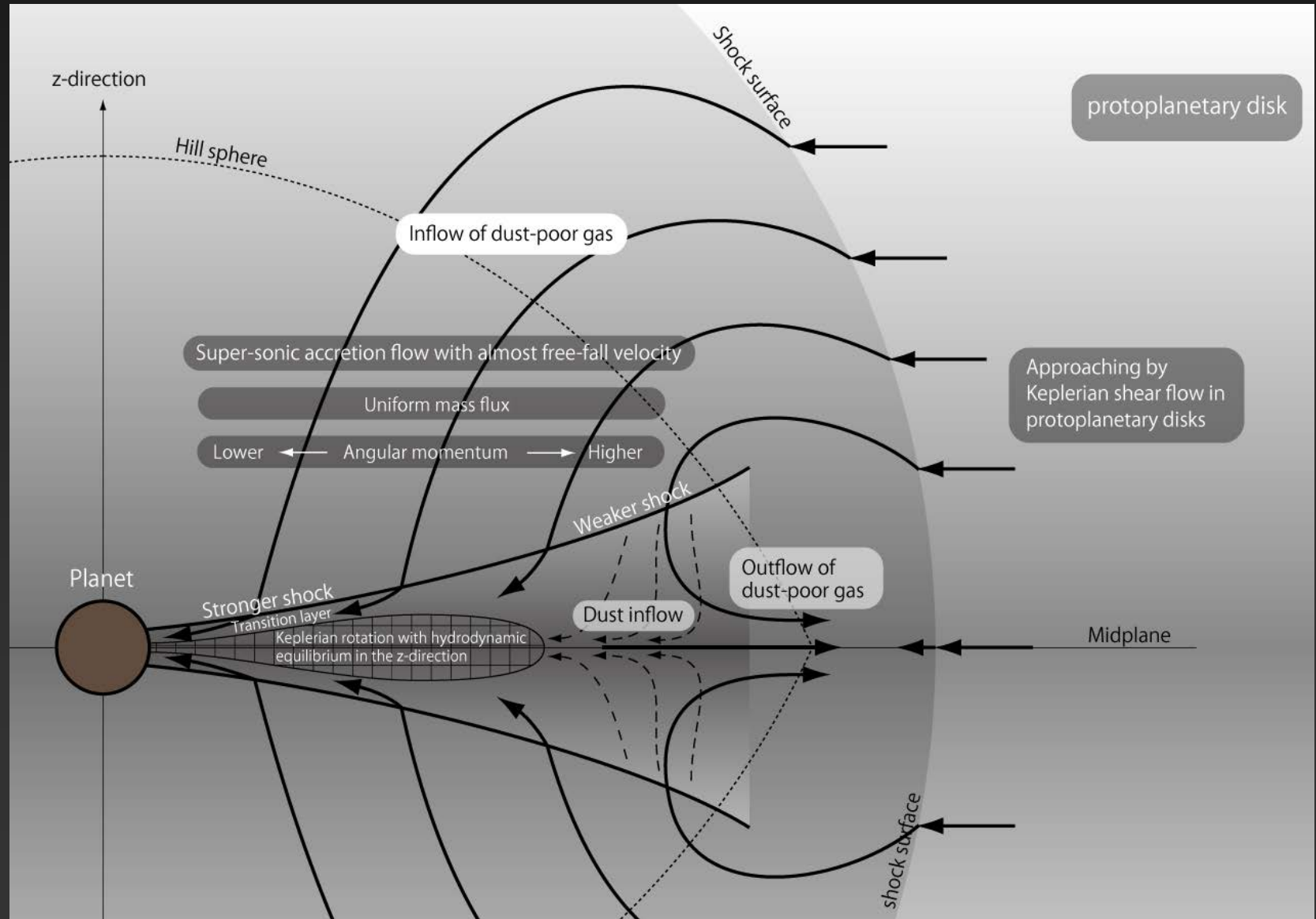
Azimuthally-averaged density and velocity



実効的な質量降着フラックス分布は、**内側に集中**

(cf. Canup and Ward ではフラット)

