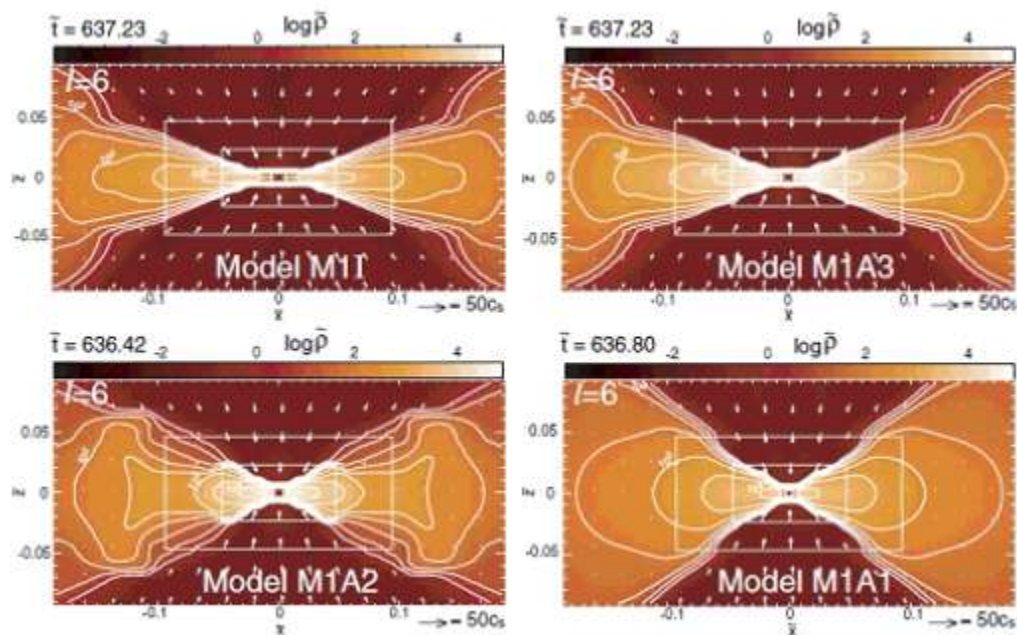
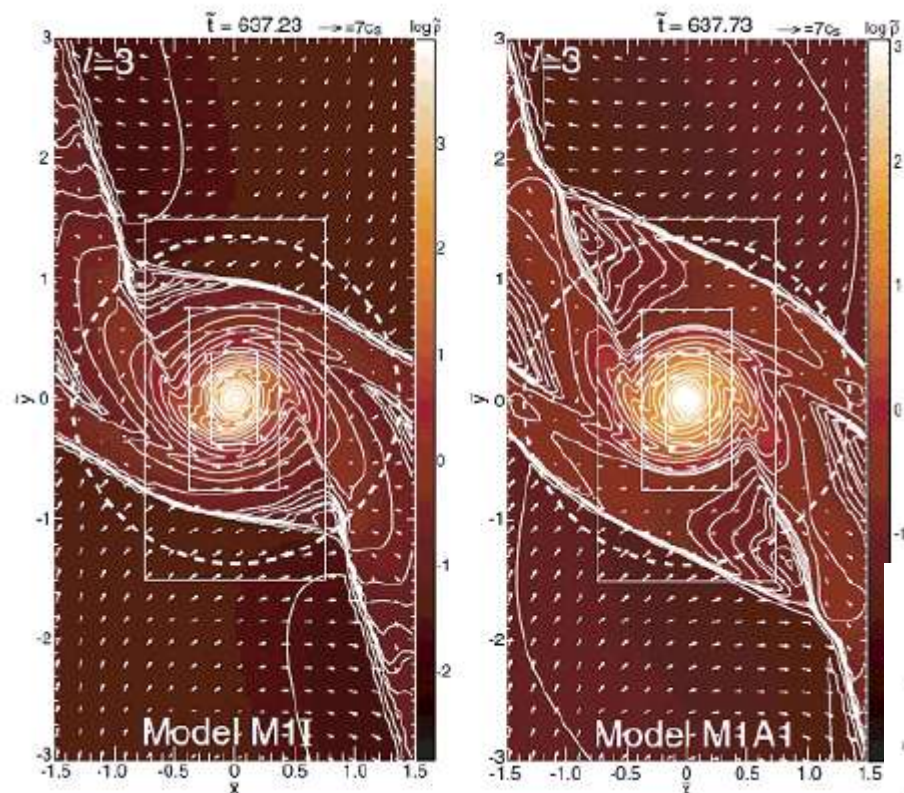


周惑星円盤形成と磁場

町田正博 (九大)

周惑星円盤の形成(Hill圏のスケール)

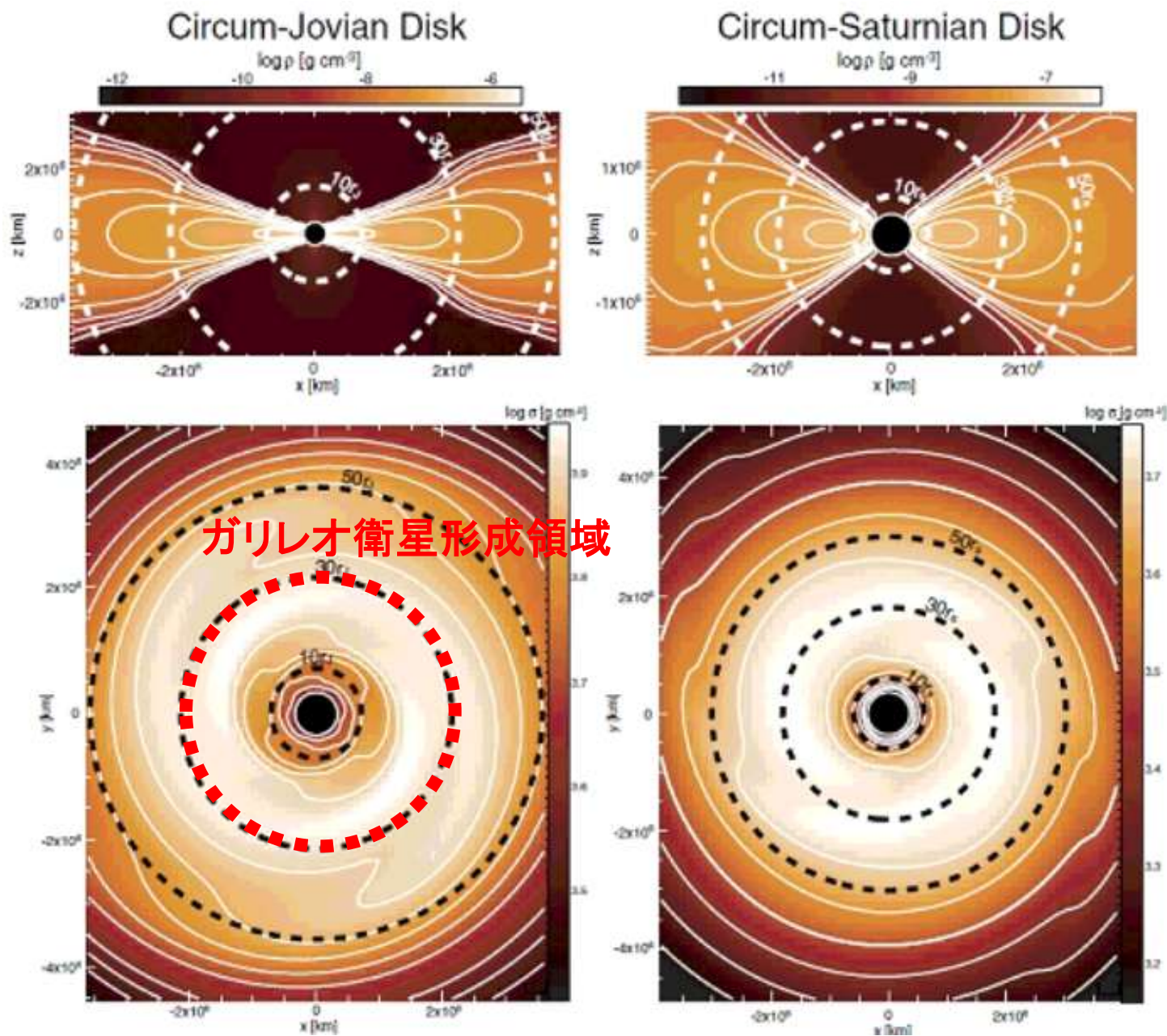
- ▶ 局所計算、Hill圏の数倍のスケール
- ▶ ただし、惑星半径まで解像
- ▶ 原始惑星系円盤からの速度シアーにより角運動量を獲得 $\Rightarrow$ 円盤形成



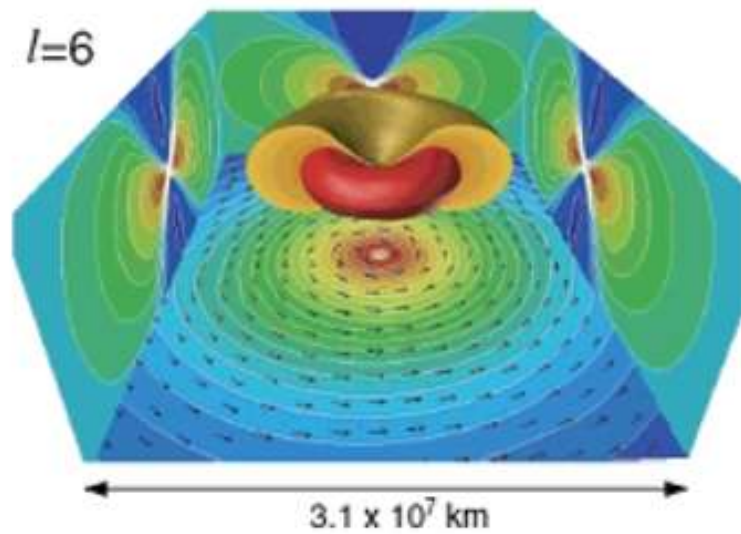
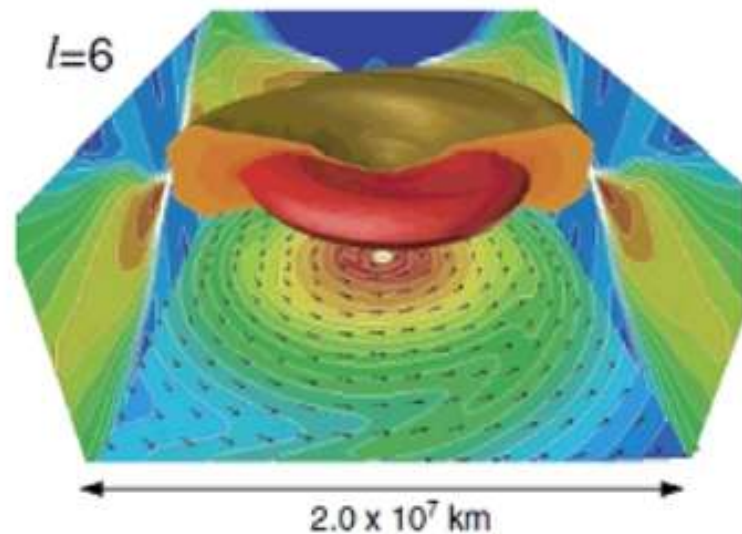
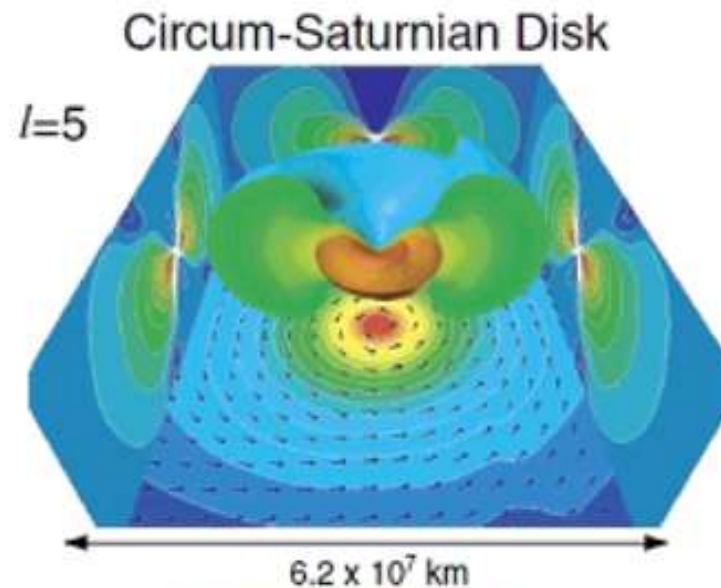
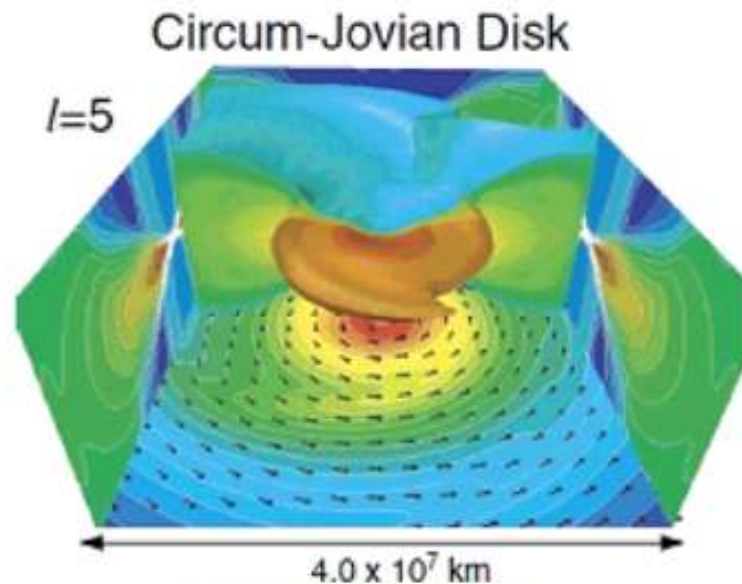
はじめに

