

原始衛星系円盤の形成

-- 原始惑星系円盤からのガス降着流の解析 --

谷川 享行

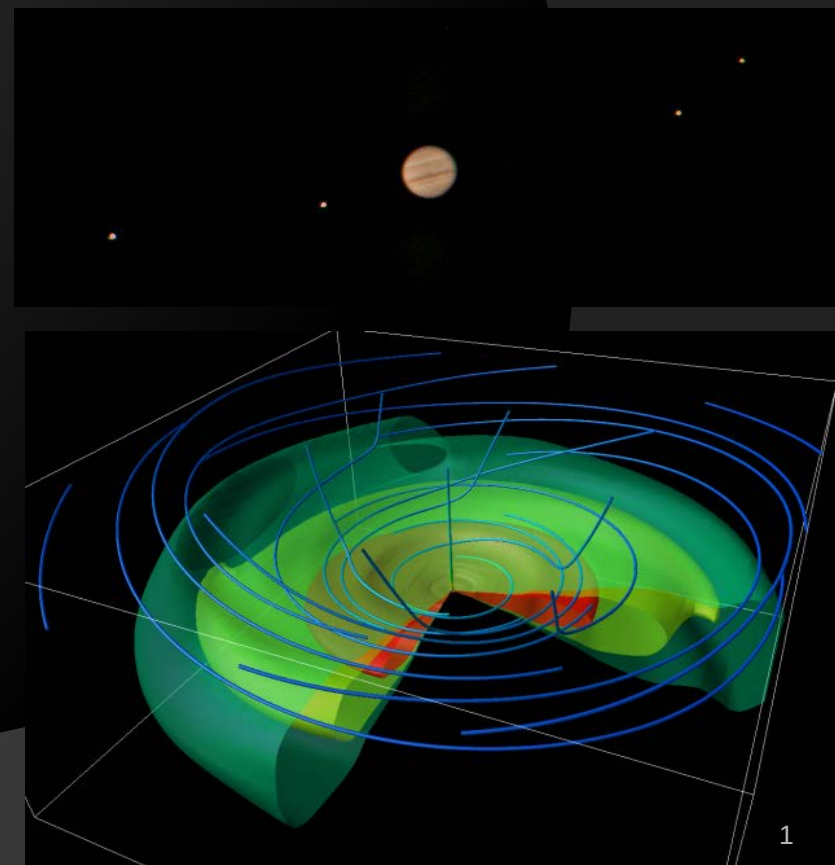
CPS / 北大低温研

大槻 圭史 (CPS / 神戸大理)

町田 正博 (九大理)

Tanigawa, Ohtsuki, Machida 2012, ApJ, 747, 47

谷川、大槻、町田、2011, 遊星人, 20, 262



衛星系形成進化のシナリオ

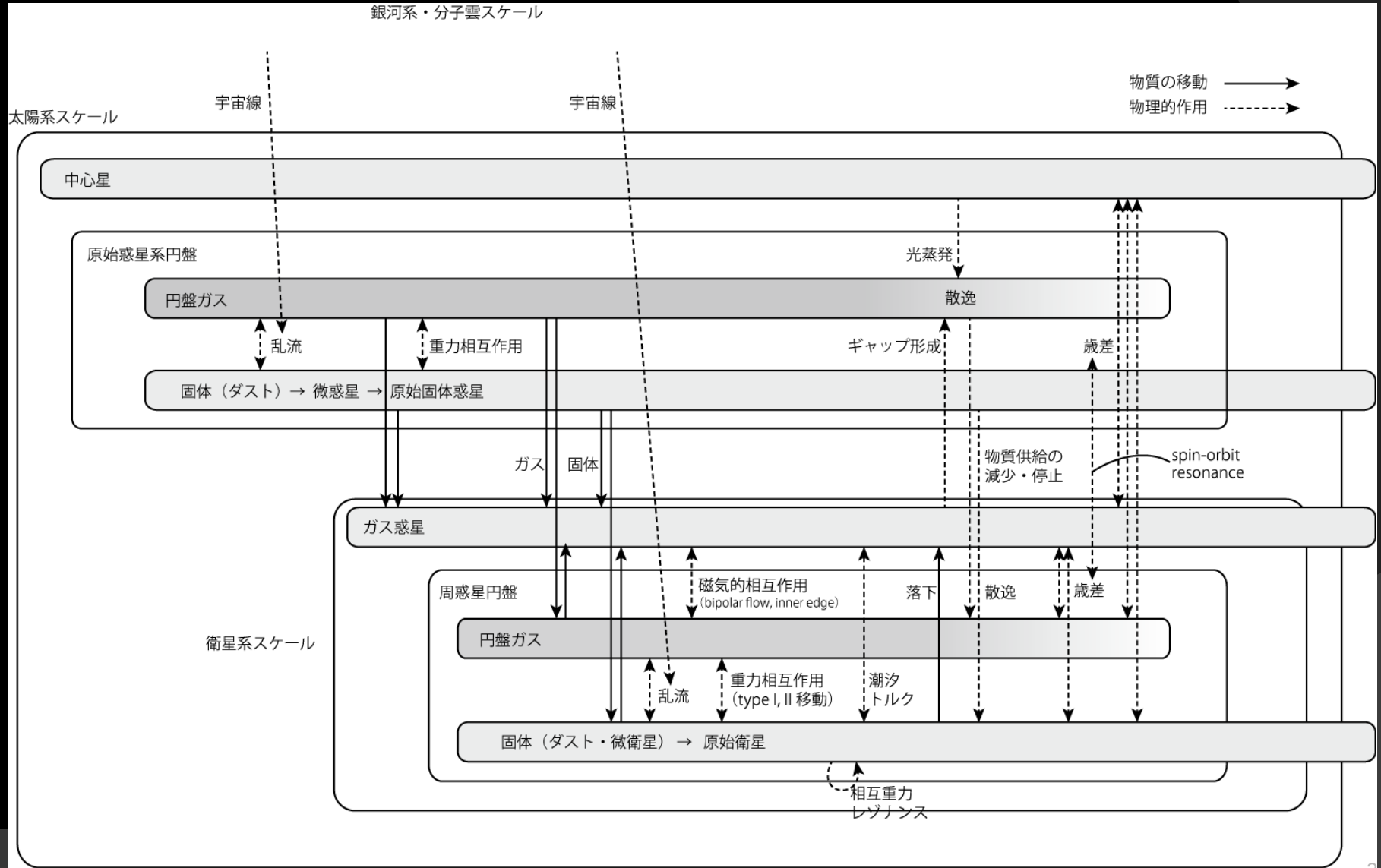
◎ 衛星系形成過程

- ガス惑星形成
- 周惑星円盤形成
 - ガスの供給
 - 衝撃波、磁場、粘性
 - 固体の供給
 - ガス抵抗、アブレーション
- 衛星集積
 - 衝突、合体、破壊
- 軌道進化
 - Type I 移動（ガス円盤との重力相互作用）
 - 母惑星との潮汐トルク
 - 衛星同士の重力相互作用・共鳴
- 内部構造進化
 - 集積エネルギー
 - 放射壊変熱

