

# 回転系における衝撃波近傍での角運動量の 非物理的増加

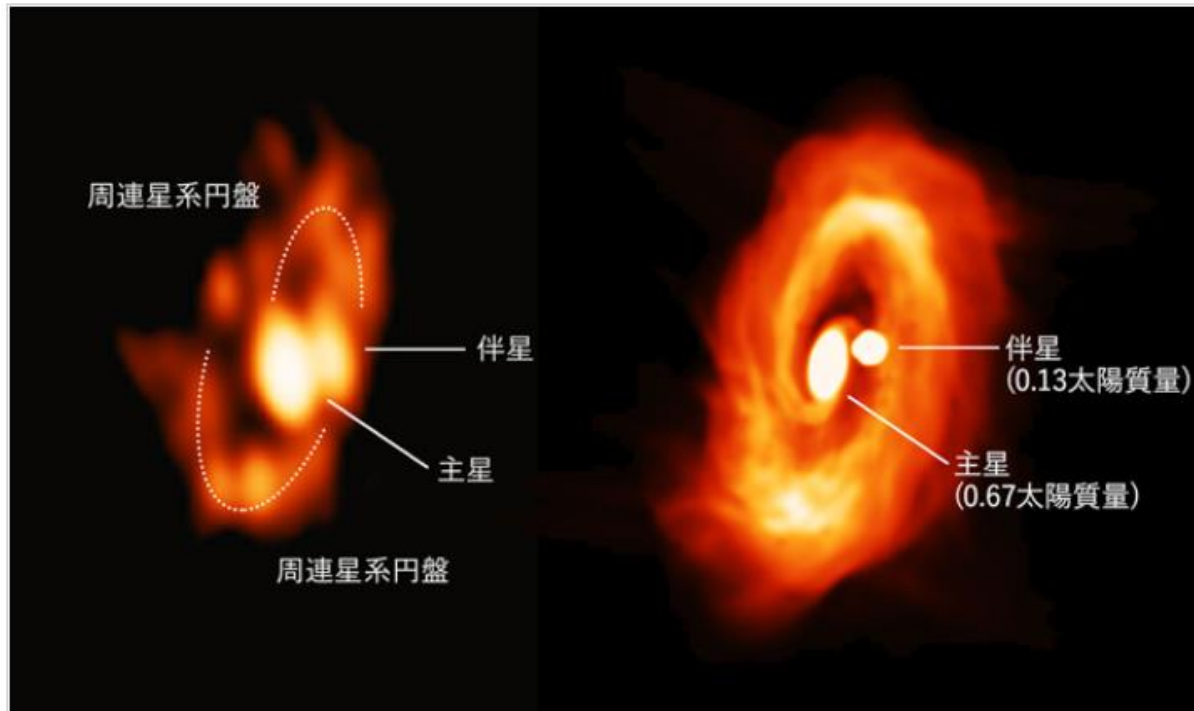


図 アルマ望遠鏡で観測した、L1551 NEを取り囲む円盤(左)とスーパーコンピュータ「アテルイ」を用いて計算した、原始連星の周囲の円盤(右)。

Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/Takakuwa et al.

千葉大学理学部宇宙物理学研究室 修士1年  
宮澤 慶次郎

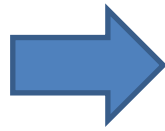
指導教員：花輪 知幸、松本 倫明(法政大学)

# アウトライン

- 研究背景(角運動量増加の発見まで)
- 研究内容(角運動量増加の原因追究)
- シミュレーションモデル
- 基礎方程式(等温、磁場なし、自己重力なし)
- Nested grid について
- シミュレーション結果
- まとめ