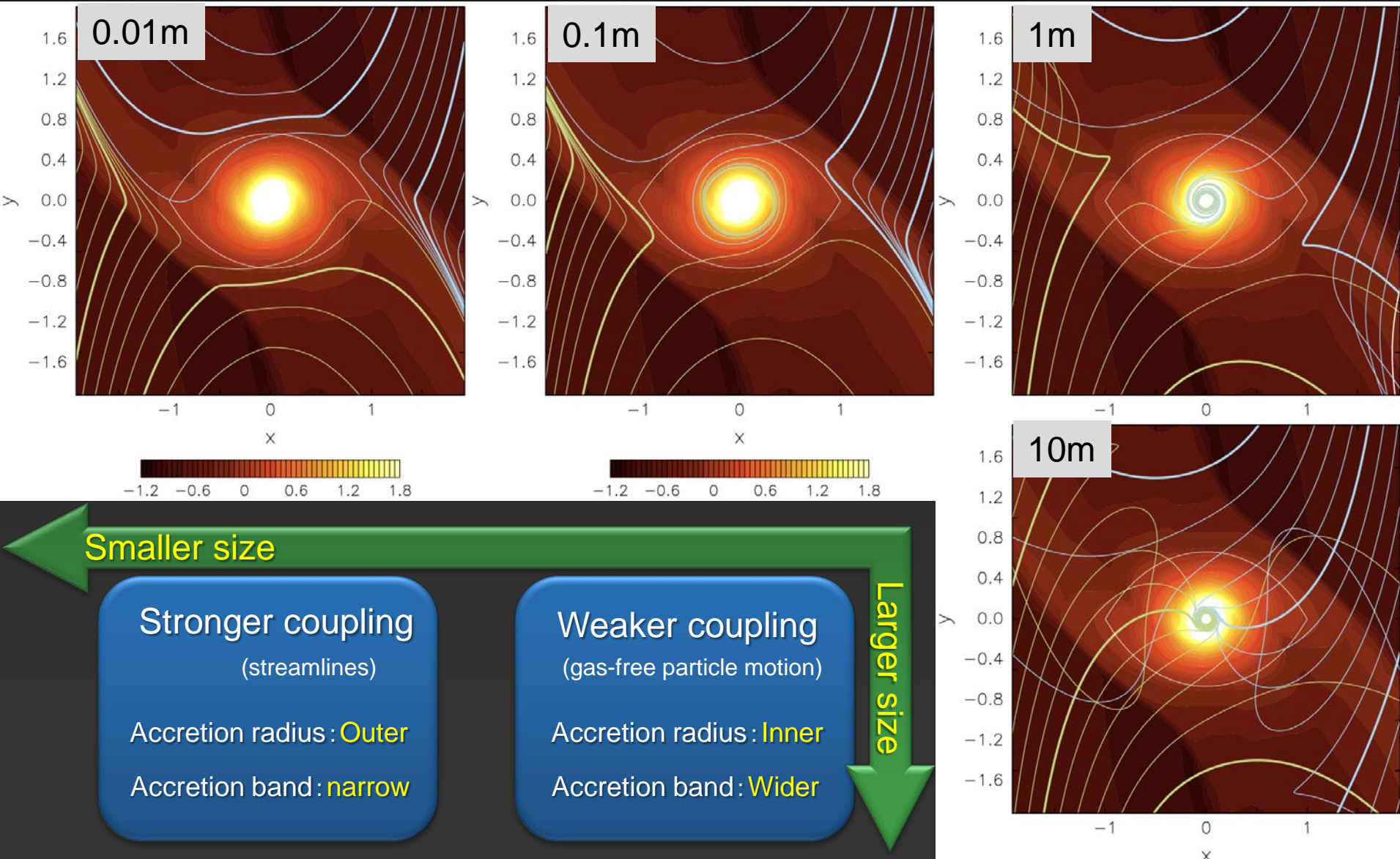
周惑星円盤への降着流の描像



数値軌道計算:

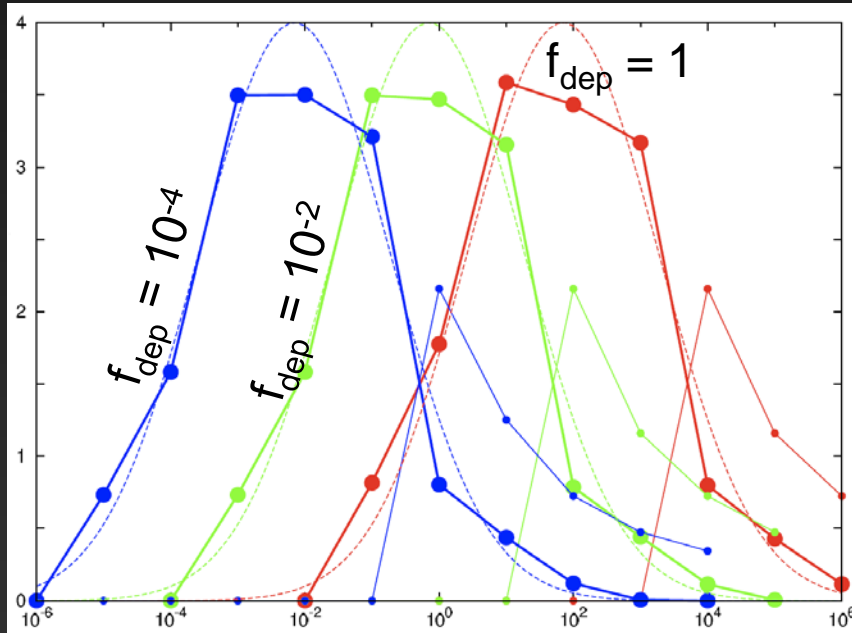
周惑星円盤とのガス抵抗による
固体粒子の捕獲

粒子の軌道の例 (ガス抵抗が強い場合)



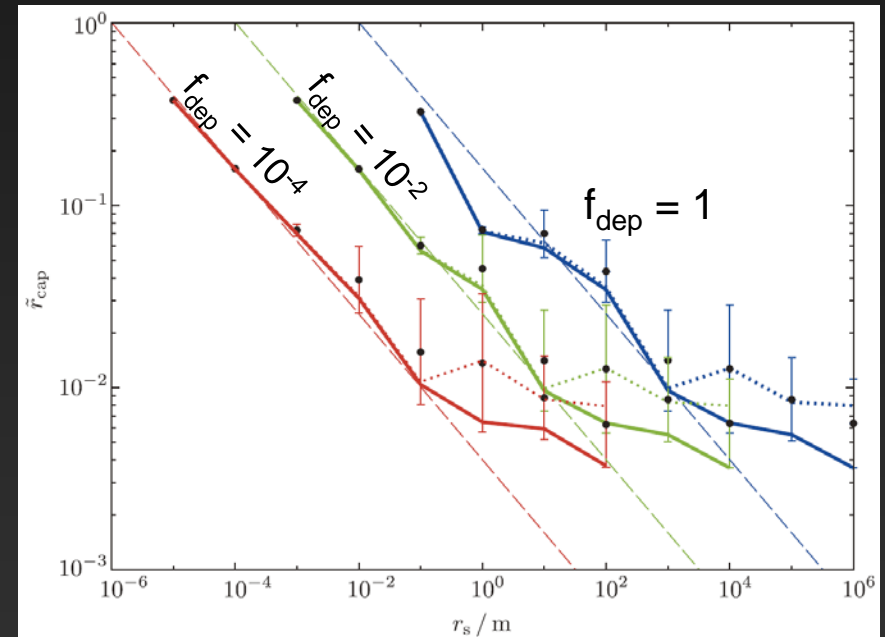
周惑星円盤によって捕獲される率 と捕獲される位置

捕獲率



Size of incoming particle [m]

捕獲される位置



Size of incoming particle [m]

Fitting formula

$$P_{\text{cap,disk}}(r_s, f_{\text{dep,g}}) = P_{\text{max}} \exp \left[- \left(\frac{\log(r_s / r_{s,\text{peak}})}{\log r_{s,\text{HFHM}}} \right)^2 \right],$$

where $r_{s,\text{peak}} = 50 f_{\text{dep,g}} [\text{m}]$

$$\tilde{r}_{\text{cap}} = 0.16 \left(\frac{r_s}{1\text{m}} \right)^{-0.4} \left(\frac{f_{\text{dep,g}}}{1} \right)^{0.4}$$

まとめ

- 目的: 衛星系の形成過程の理解
- 結果
 - 周惑星ガス円盤の形成過程
 - 数値流体シミュレーション
 - 惑星重力圏内に明確な静水圧平衡の円盤構造
 - 上空から超音速で降着、円盤上面で衝撃波
 - 周惑星円盤へのガスの降着率分布
 - 周惑星円盤による粒子の捕獲
 - 数値軌道シミュレーション
 - 捕獲されやすいサイズ($\sim m$)・位置が存在