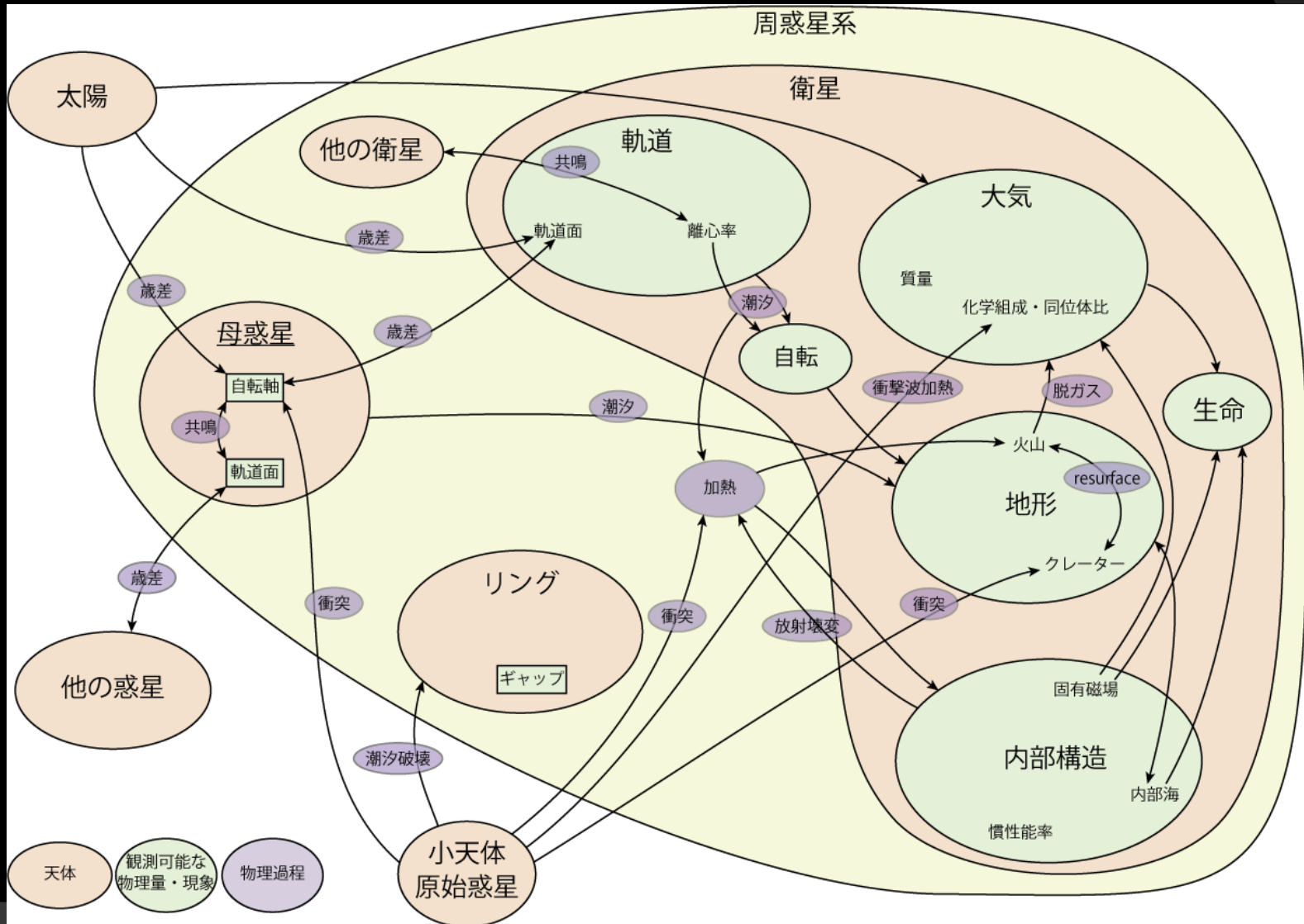
◎ 形成後の進化

- 潮汐
 - 内部加熱
 - Enceladus, Io
 - 潮汐破壊
 - リング
- 軌道進化
 - 母惑星との潮汐トルク
 - 衛星同士の重力相互作用・共鳴
 - Io-Europa-Ganymede (4:2:1)
 - Mimas-Tethys (2:1)
 - Enceladus-Dione (2:1)
 - Titan-Hyperion (4:3)
- 大気
 - 質量、組成、散逸
- 磁場
 - 内部構造、熱進化
- 生命

衛星系形成過程



衛星系形成後の進化



研究背景:

ガス惑星形成過程における
衛星系形成

巨大ガス惑星周りの衛星

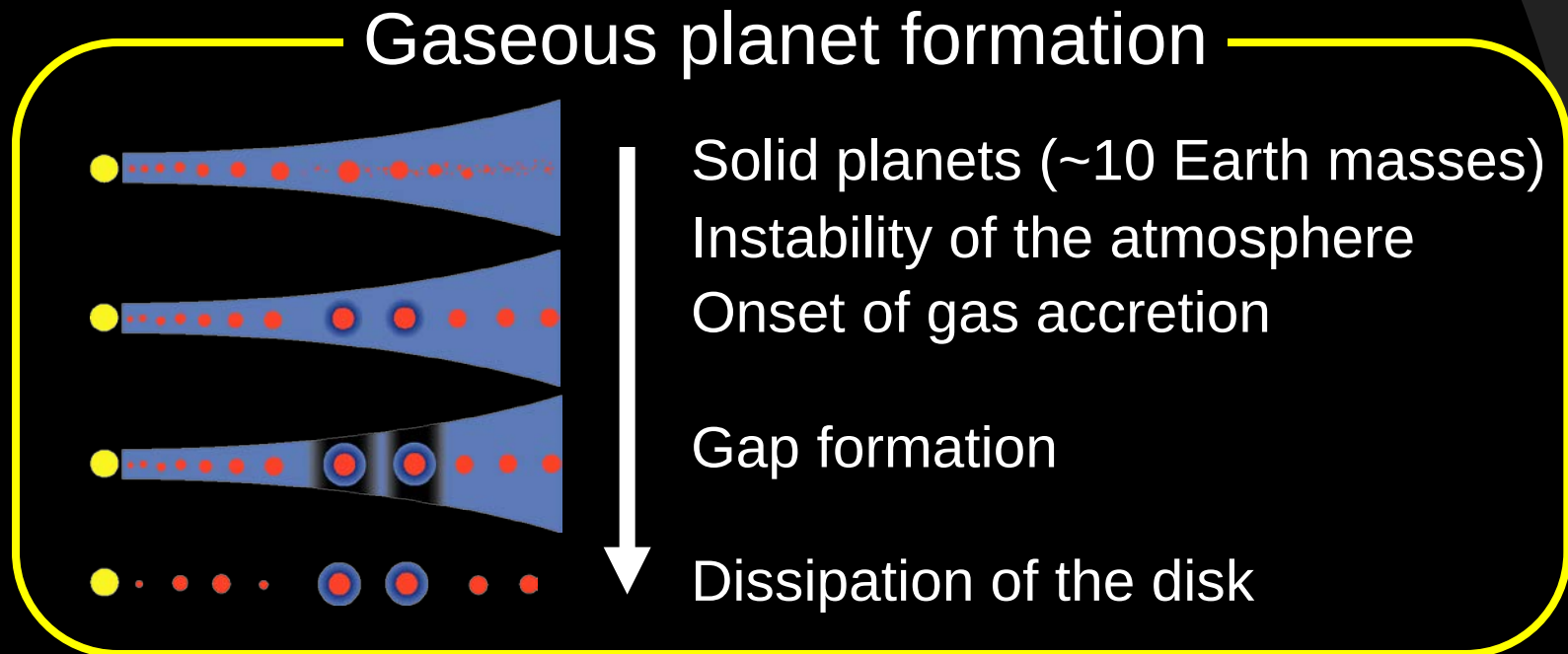
- 衛星系は、巨大ガス惑星周りに普遍的に存在
- 規則衛星 と 不規則衛星
 - 規則衛星:
 - 質量では全衛星の大部分
 - ほぼ円軌道・惑星赤道面
 - → 周惑星円盤からの形成を示唆

Jupiter and Galilean satellites

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Jupiter-moons.jpg>



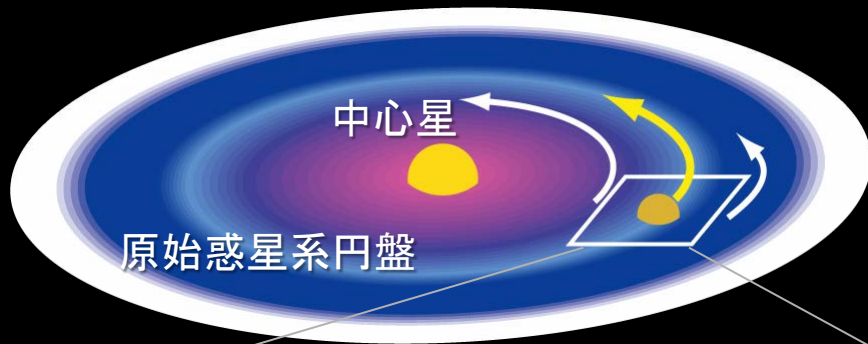
Formation of Gas-giants



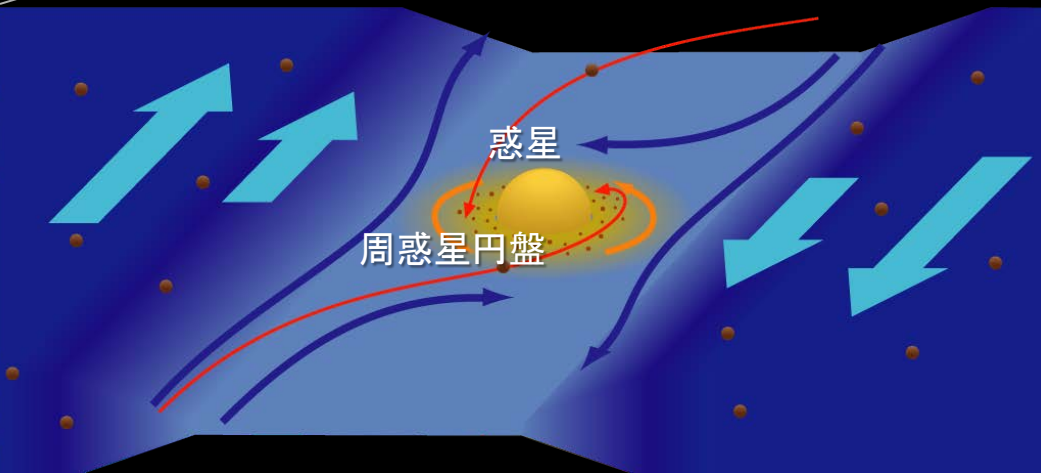
Satellites are thought to be formed at very end of giant planet formation