- 磁場とその散逸を考慮したガス惑星形成過程を出来るだけ真面目に考えたい
- 周惑星円盤の形成とMRIの関係: MRI乱流中での周惑星円盤形成
- 周惑星円盤と衛星形成の関係
 - 周惑星円盤磁場はMRI-inactive (Fujii et al.)
 - 出来た周惑星系円盤では磁場の効果は考えなくても良い?
- 円盤(原始惑星系円盤、周惑星円盤)の粘性の起源は? MRI
- MRIとギャップの関係 (今回の発表)
- ギャップ形成後に周惑星円盤へのガス降着ストップ
⇒ 周惑星円盤の消失 ⇒ 衛星形成への寄与 (Canup & Ward, 荻原さんの発表)

周惑星円盤の形成(惑星スケール)

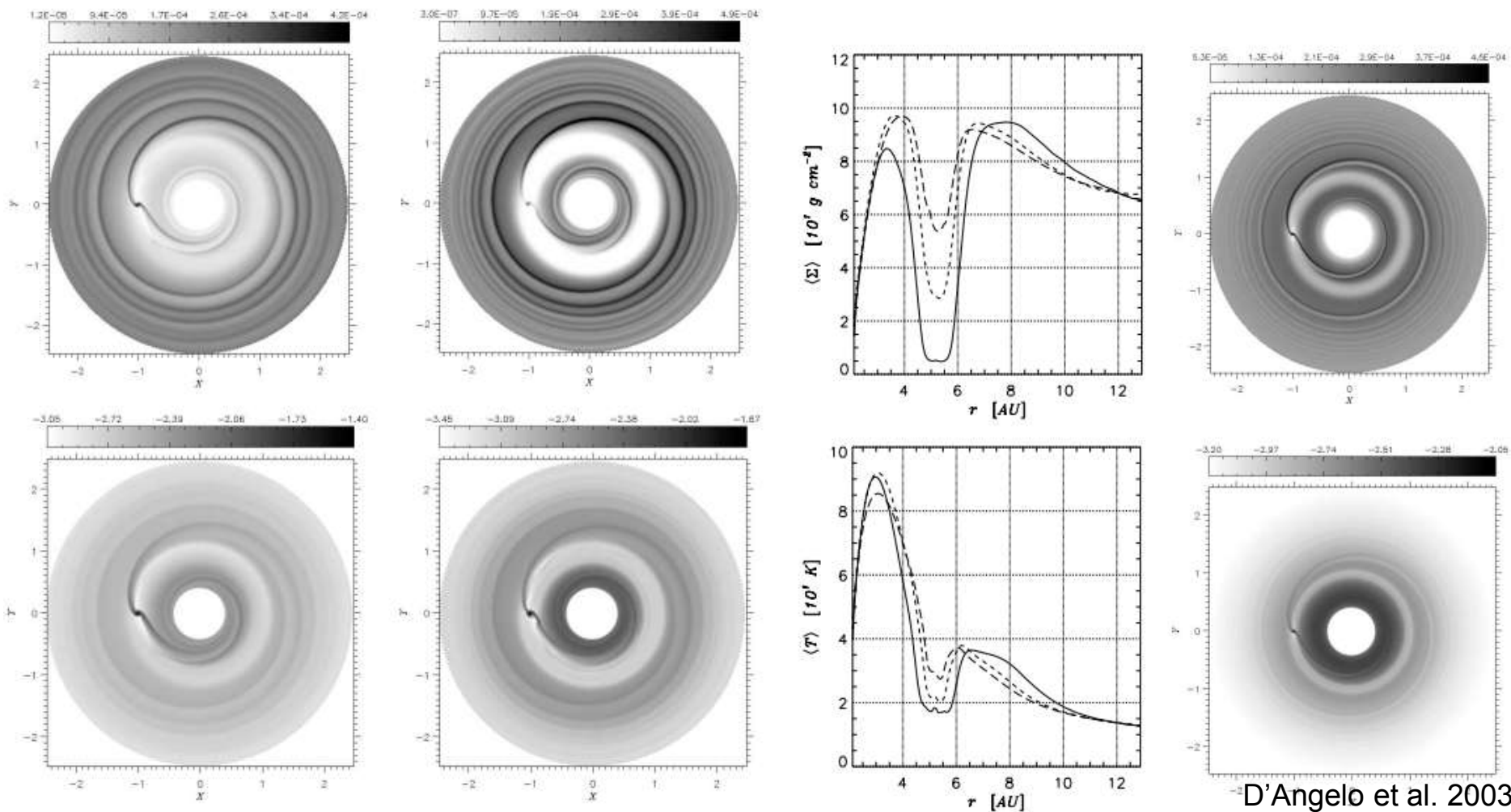


周惑星円盤の形成(惑星スケール)



ギャップ形成: ガス惑星形成との関係

- $R_{\text{Hill}} \sim h$ (ヒル半径~スケールハイト)でギャップが開き始める(?)
- 木星軌道では、0.4木星質量
- 十分大きなギャップに成長するとガス降着が止まる ⇒ 何故、ガス惑星の質量の起源?



ギャップ形成(ギャップのサイズや深さ)を考えるには

粘性が重要

- 原始ガス惑星がガスをはじきとばす ⇔ 粘性で埋める

この釣り合いによってギャップのサイズが決まる

- 粘性の起源は、MRI ⇔ α 円盤モデルで良いのか？

- しかし、そもそも惑星が出来る領域はdead zoneなのでMRI inactiveでは？

- 何故、dead zoneなのか？

- 円盤が厚いために宇宙線による電離が効果的ではない

- しかし、原始ガス惑星が成長してギャップが開くと面密度が下がる

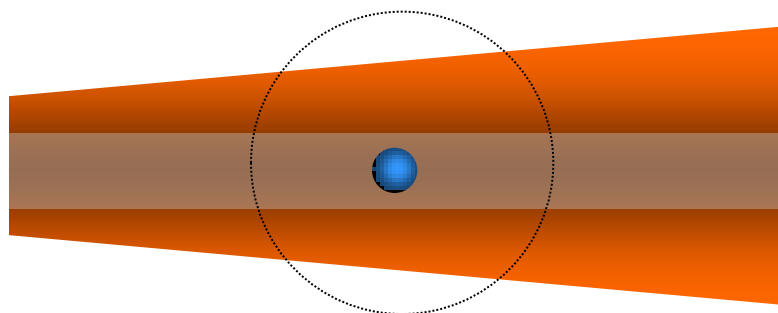
⇒ MRI inactiveな領域(gap 領域)がMRI activeに

⇒ 粘性係数が上昇

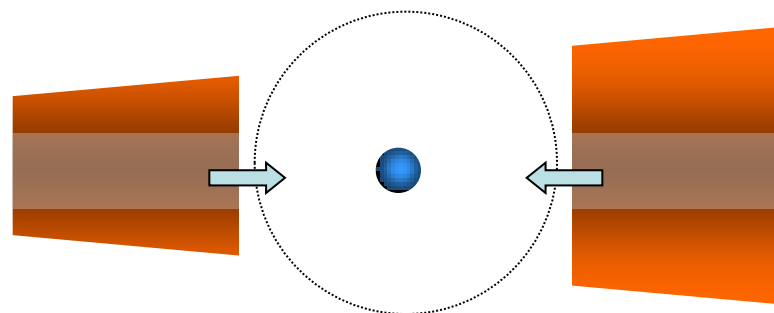
⇒ ギャップが埋まりMRI inactiveになり粘性係数が下がる

⇒ ギャップが開き始める

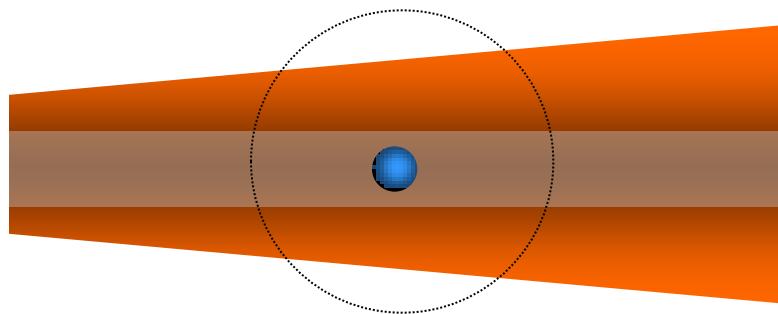
⇒ 最初に戻る



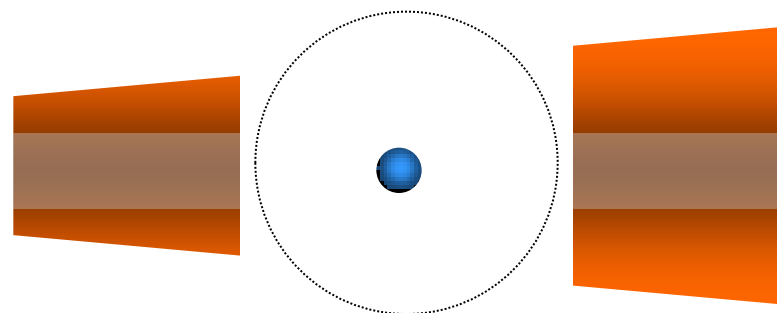
赤道面近傍がdead zone



Gap形成、gap近傍でMRI activeに
Gapの縁からガス流入



ギャップが埋まる、dead zone復活



粘性が小さくなり、gap形成

今回の研究(会)では

- 原始惑星系円盤のresistivityを考慮して、原始ガス惑星周辺のガスの振る舞いを調べる
- 原始惑星は、木星質量(5.2AU)に固定
 - 惑星自身の質量変化は無視(長時間の計算が難しいため)
- Resistivityは、面密度の関数(簡単のため、将来的には奥住抵抗)
- ギャップが出来るかどうか？
- MRI乱流中での惑星形成、周惑星系円盤は？
- 計算結果のみ、解析する時間は取れなかった。。

初期設定

Local Simulation around Protoplanet

■ Basic equations (Resistive MHD eq.)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla P - \nabla \phi_{\text{eff}} - 2\Omega_p (\mathbf{z} \times \mathbf{v})$$