規則衛星の形成過程

原始惑星系円盤中における
ガス惑星形成

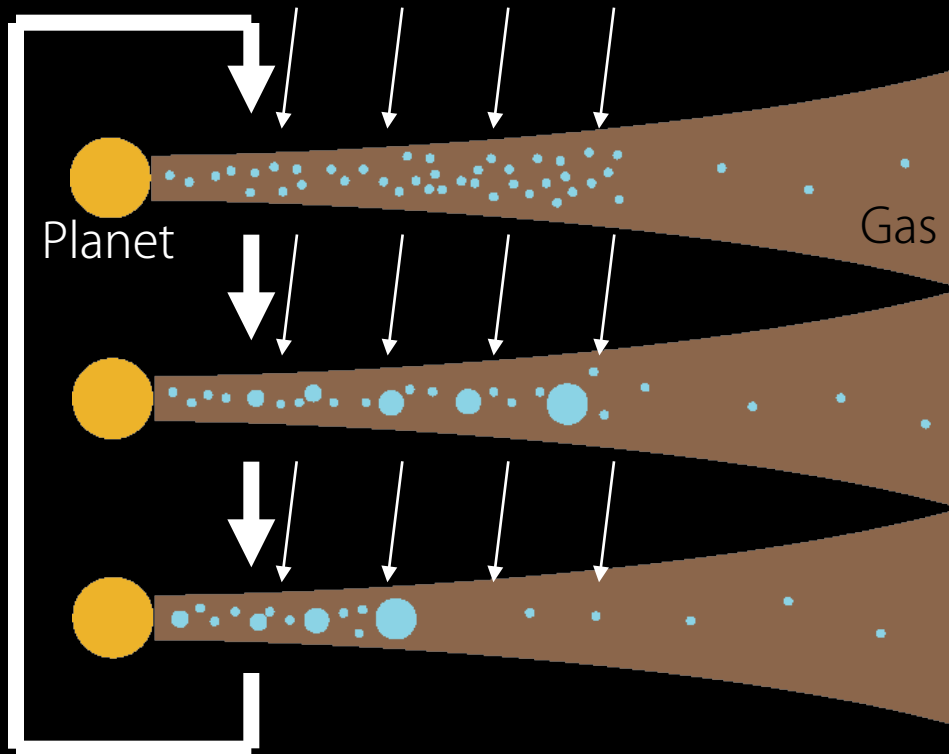


- ガス降着
- 周惑星円盤
- 規則衛星



Jupiter and Galilean satellites

Canup and Ward model



Steady mass supply

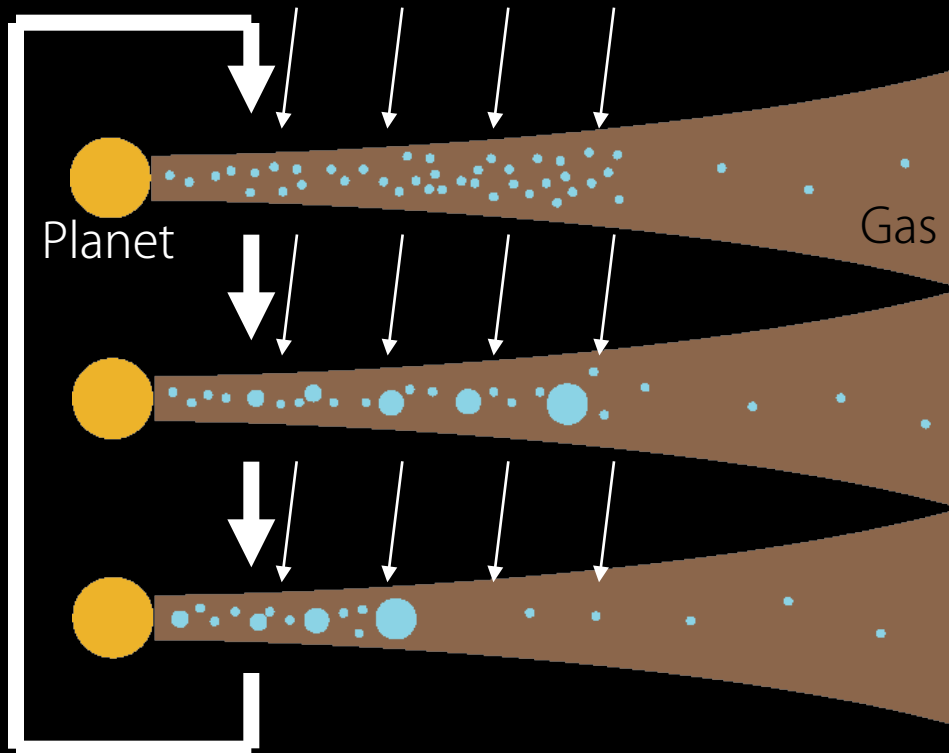
Growth from outside

Larger planets move inward
Inner objects are swept

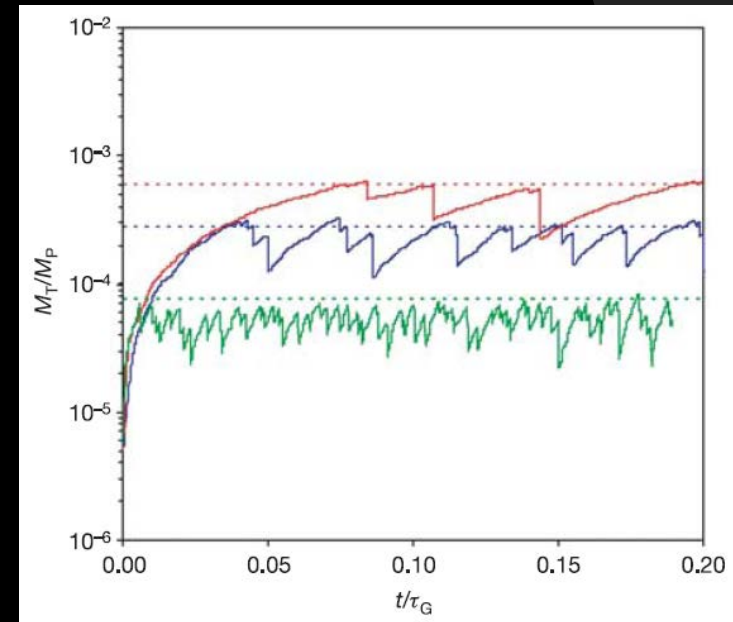
Continue until the mass supply terminates.

Current satellites are the last generation of this cycle

Canup and Ward model



Canup and Ward 2006

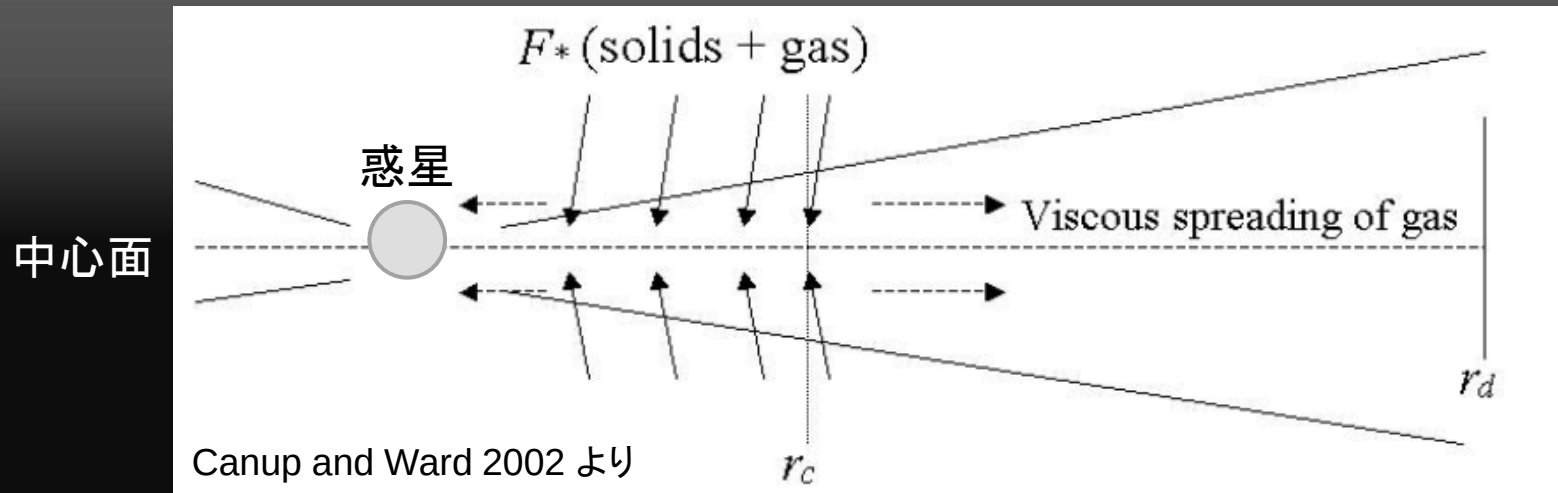


They reproduce total mass of satellite systems, but hard to explain the difference between Jovian and Saturnian systems

過去の衛星形成研究

Canup and Ward 2002, 2006

定常的に質量供給(降着)がある円盤中での衛星形成モデル



周惑星円盤への降着フラックス分布を**一様と仮定**

→ 降着フラックス分布は結果を決めるが、
一様の仮定には**強い根拠はない**

周惑星円盤の構造は？

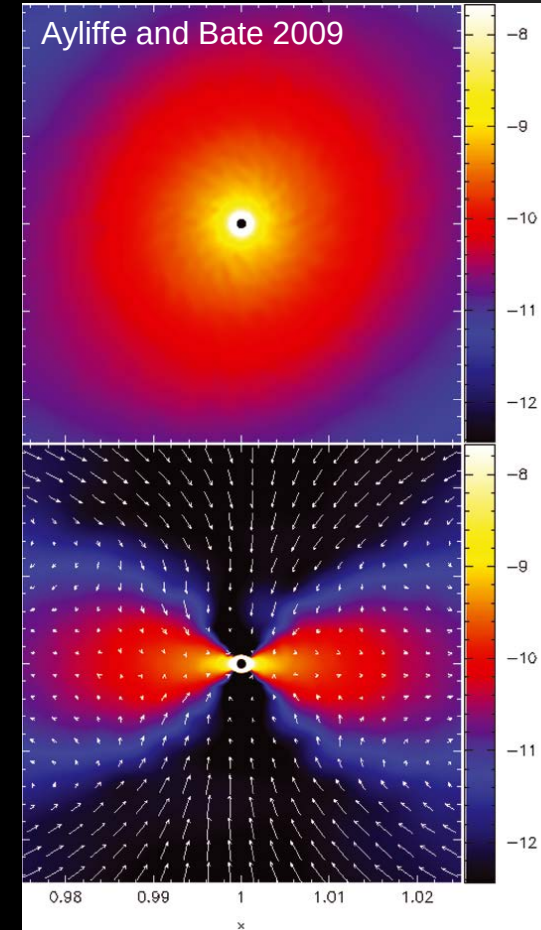
最近の数値計算

- ◎ 衛星形成領域の解像度が不十分
 - 超高解像度が必要 ($R_J \sim 1/10000 a_J$)
- ◎ 解析が不十分

→ 周惑星円盤の形成過程や衛星系形成を理解するのは困難

本研究

- ◎ 衛星形成領域まで十分な 高解像度
- ◎ 降着流の詳細な流れ場の解析
 - ◎ 降着流の基本的な構造
 - ◎ 降着フラックス分布



数値流体計算:

原始惑星系円盤からの降着流

数値計算手法

◎ 3次元多重格子法

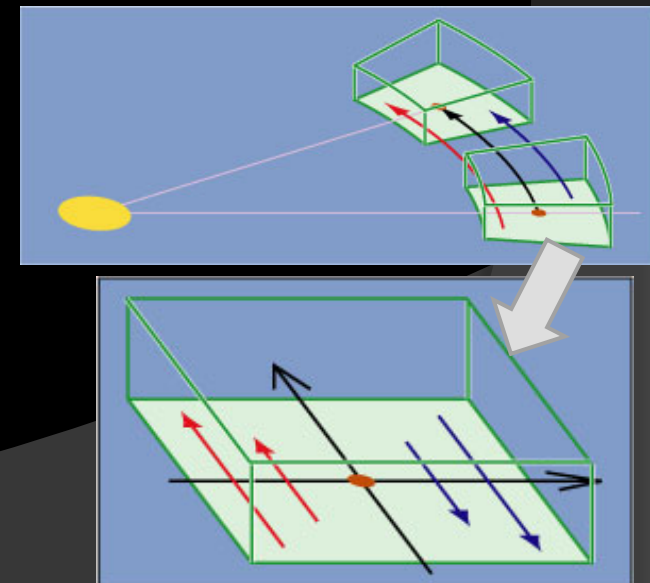
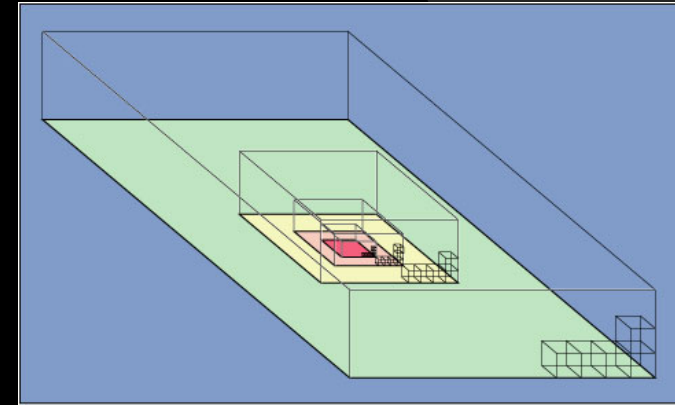
- 数値計算領域 $24h \times 24h \times 6h$
 - (h は原始惑星系円盤の典型的厚み)
- 格子数 : $(64 \times 64 \times 16) \times 11 \text{ levels}$
 - 実効的格子数 : $65536 \times 65536 \times 16384$
 - 最小格子間隔 : $0.00037h$
 - 現在の木星半径の約 $1/4$ (at 5AU)

◎ 局所近似計算

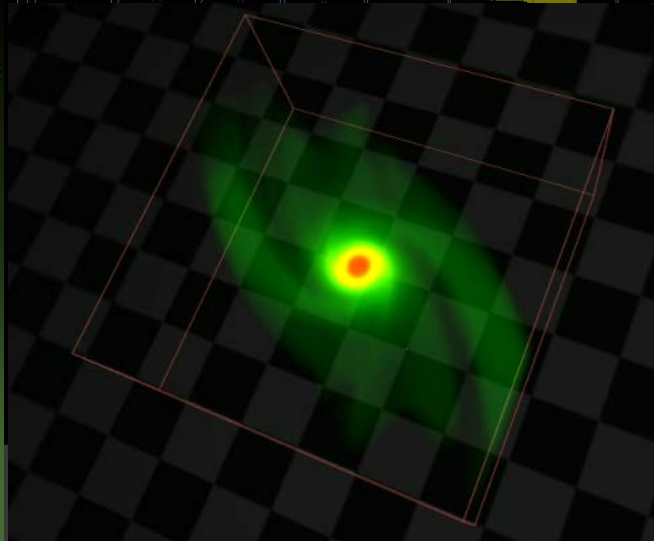
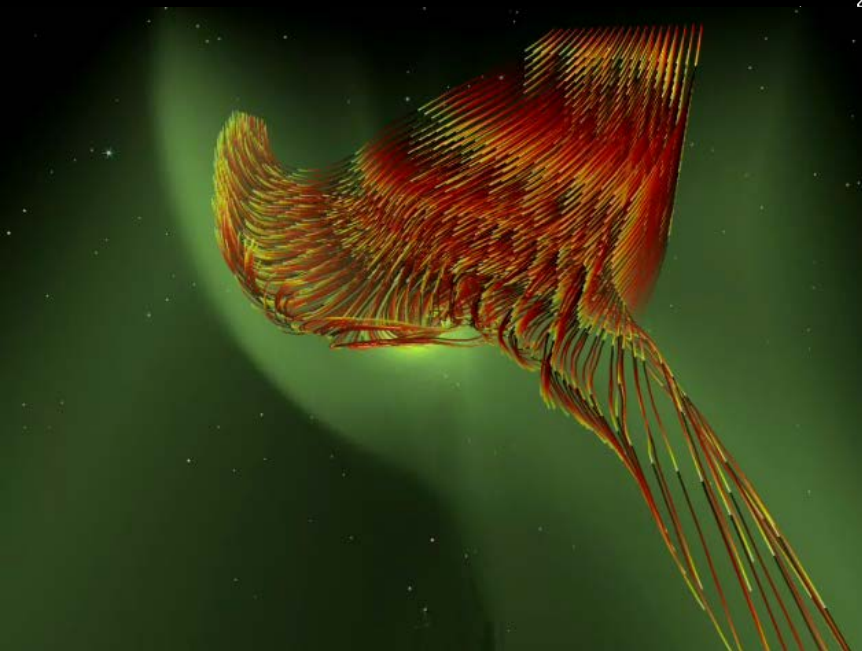
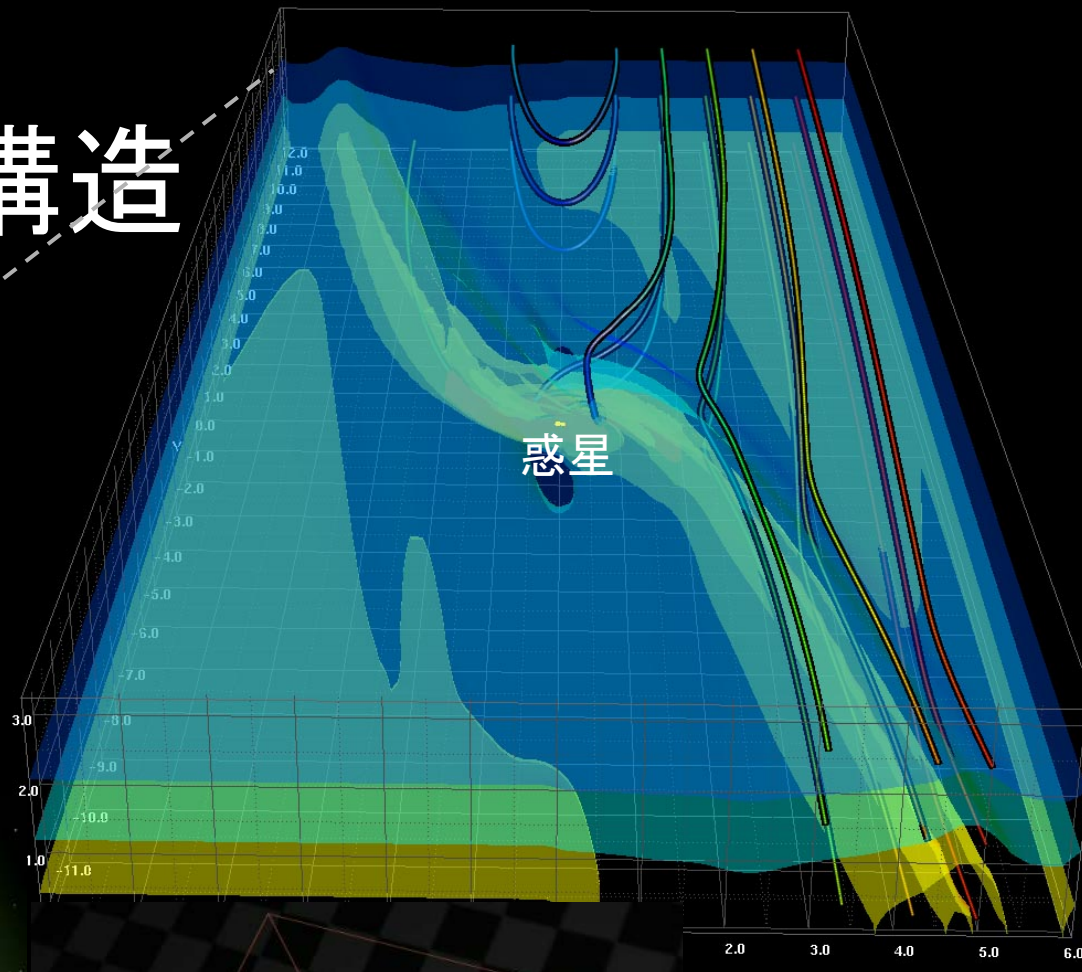
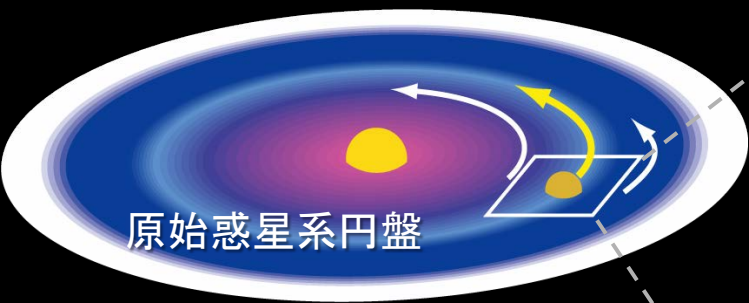
◎ 等温非粘性流体

◎ 惑星近傍の取り扱い :

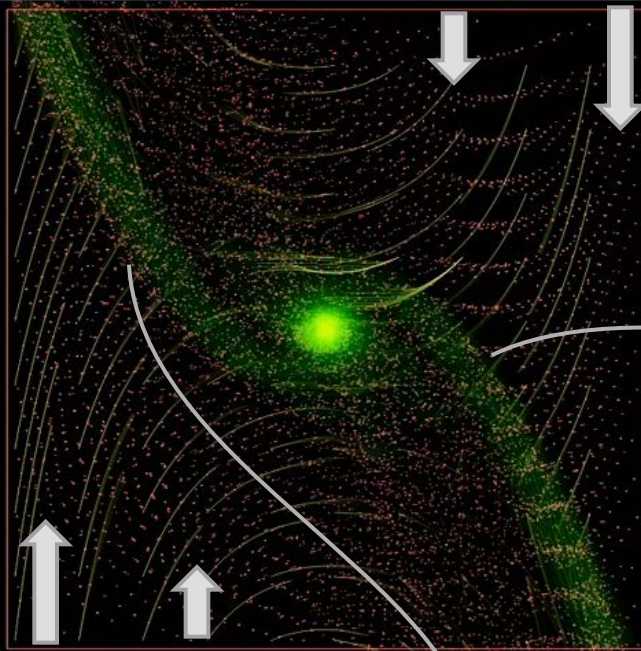
- 重力弱化半径 : $0.0007h$
- 惑星へ降着したガスは系から除去



結果：流れの構造



Visualization by T. Takeda
(4D2U project team, CfCA, NAOJ)
<http://4d2u.nao.ac.jp/>



Shock surface

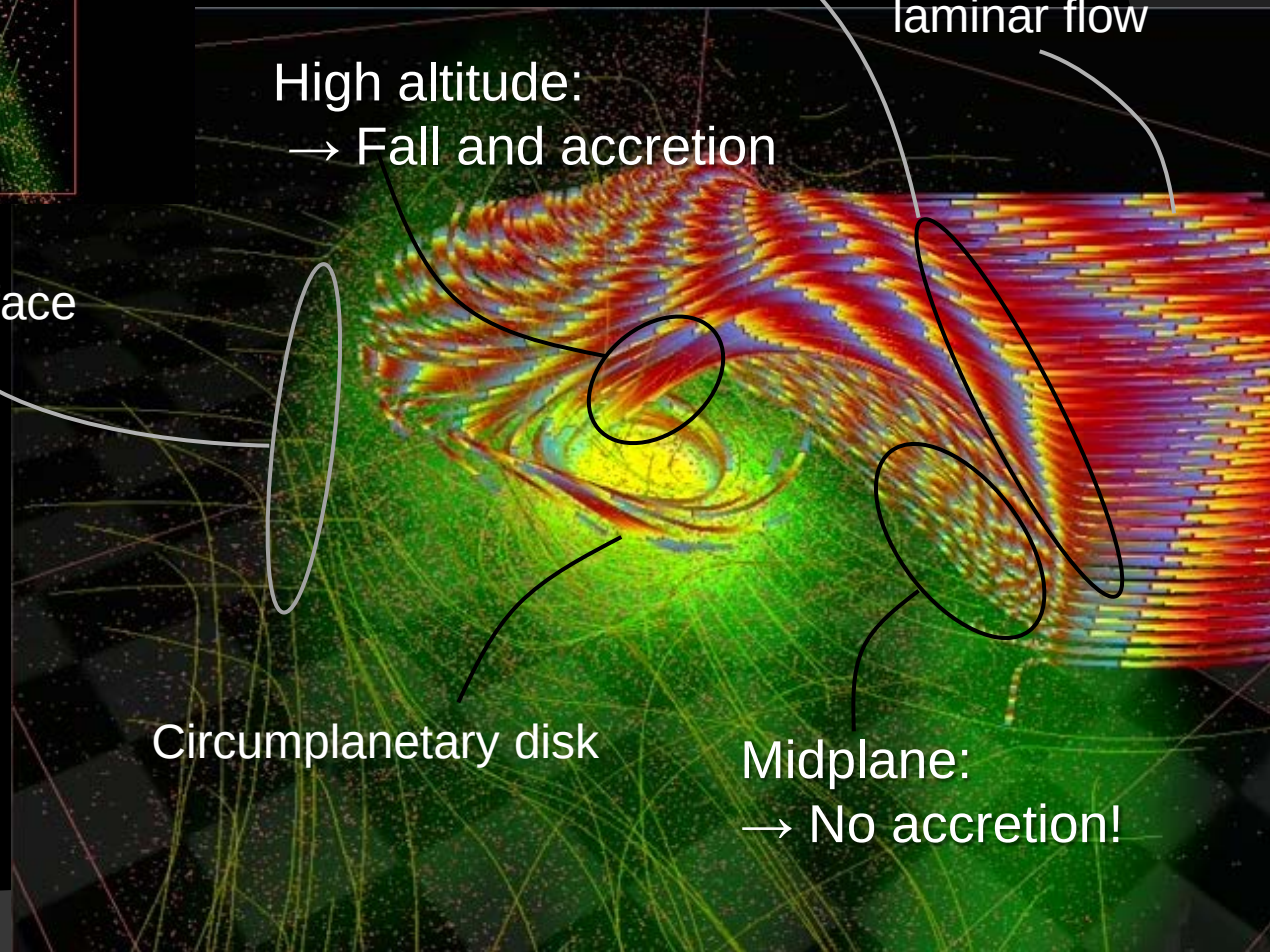
Shock surface

laminar flow

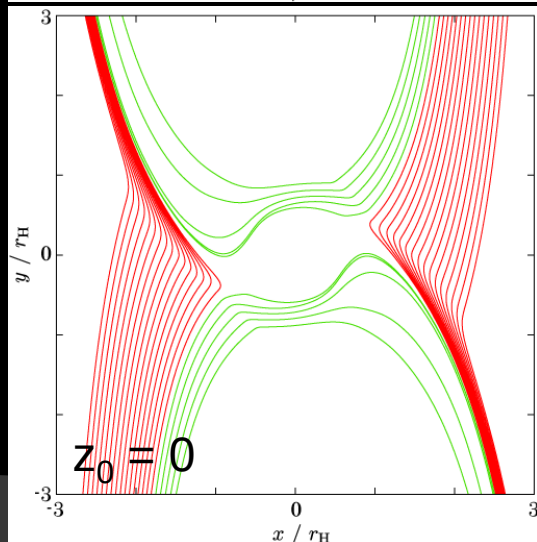
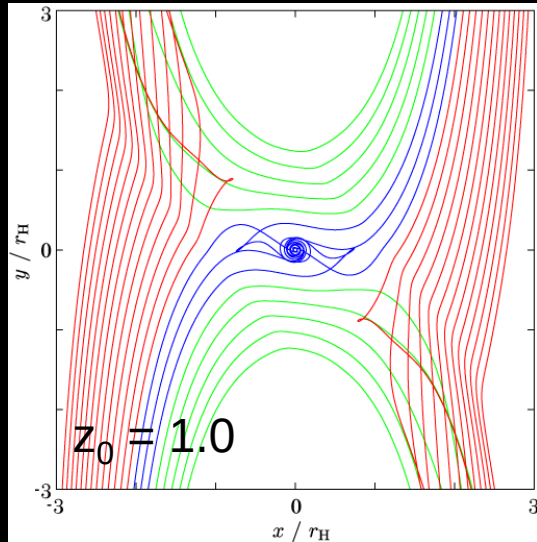
High altitude:
→ Fall and accretion

Circumplanetary disk

Midplane:
→ No accretion!

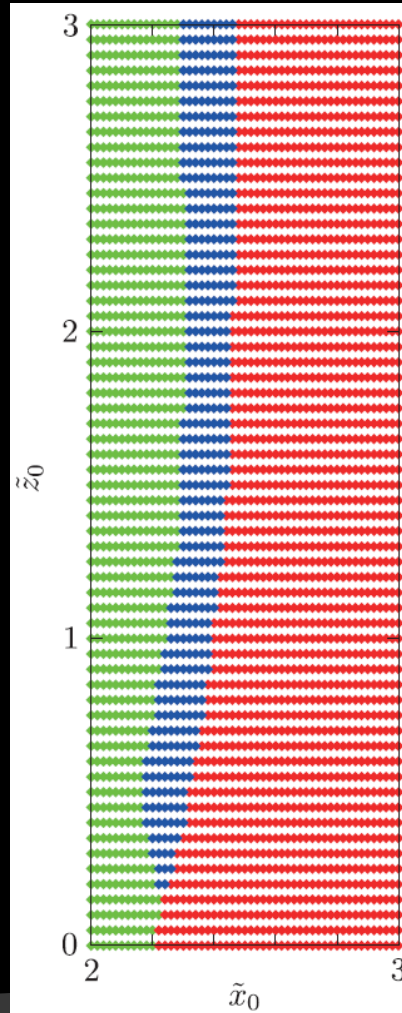
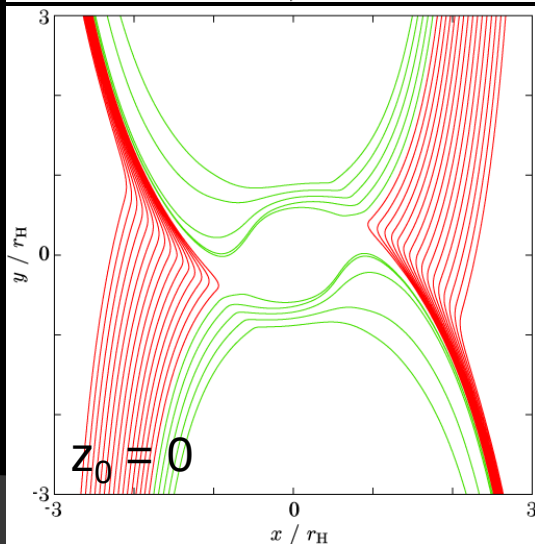
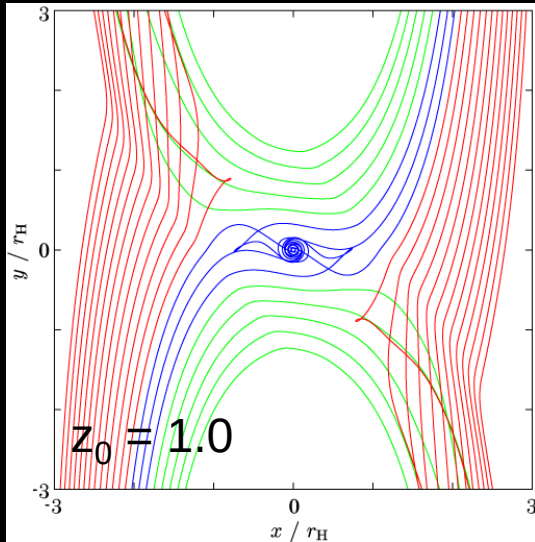