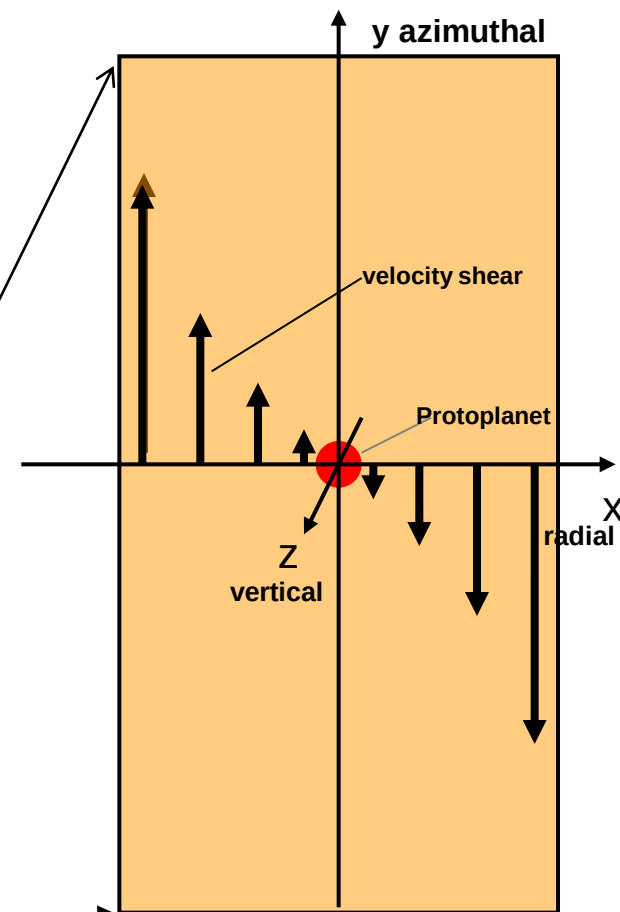
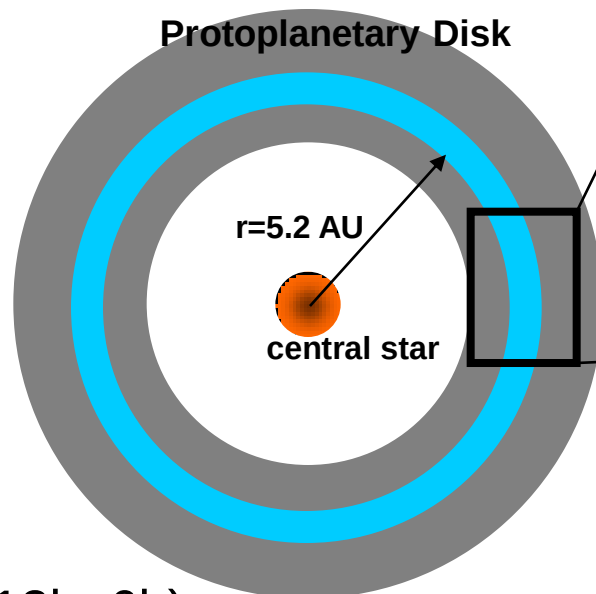
$$P = P(\rho)$$

■ Boundary Condition

- x- fixed boundary
- y- periodic boundary
- z- fixed boundary

■ Size

$$(x, y, z) = (12h, 12h, 6h)$$



x: radial direction
y: azimuthal direction
z: vertical direction

初期設定

■ Density Distribution

$$\rho = \frac{\sigma_0}{\sqrt{2\pi}h} \exp\left(-\frac{z^2}{2h^2}\right)$$

■ Shear Velocity

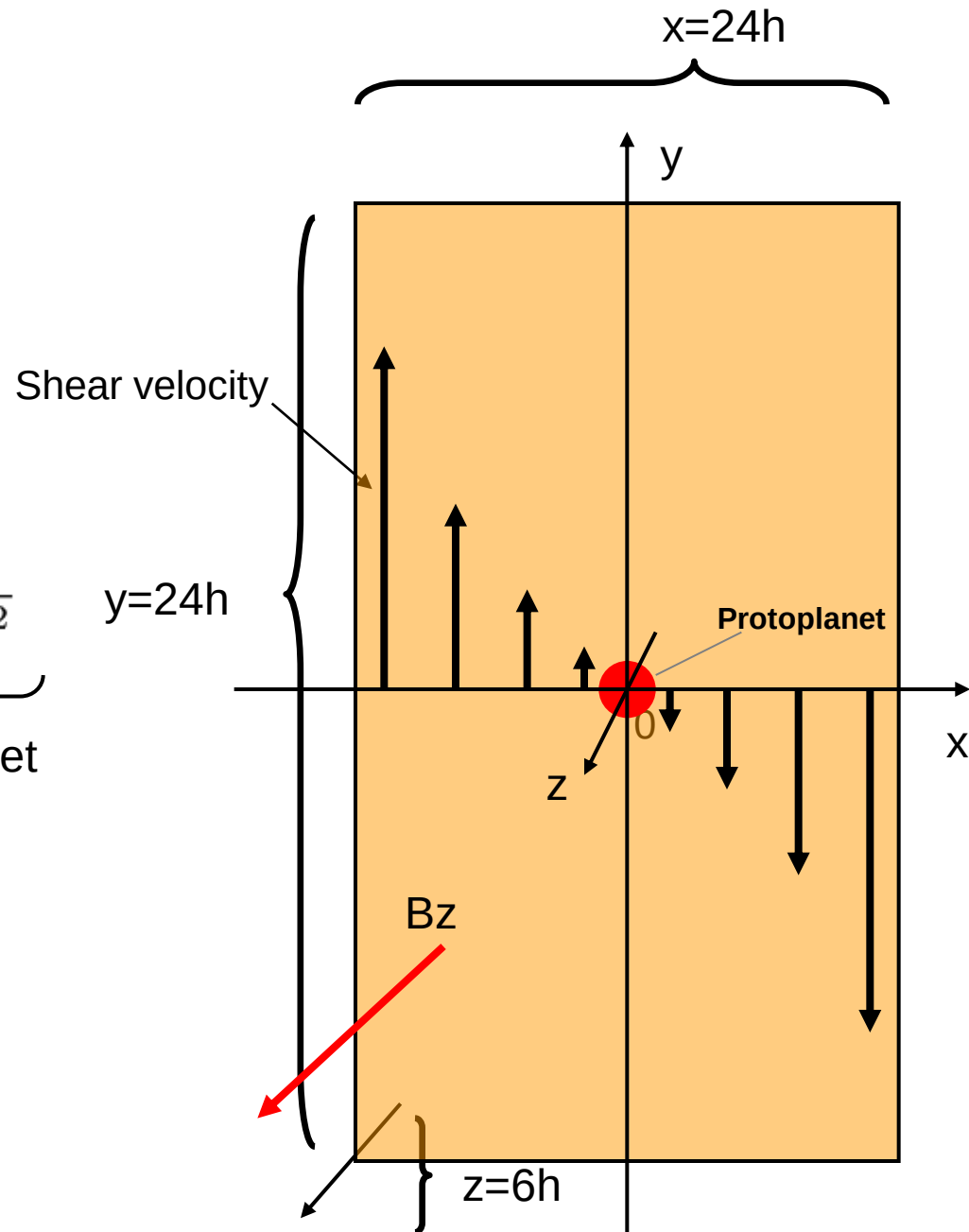
$$\mathbf{v}_0 = (0, -\frac{3}{2}\Omega_p x, 0)$$

■ Gravitational Potential

$$\psi = \underbrace{-\frac{\Omega_p^2}{2}(3x^2 - z^2)}_{\text{Central star}} - \underbrace{\frac{GM_p}{(r^2 + \epsilon^2)^{1/2}}}_{\text{Protoplanet}}$$

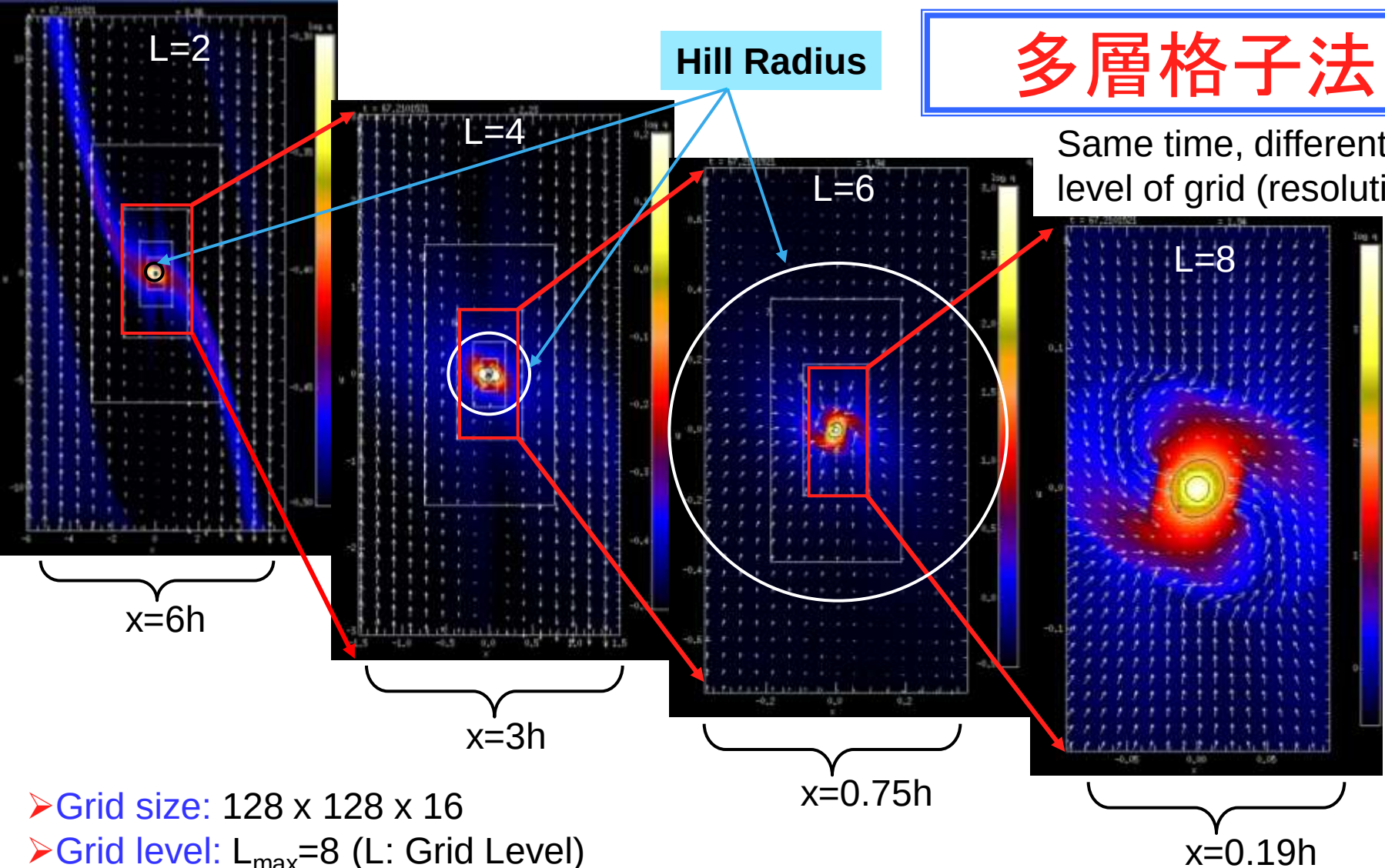
■ Parameters

➤ $M_p = 0.6 M_{\text{Jup}} @ 5.2 \text{AU}$



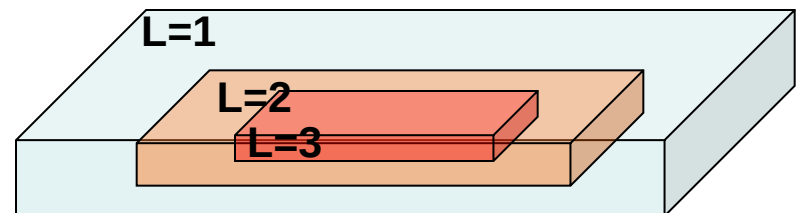
多層格子法

Same time, different level of grid (resolution)



- Grid size: $128 \times 128 \times 16$
- Grid level: $L_{\max}=8$ (L: Grid Level)
- Total grid number: $128 \times 128 \times 16 \times 8$
- Scale range: $L=12h - 0.008h$,
 $\Delta x (L=8) \sim 0.5 R_{\text{Jupiter}} @ 5.2 \text{ AU}$

$L=1, 2, \dots, 8$



今までの夏の研究

- 2005年夏：神戸惑星(?)研究会、犬塚さんの依頼
 - 強磁場、磁場の散逸なし2005年夏、原始ガス惑星からのアウトフロー
- (2007-2008年：武藤君の指導)
 - 強磁場、地球型惑星のmigration, 磁場なし周惑星円盤形成
- 2009年夏：神戸周惑星円盤研究会、佐野さんの依頼
 - 弱磁場、MRI中でのガス惑星形成、一様なresistivity
- 2011年夏：名古屋周惑星円盤小研究会(?), 奥住くんの依頼
 - MRI円盤中での周惑星円盤形成
- 2012年夏：小樽研究会、谷川さんの依頼
 - MRI中でのガス惑星によるギャップ形成