原始惑星系円盤から惑星へ近づく 流れ

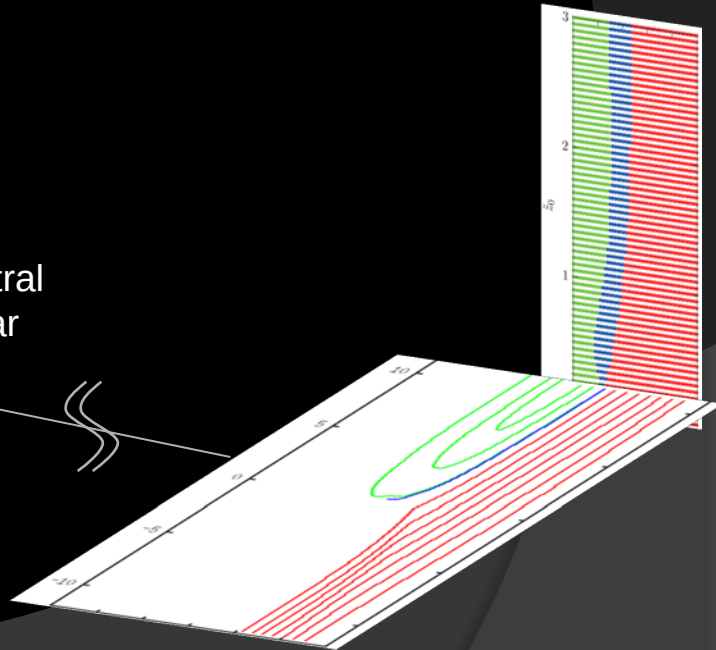


原始惑星系円盤から惑星へ近づく 流れ

U-turn, Accretion, Pass

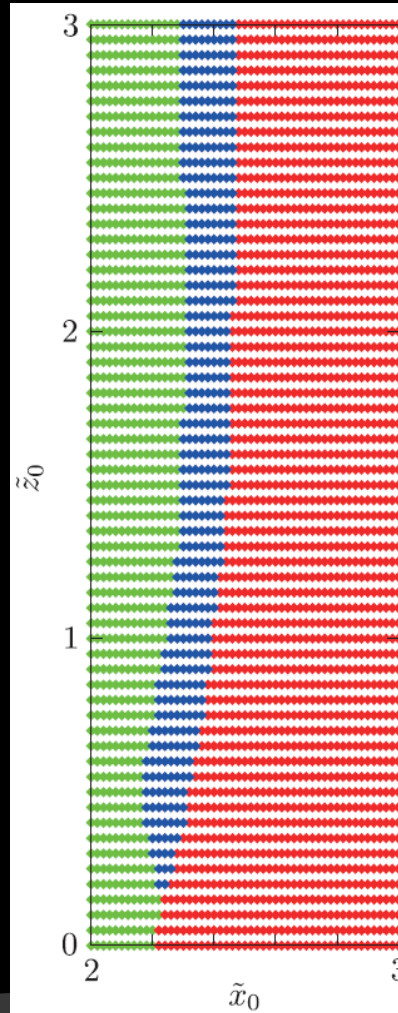
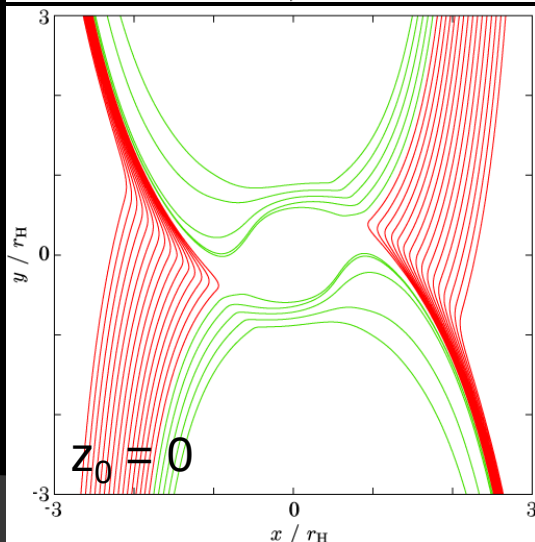
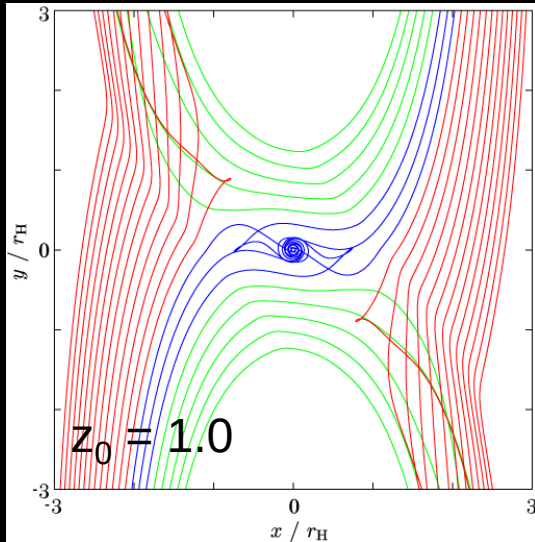