論文として
出版済み

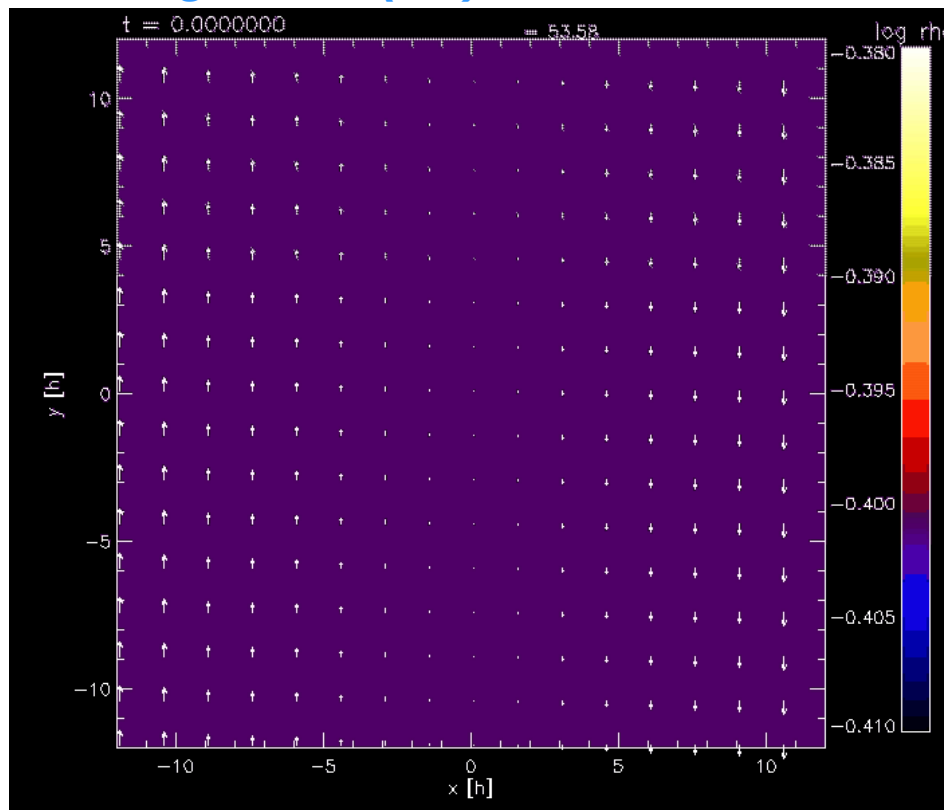


放置

昔の研究 (磁場なし)

(Machida et al. 2008,
Machida 2009)

Large scale ($l=1$)

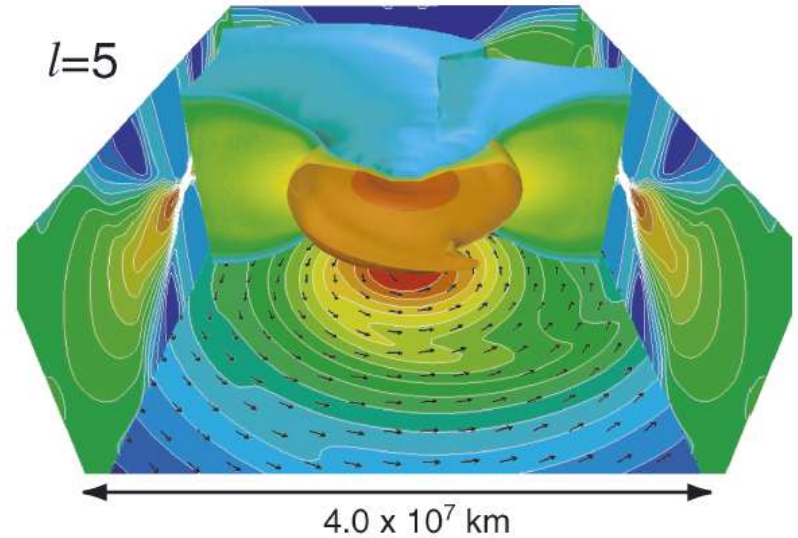


- スパイラルアーム & ギャップ形成
- 周惑星円盤
- 原始惑星系円盤のシア一流から
角運動量を獲得して周惑星円盤の形成

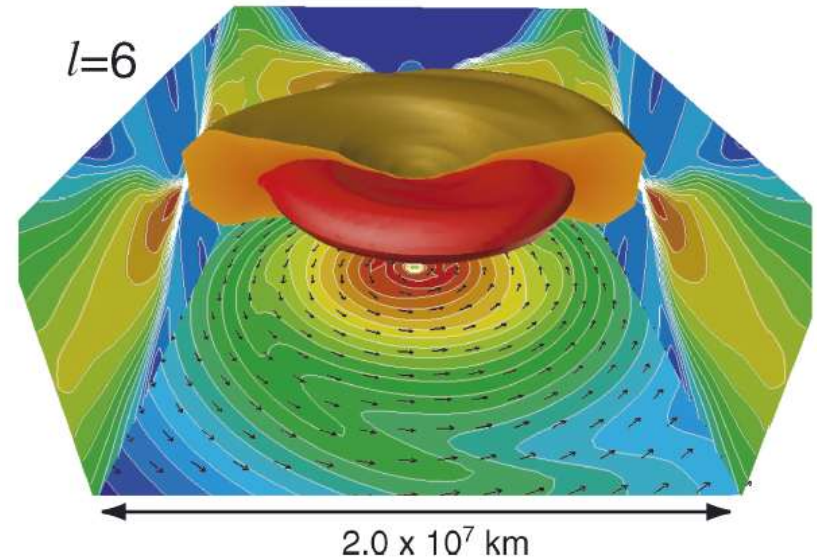
Small scale

Circum-Jovian Disk

$l=5$



$l=6$



昔の研究：強磁場

(Machida et al. 2006)

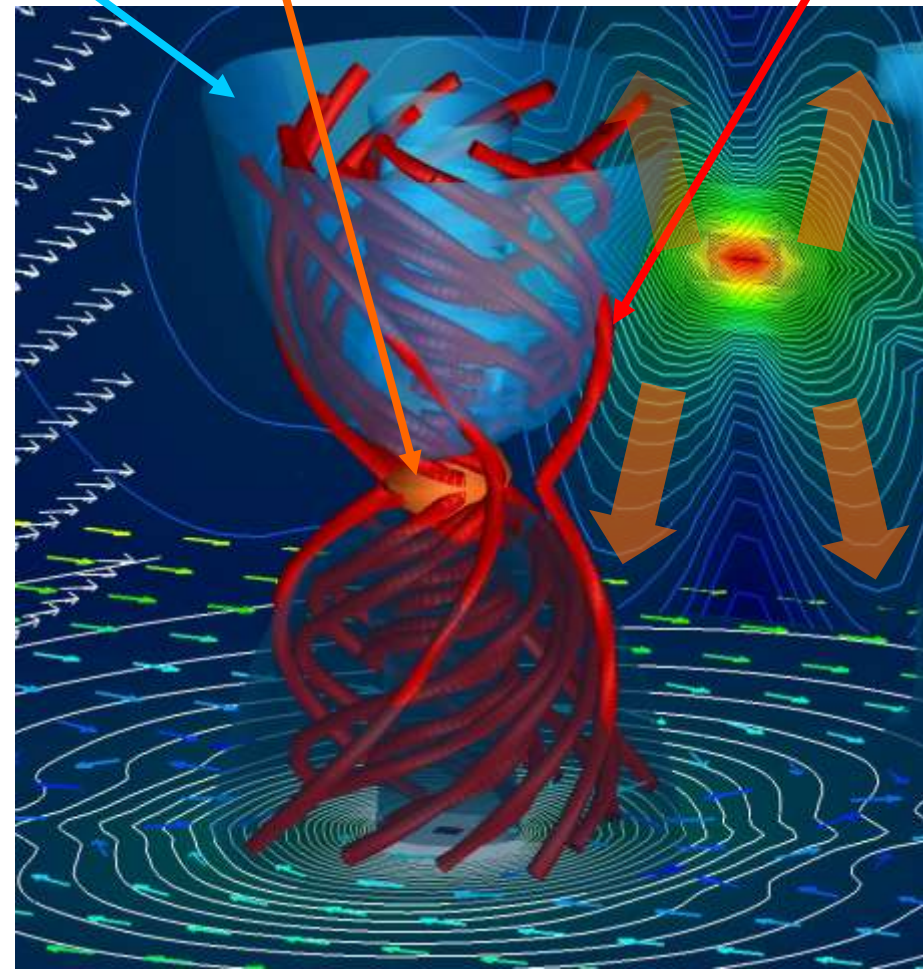
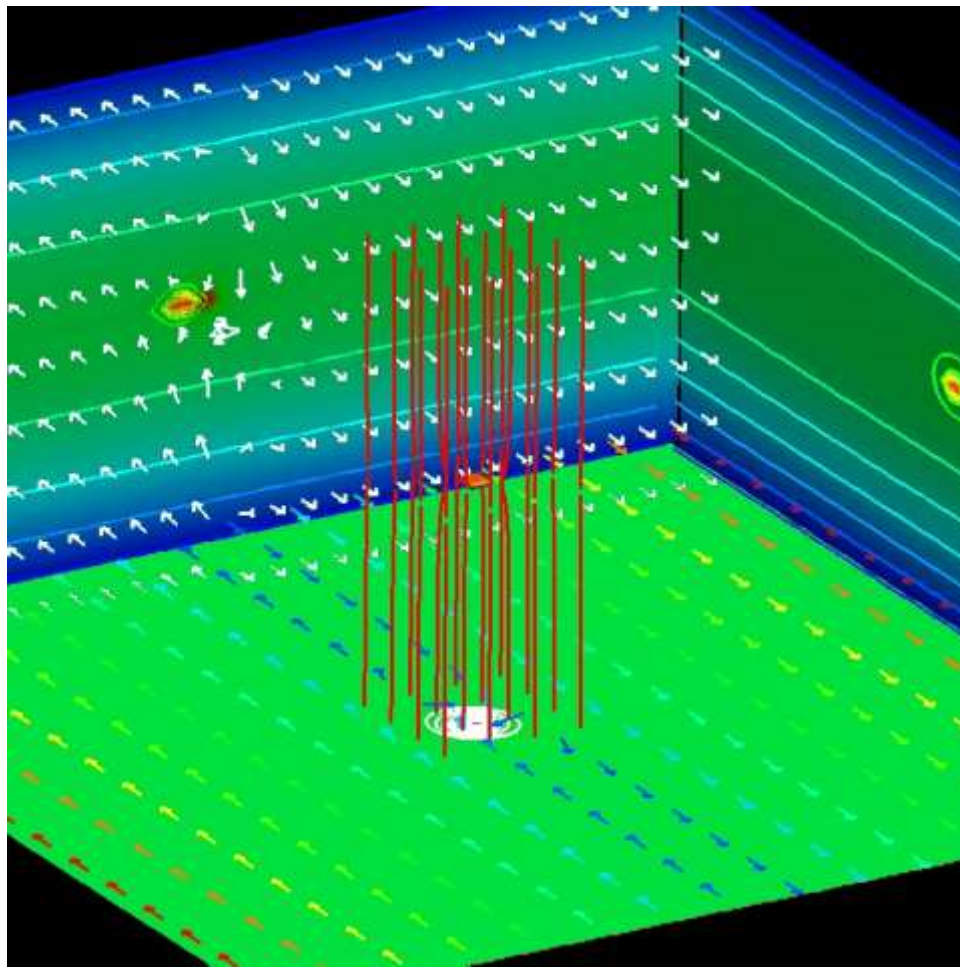
*Outflow driven by the proto planet
embedded in the protoplanetary disk*

$\beta=1$, Ideal MHD, MRI stable

Outflow

Protoplanet
+ Circumplanetary disk

Magnetic field lines



Without B vs. With B

Gas-planet and satellite formation in the unmagnetized or magnetized disk

Model	No B Model	Low- β Model	High- β Model
MRI	No	No	Yes
Structure	Spiral	Spiral	Turbulence
Outflow	No	Yes	???
Gap	Deep	Deep	More deep
$M_p/(M_p/dt)^{*1}$	$\sim 10^4$ yr	$\sim 10^5$ yr	$\sim 10^6$ yr?
Satellite disk (acquisition process)	Large (shearing motion)	Compact (transfer by outflow)	Compact (turbulent flow)
B in satellite disk	No	Strong	Strong

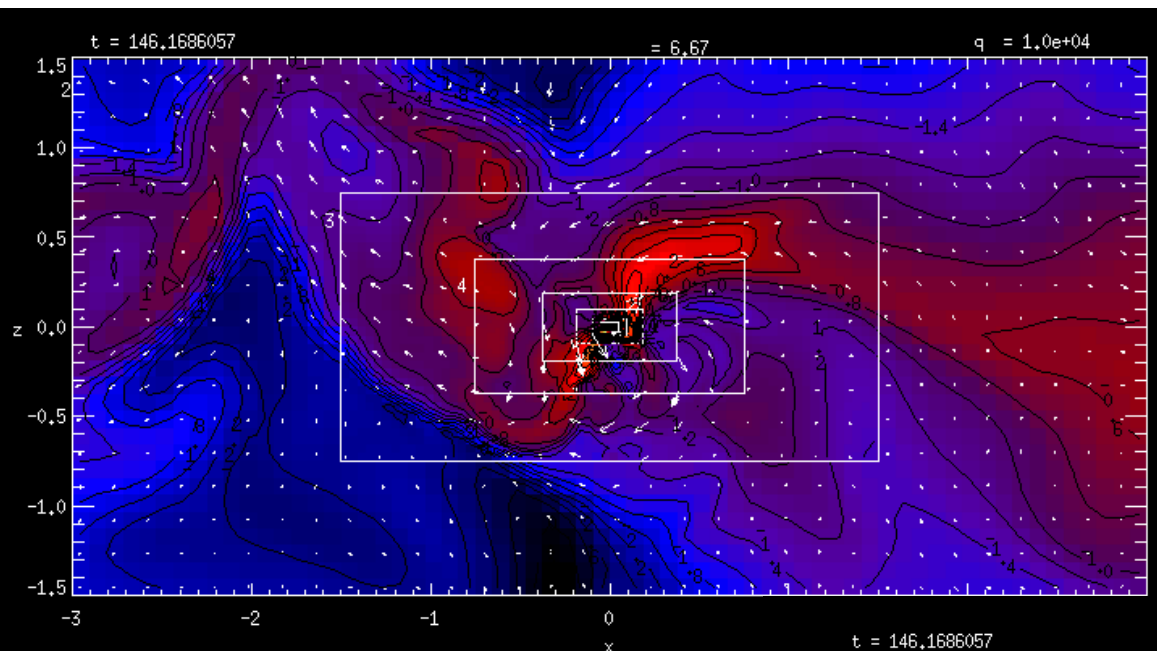
*1: $M_p/(M_p/dt)$ is the growth timescale of the protoplanet
(gas accretion timescale of the protoplanet)

去年の研究(奥住研究会)

- $\beta \sim 10^5 - 10^6$ の磁場を持つ原始惑星系円盤
- 原始惑星系円盤中に原始惑星
- Resistivityを考慮 (これから)
- 周惑星系円盤を解像
- 磁場が周惑星系円盤に与える影響

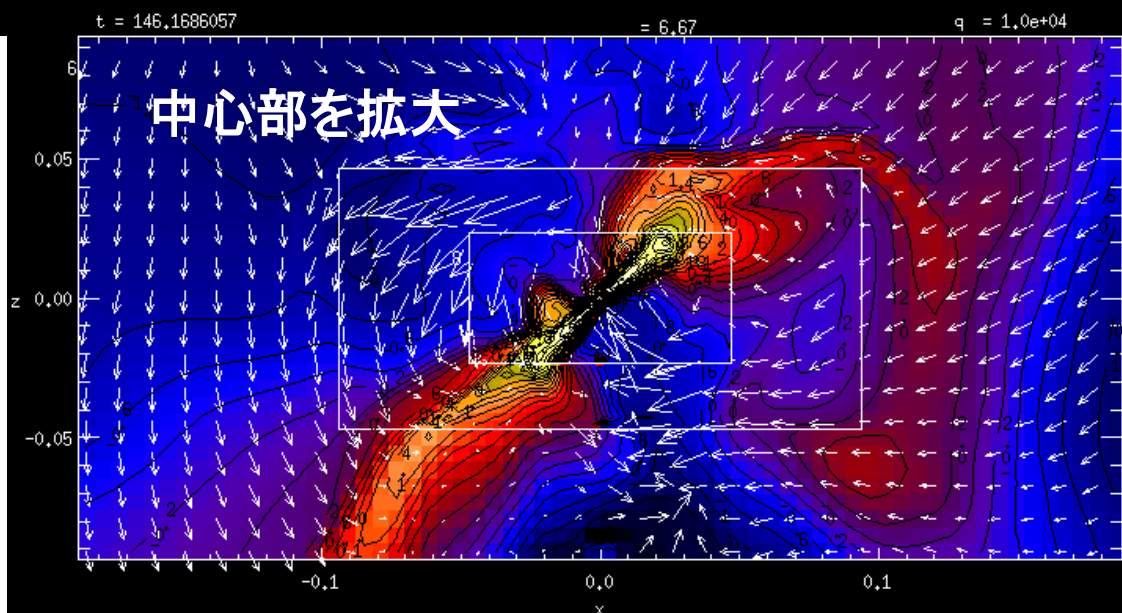
MRI中での周惑星円盤形成

y=0切断面

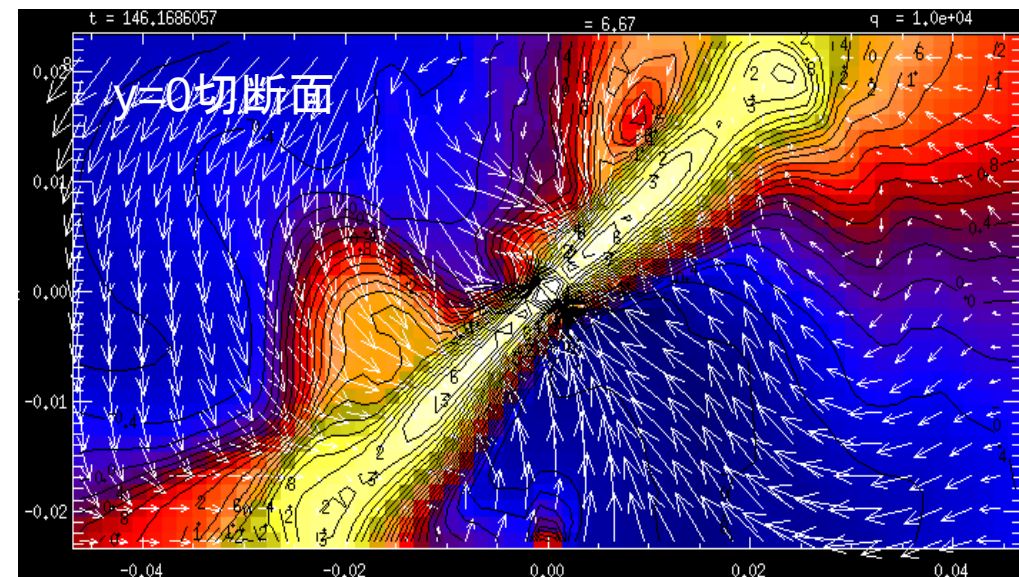
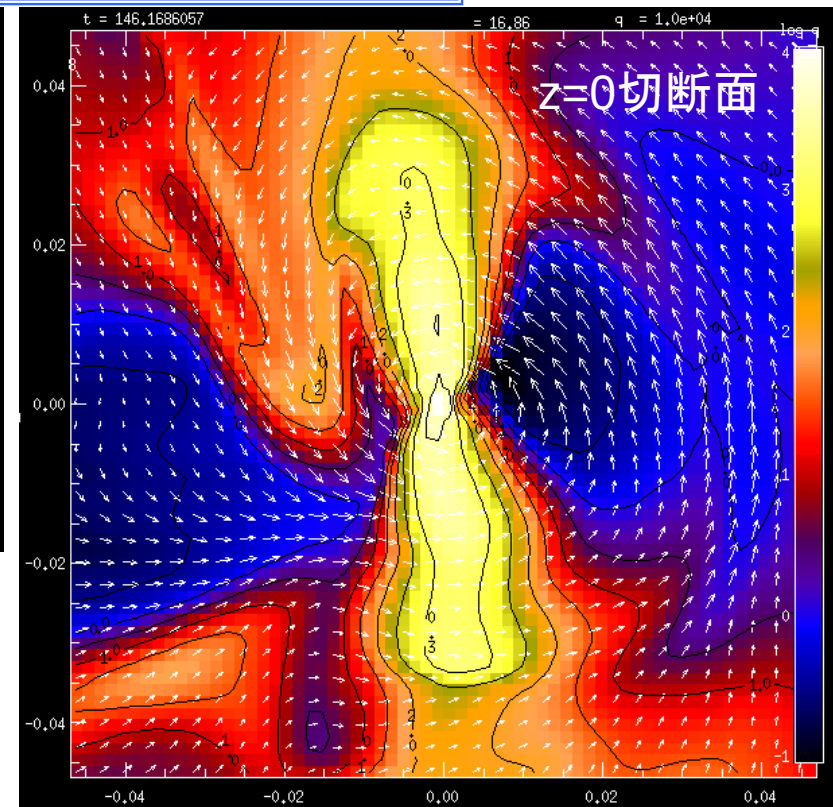
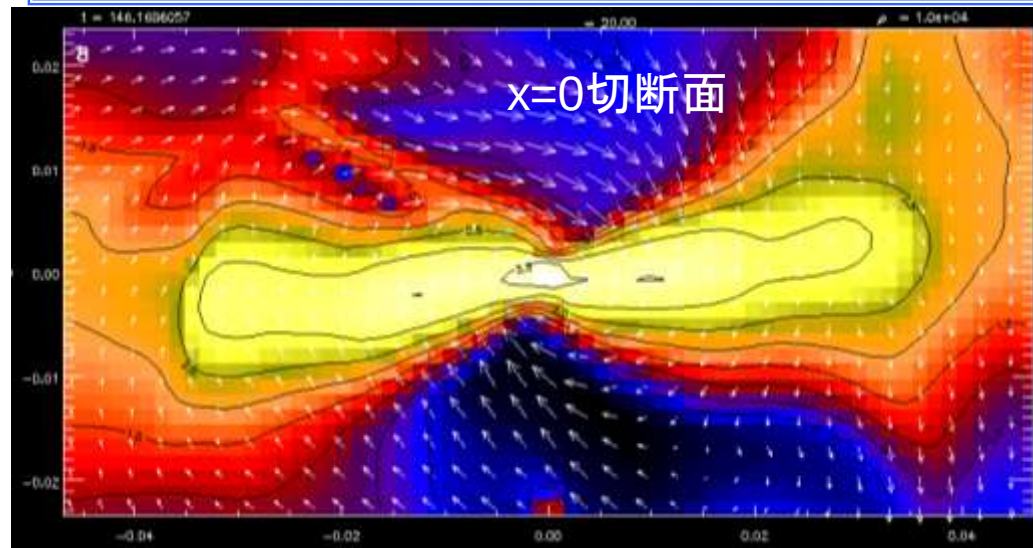