central
star

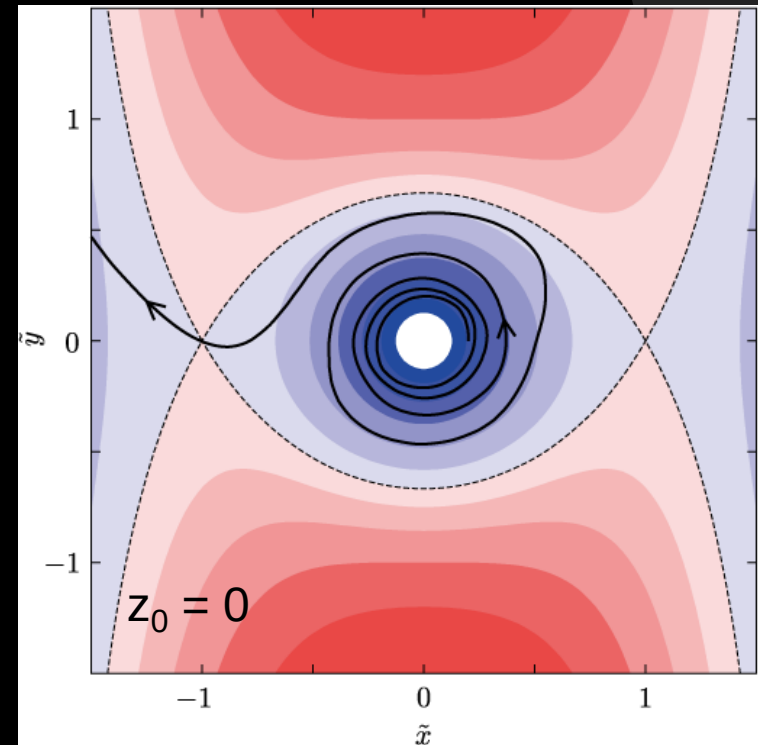


原始惑星系円盤から惑星へ近づく流れ

U-turn, Accretion, Pass

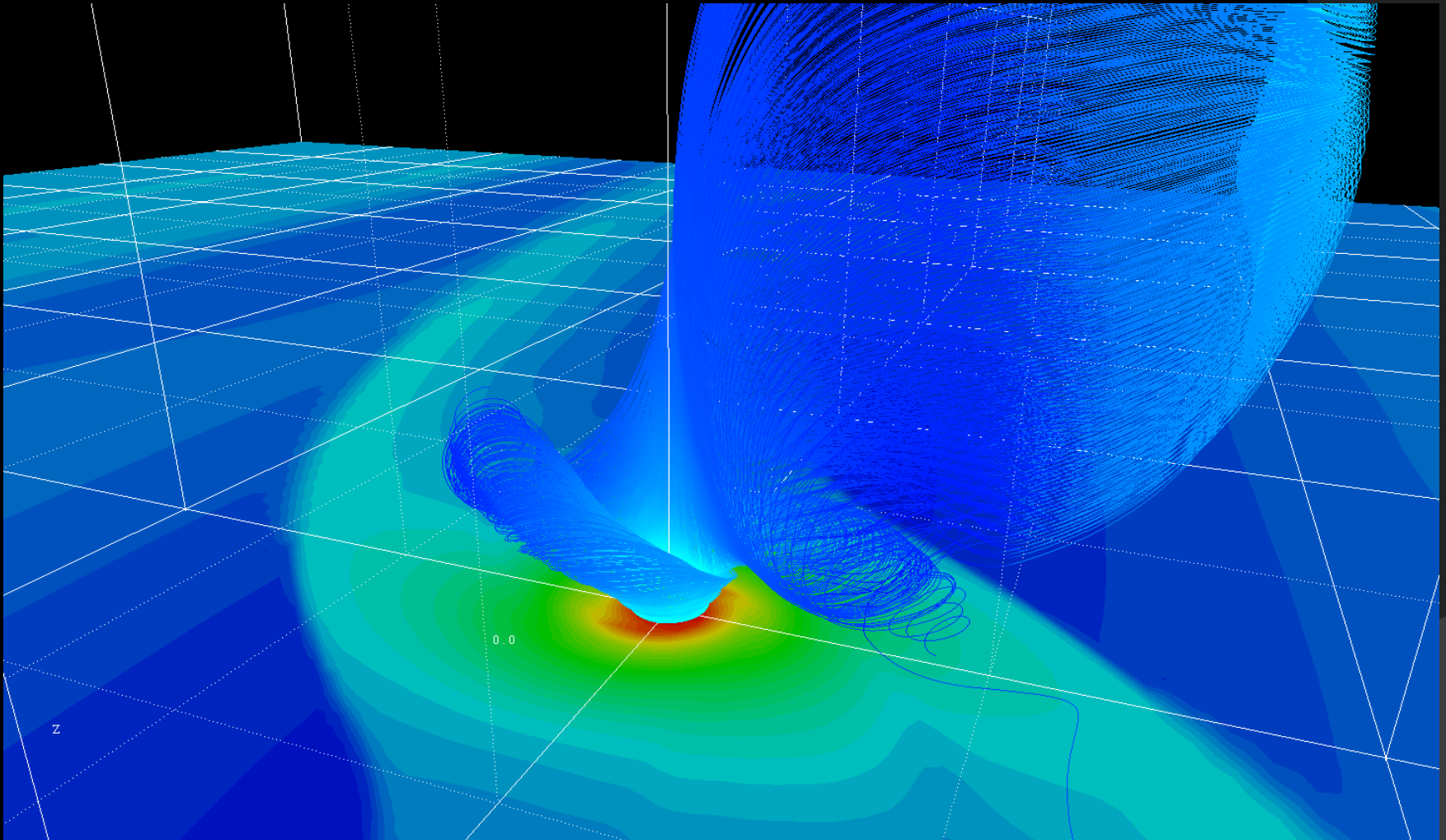


Streamline in the Hill sphere

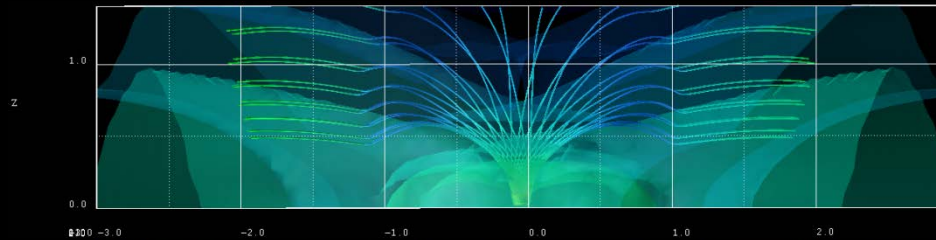


→ 中心面では降着できない。

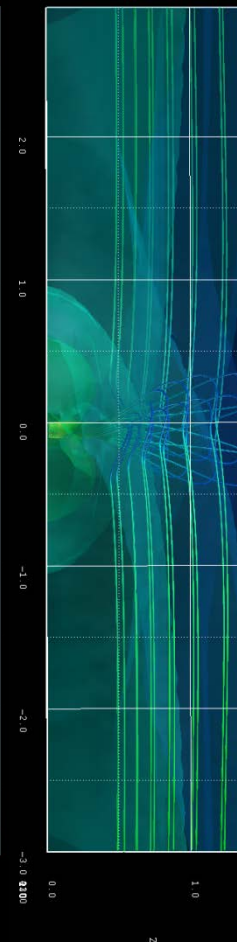
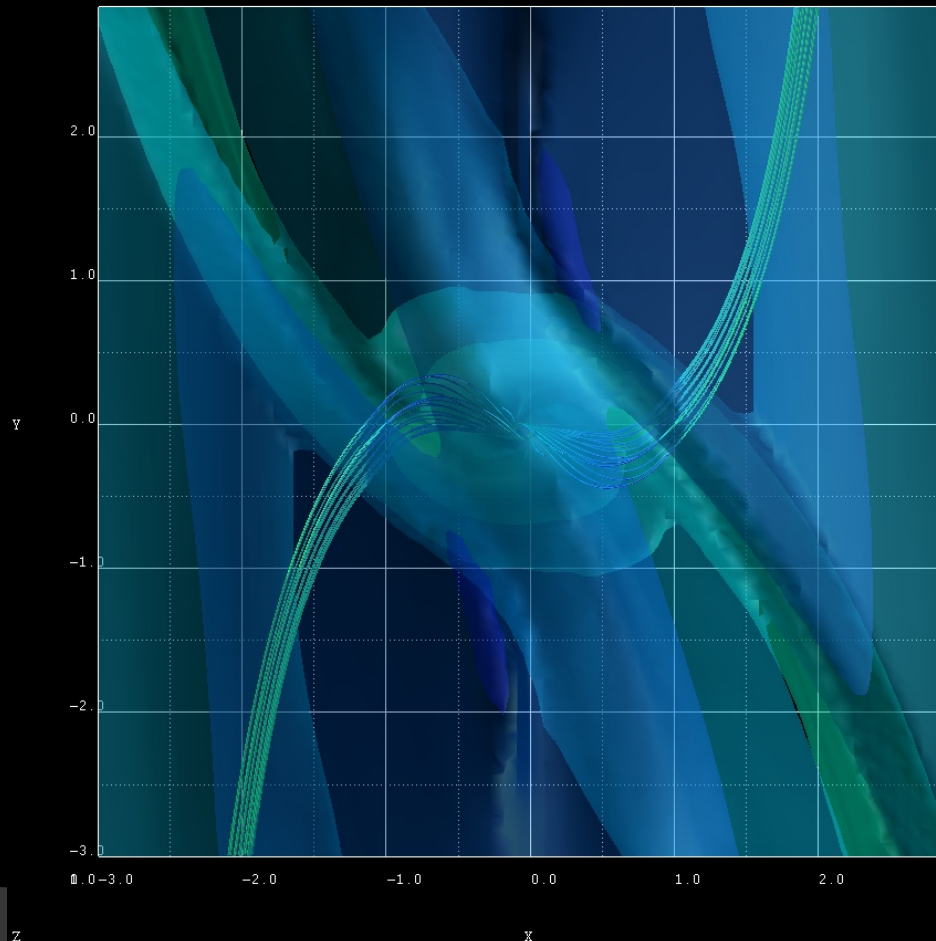
降着する流線



Accreting Gas



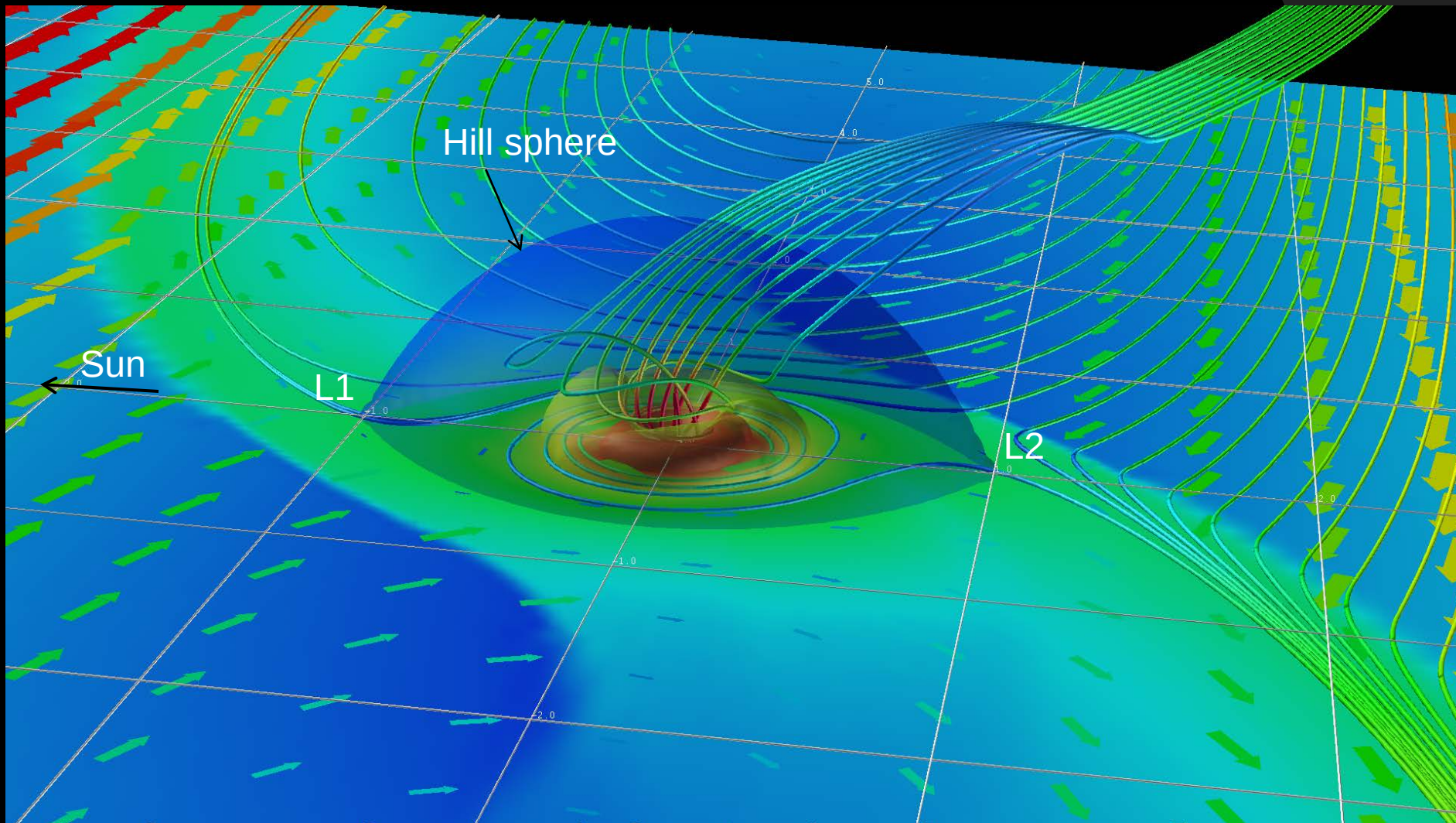
Isodensity surface and streamlines that reach the disk surface at $r=0.05$