- 激しく時間変動する周惑星円盤
- 円盤かどうか疑わしい
- そもそもこんな環境で(ガス)惑星が出来るのか？

こんな環境では衛星は出来ないだろう

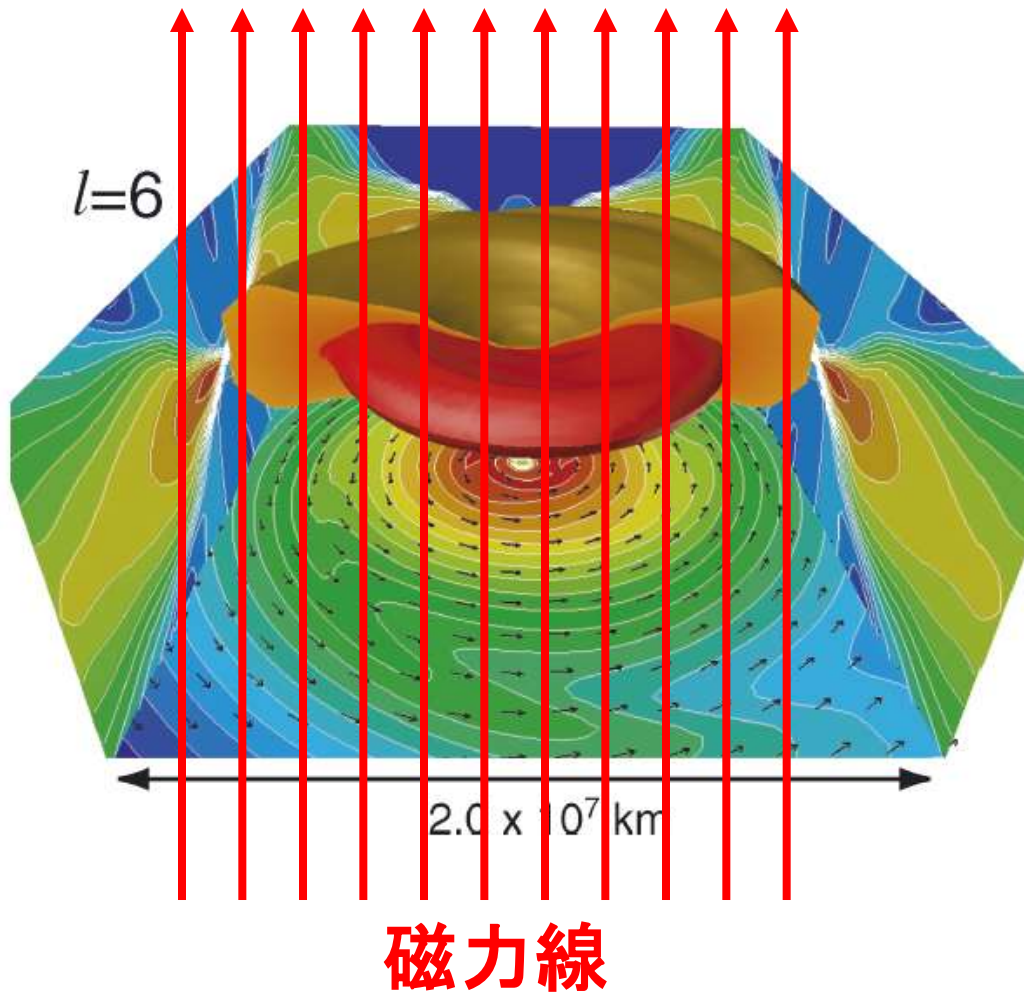


MRI中の周惑星円盤形成: 拡大図



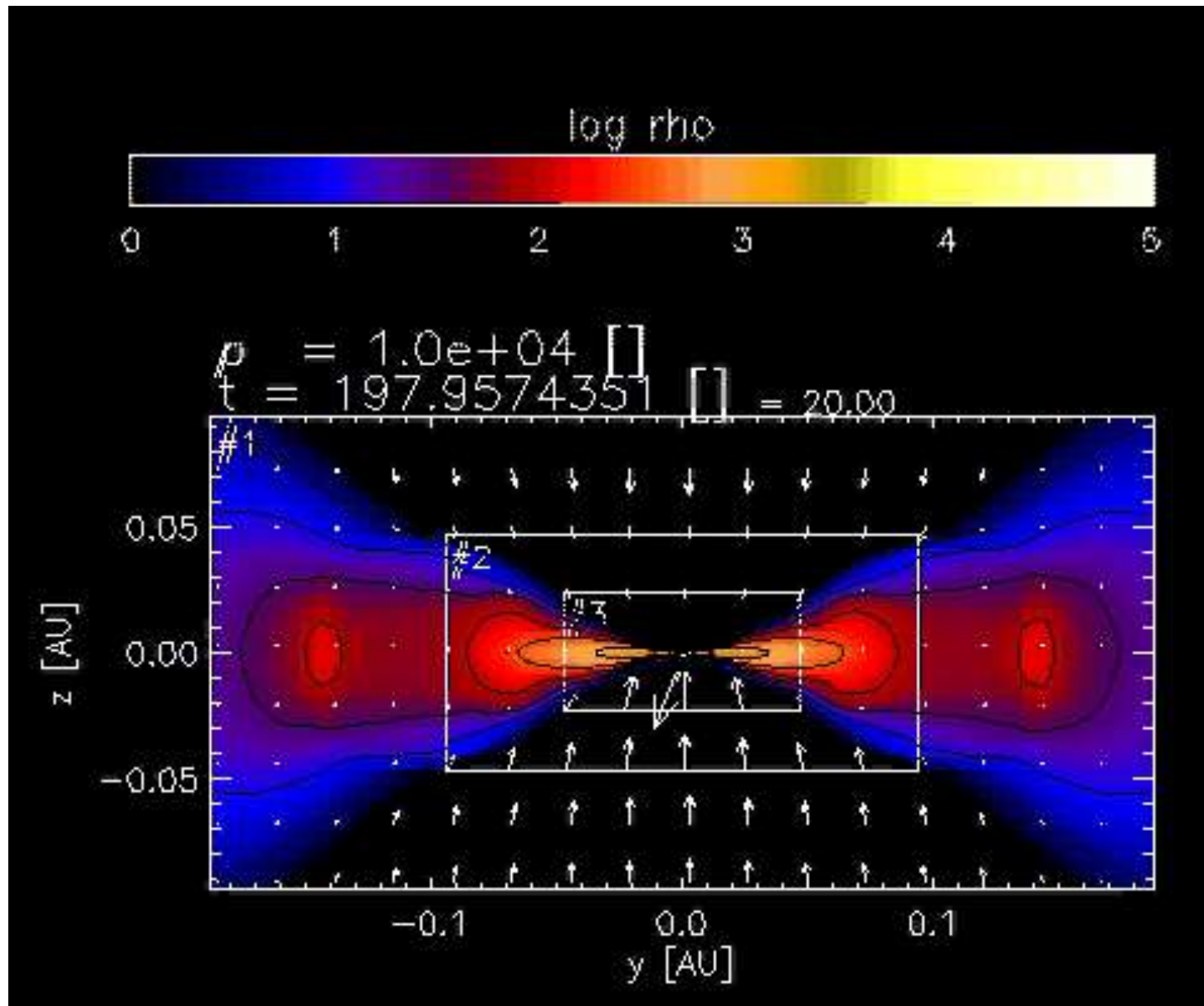
- Box size: Hill半径の1/10
- 木星半径の70倍程度
- 回転円盤？
- 磁場がなければ回転する周惑星円盤が出来ているスケール

周惑星円盤を作った後で磁場を加えてみる

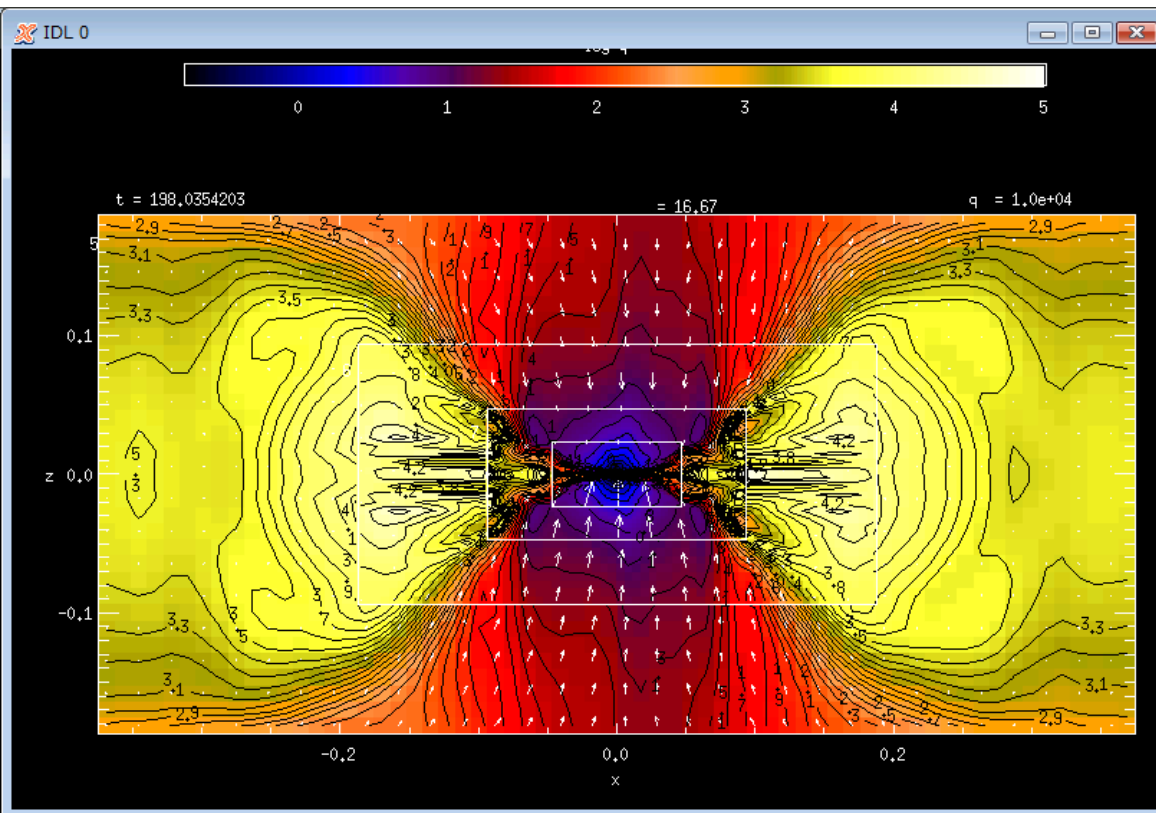


- 磁場なしで周惑星円盤を形成
- 十分に定常になった後、磁場を与える
- 一定の磁場強度、 B_z のみ(+摂動)
- 磁場の強さ
 - ✓ $\beta \sim 10^3$:
初期原始惑星系円盤の中心面
 - ✓ $\beta \sim 10^{5-7}$:
周惑星円盤の赤道面)
 - ✓ $\beta \sim 1$:
原始惑星系円盤上空

周惑星円盤形成後に磁場を加えた結果



Plasma β



周惑星円盤形成後に磁場を加えた結果

- 何も起こらなかった
- 時間積分が足りない？
 - ⇒ 数10周くらいはしているはず
- 鉛直方向の空間解像度が圧倒的に足りない
 - 中心部で数メッシュ(~4メッシュ) ⇒ 熱進化を考慮して厚くする(?)
 - 回転円盤の中間地点で32メッシュ
- 初期磁場が弱い? $\beta > 10^6$
- 本質的にMRIが起こらない?
- Restivity?
- そもそも多層格子法で計算してはいけない?
- 外側の原始惑星系円盤がMRI起きるまで計算出来ない(?)

議論

□どのような設定が妥当なのか？

□最近の計算

➤MRI乱流が起こる前に周惑星円盤を空間分解

⇒ 何も起こらなかった (図なし)

➤MRI乱流が起こってから周惑星円盤を空間分解

⇒ 激しく時間変動する円盤(?), 回転軸(?)が異なる方向

➤磁場が無い条件で出来た周惑星円盤に磁場を与える

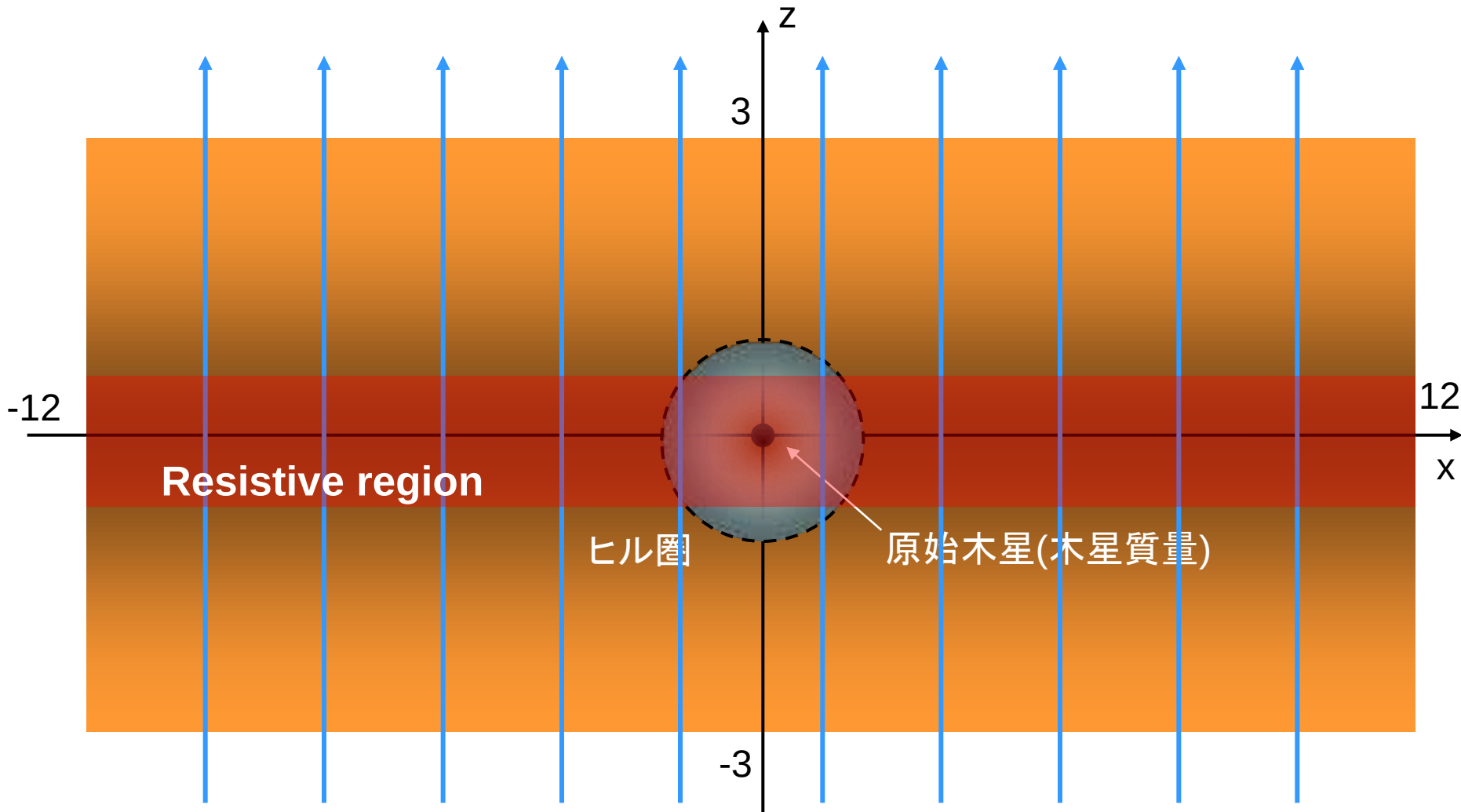
⇒ 何も起こらなかった

□Resistivityを考慮して、まずは多層格子を使わないで
木星周りの計算

□妥当なResistivityを考慮して周惑星円盤形成

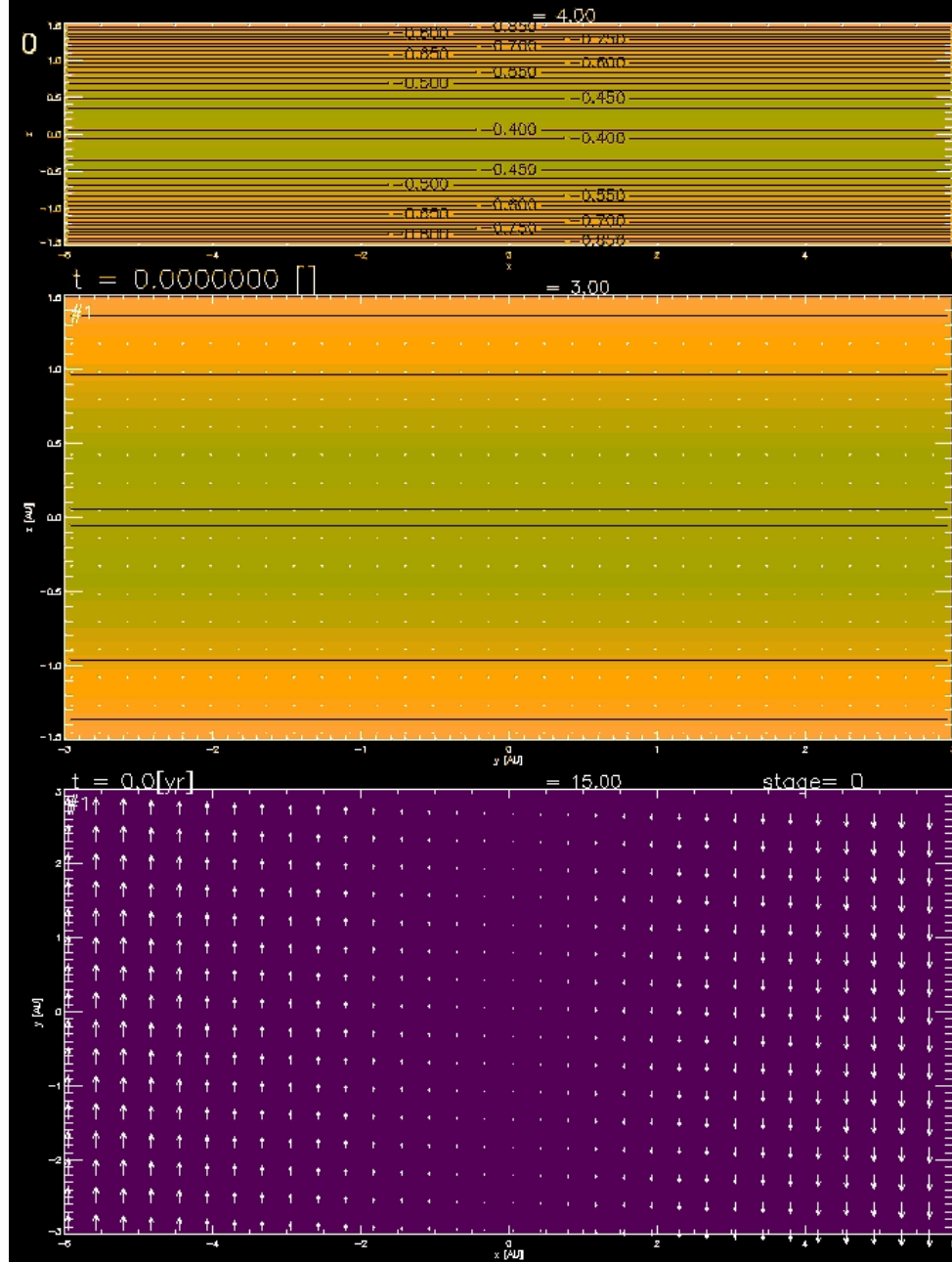
今年の研究: 計算の設定

- 局所計算、惑星の質量固定、鉛直磁場
- Resistivityは面密度の関数: $\eta = \eta(\Sigma)$, 大体scale heightくらいに設定



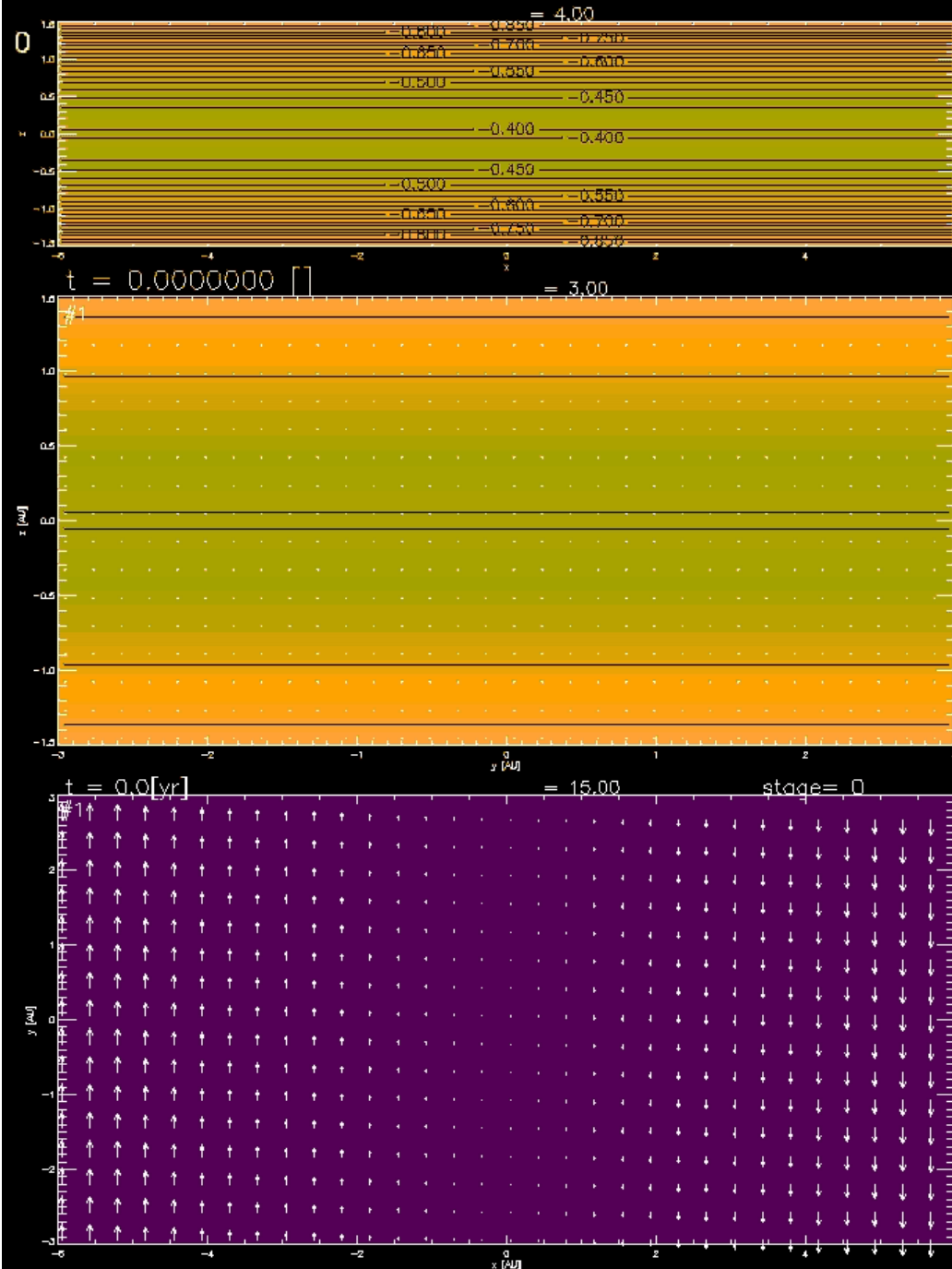
磁場なしモデル

- アニメーションは、切断面の密度
- 上からxz面 (動径方向), yz面(方位角方向), xy面(赤道面)
- 安定にならなかった: たぶん境界条件のせい
- 深いギャップ形成: 初期の面密度の1/100以下(大体1/1000)
- たぶん、ギャップの深さは数値的な粘性によって決まっている



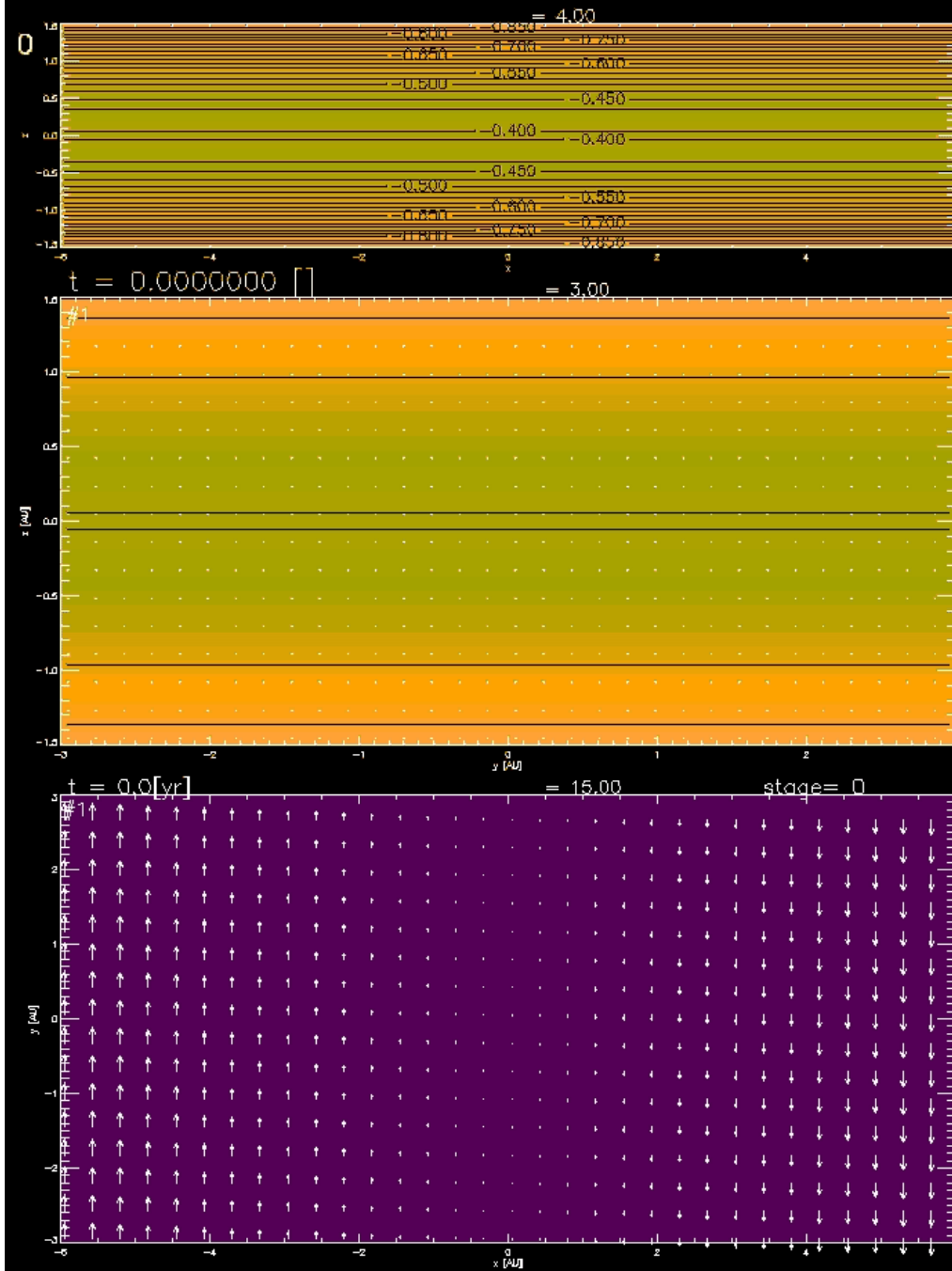
Ideal MHD モデル

- たまに計算が壊れるが、低密度領域なのでdynamicalにはあまり影響を与えない(今後真面目に計算する)
- MRIが発達
- 乱流が強すぎてなんともいえない
- ギャップが埋まった？