Position of the upstream:

x : Narrow band around $x \sim 2$
 z : Wide distribution for $z > 0.5$

Accreting Gas

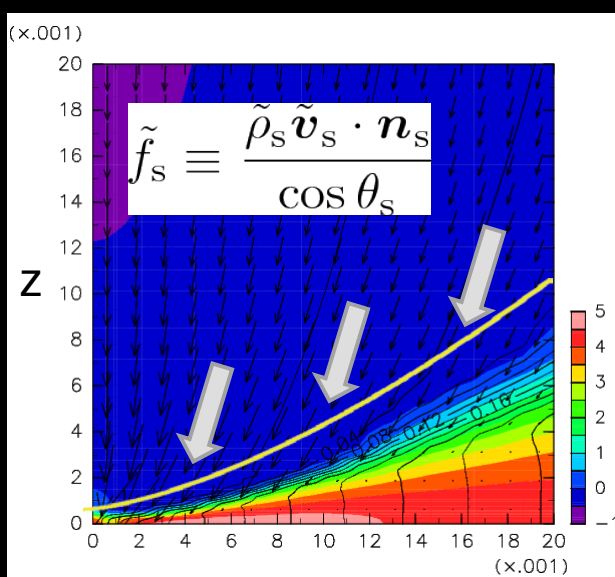


数値流体計算:

周惑星円盤への降着率分布

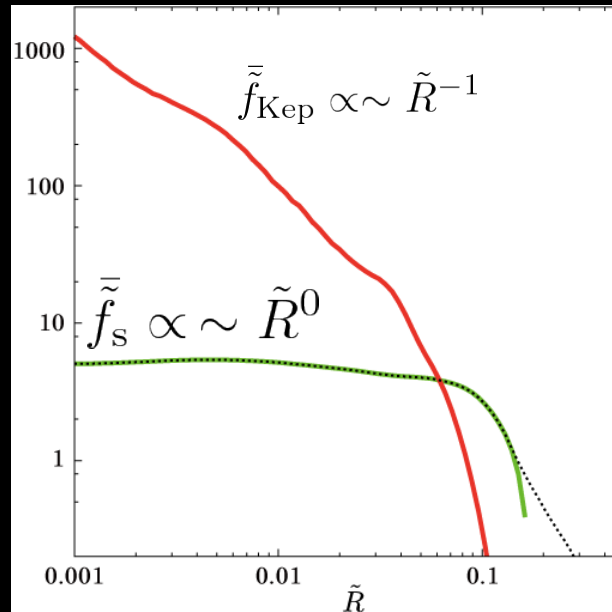
質量と角運動量の降着フラックス分布

Azimuthally-averaged density and velocity



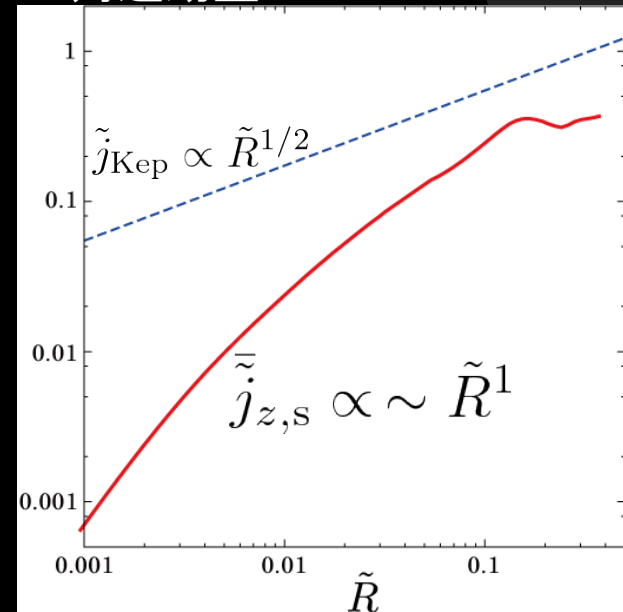
惑星からの距離

円盤表面への質量フラックス



惑星からの距離

降着流中の単位質量当たりの角運動量

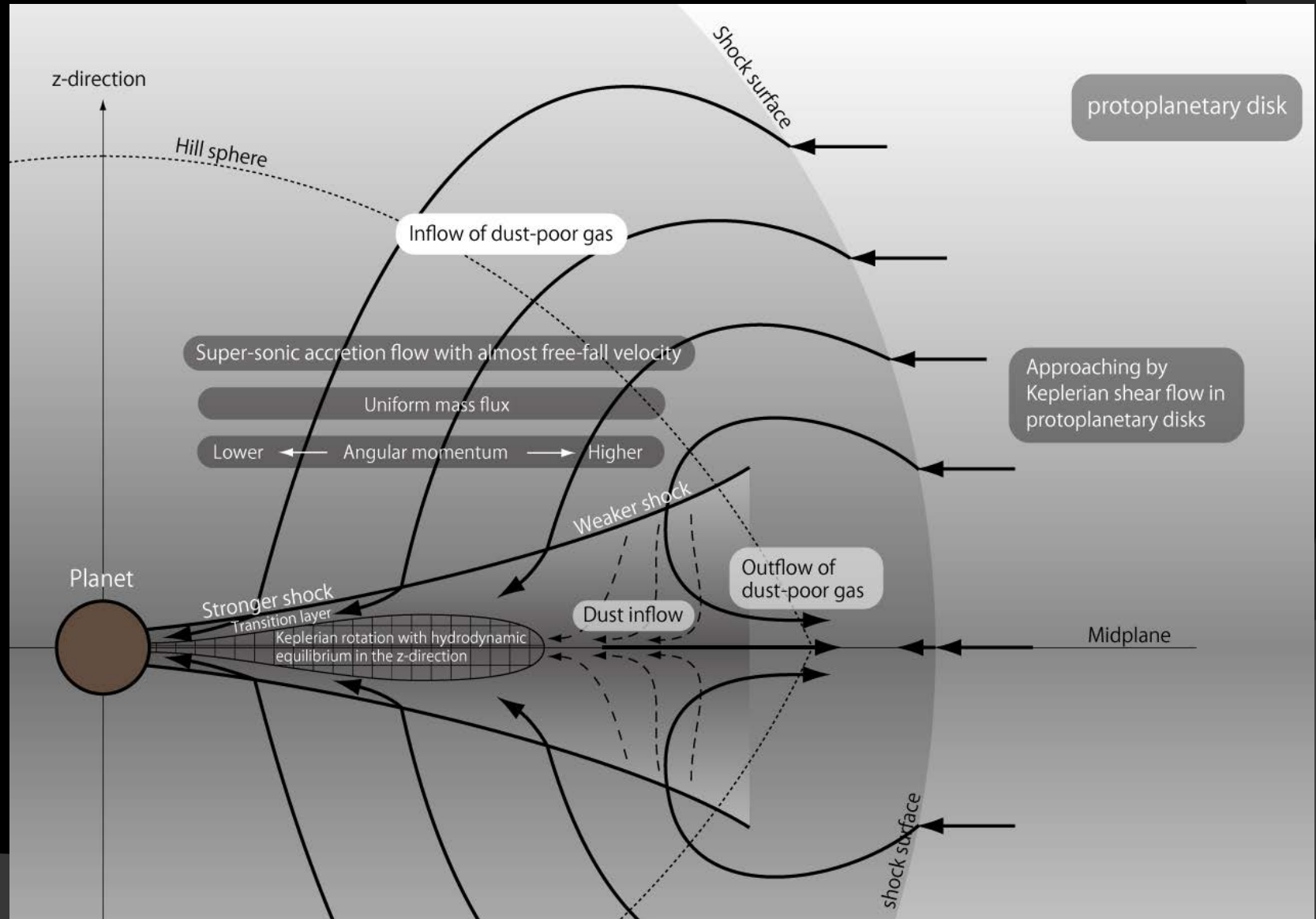


惑星からの距離

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



まとめ

- ◎ 多重格子法を用いた高解像度数値流体計算により、周惑星円盤へのガス降着流を詳細に解析
- 降着するガスは、周惑星円盤外縁部を飛び越して、上空から円盤内側の表面へ直接降着
 - → 惑星重力で強く加速、衝撃波で強いエネルギー散逸
 - → Dust poor なガスが選択的に降着？
- 中心面付近は降着できず、逆に流出
 - → Dust poor なガスが選択的に流出？
- 周惑星円盤への質量と角運動量の降着フラックス分布
 - べき関数でよく近似
 - → 1次元円盤粘性進化モデルに適用可能
 - 角運動量も考慮すると、降着は内側に集中
 - → Canup and Ward モデルと異なる分布