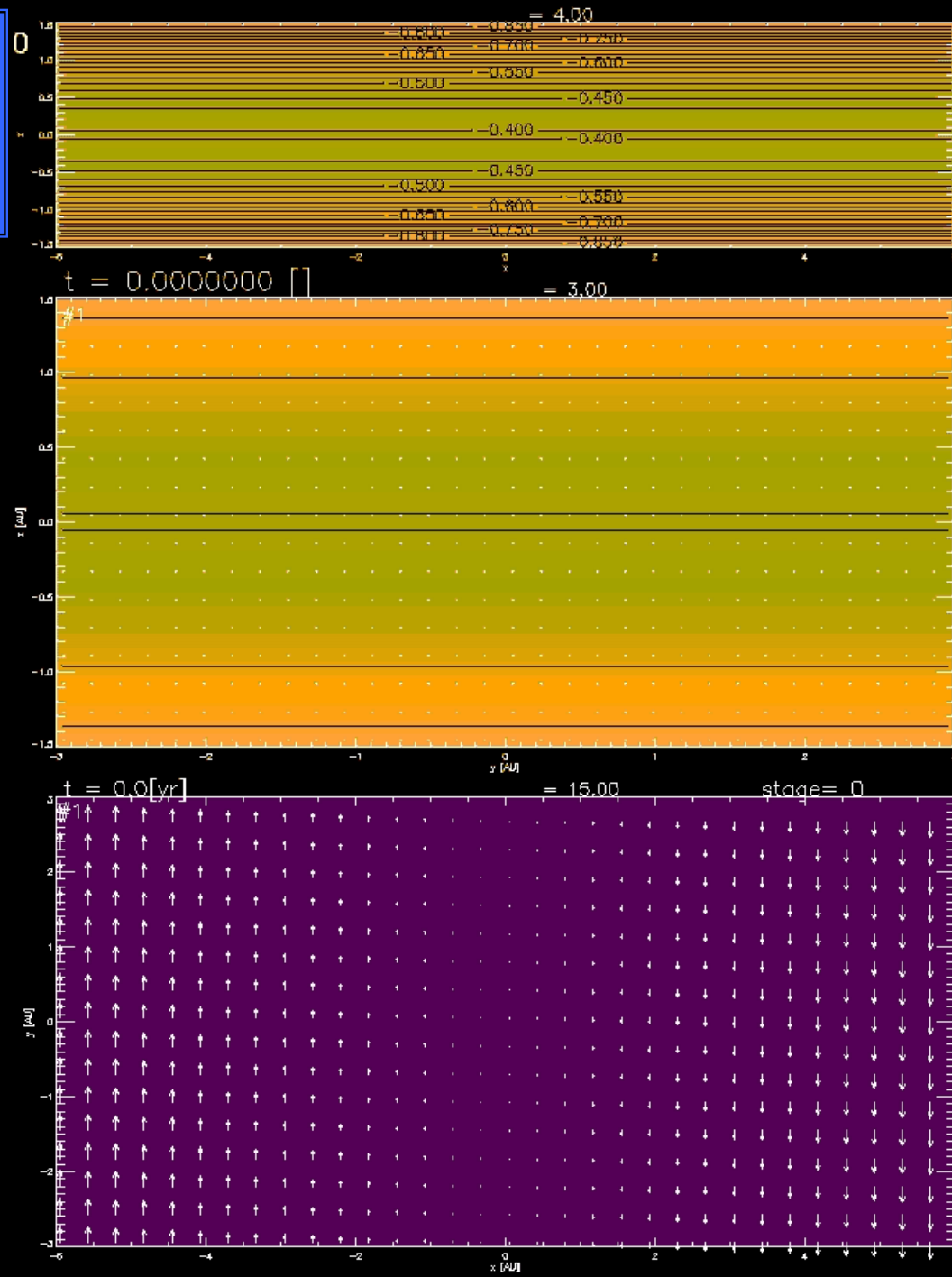
Resistive region が狭いモデル

- Resistive regionがある程度広いモデル(dead zoneが中心面に局在)
- 初期はギャップ形成とギャップが埋まることの繰り返し
- ある程度時間が経過すると定常に
- MRIにより上下の境界からガス流出(磁気乱流駆動風、Suzuki et al.)
- Plasma β が低下し、MRI安定に
- 境界を再考する必要

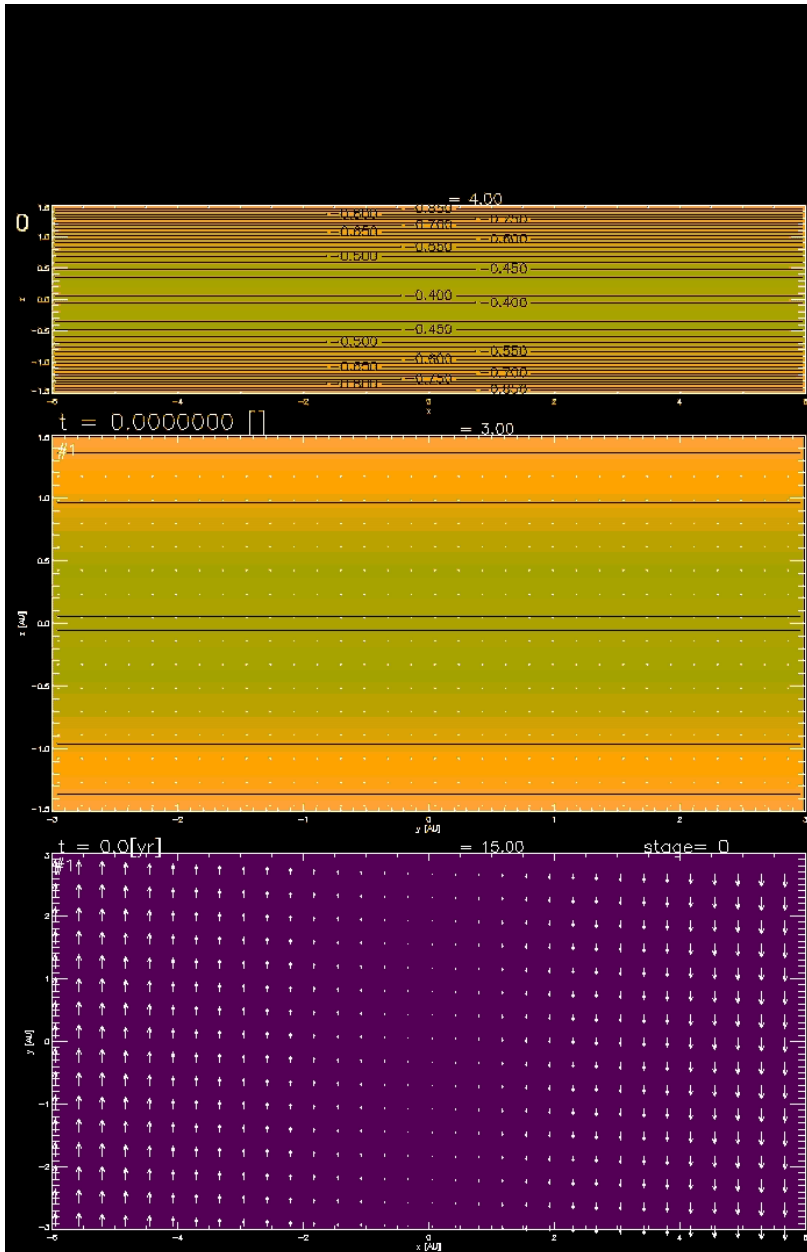


Resistive region がより広いモデル

- そろほどガス流出は起こらなかった
- ある程度の深さの定常ギャップ
(磁場なしの場合の $\sim 1/10$ の面密度)
- 安定になった理由はよく分からない
(奥住さんの発表)

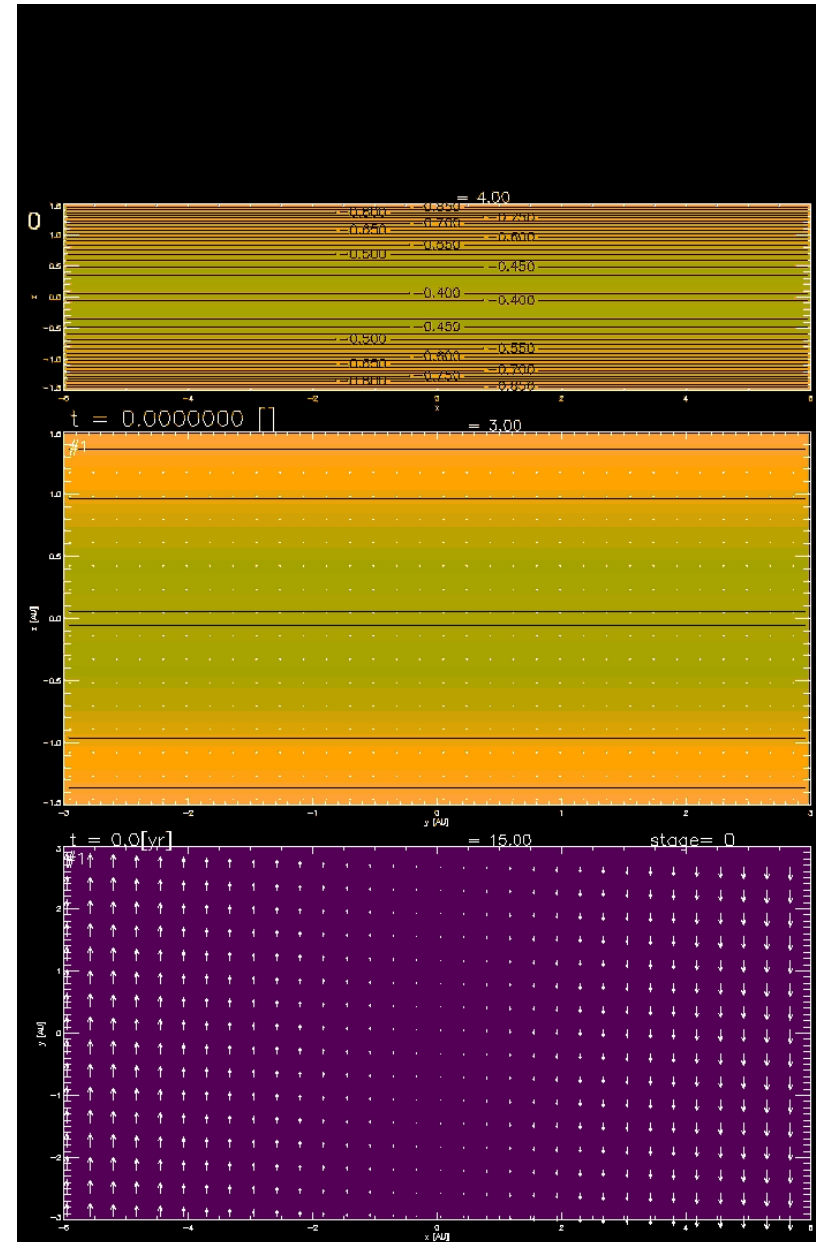


ほぼ全域がDead Zone



安定なギャップ形成

現実的な粘性



まとめ

- 磁場とその散逸を考慮して、ガス惑星が存在する原始惑星系円盤の振る舞いを調べた
- 磁場が無い場合
 - 深いギャップを形成するが、定常には達しなかった(境界のせい?)
- 磁場があり、抵抗が無しの場合
 - MRIにより円盤蒸発(磁気乱流駆動風?、境界のせい?)
 - 円盤蒸発率はかなり激しい、巨大惑星の摂動のため?
 - ある程度蒸発すると、準定常に(low Plasma β , MRI安定)
- 抵抗がある場合
 - 初期にはギャップ形成とギャップ埋没の繰り返し
 - その後、定常になり、磁場なしの1/10程度の深さのギャップ (理由?)
 - 惑星へのガス降着率はどうなるのか? それほど落ちない?
- 今後、奥住抵抗を導入する
- 周惑星円盤に衛星が出来た場合は? (2013年衛星研究会)