# 研究背景①(当初の目的①)

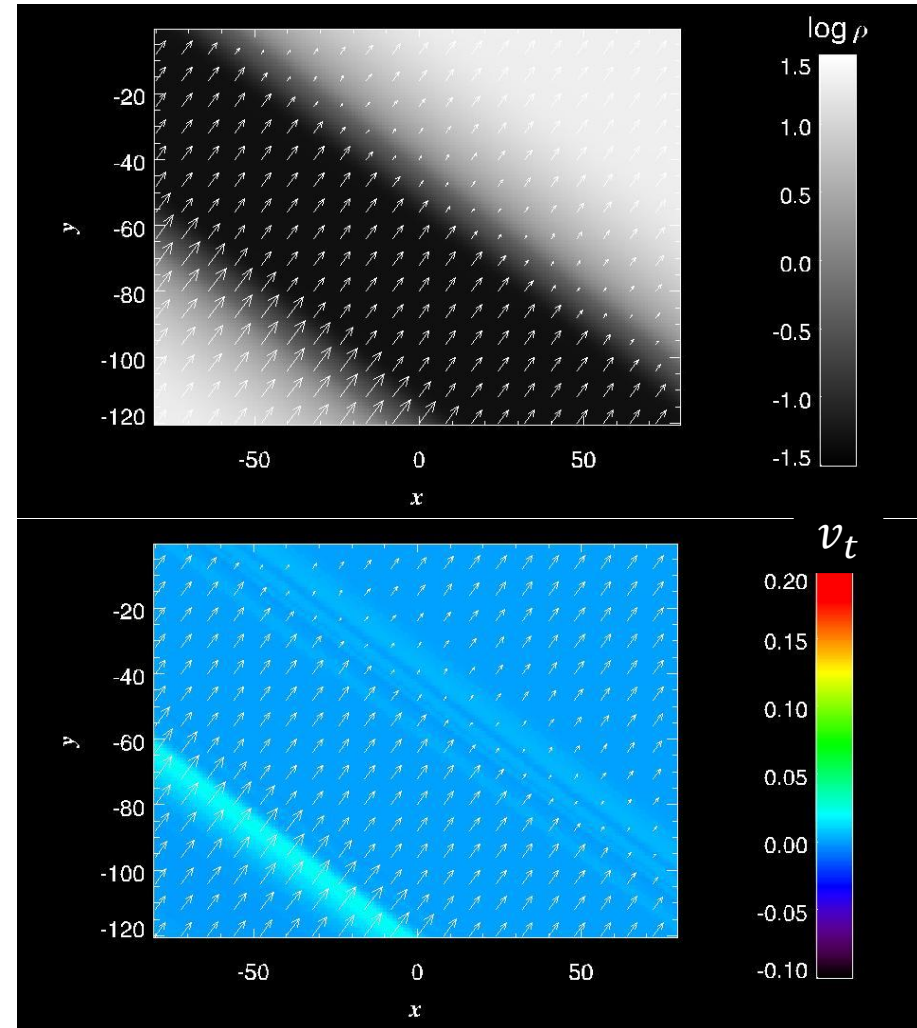
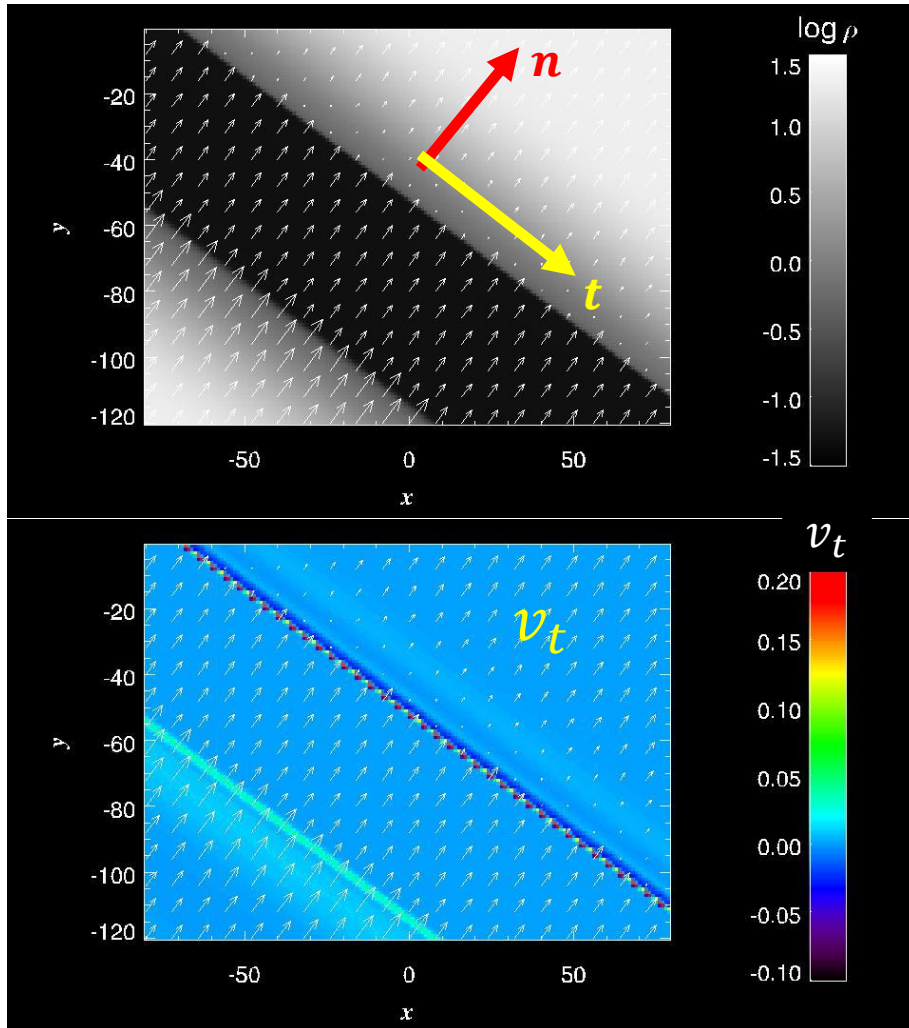
グリッド面に対し傾いた衝撃波面



物理型粘性により $v_t$ を抑制(Hanawa 2015)

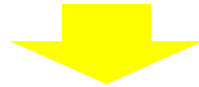
粘性なし

粘性あり



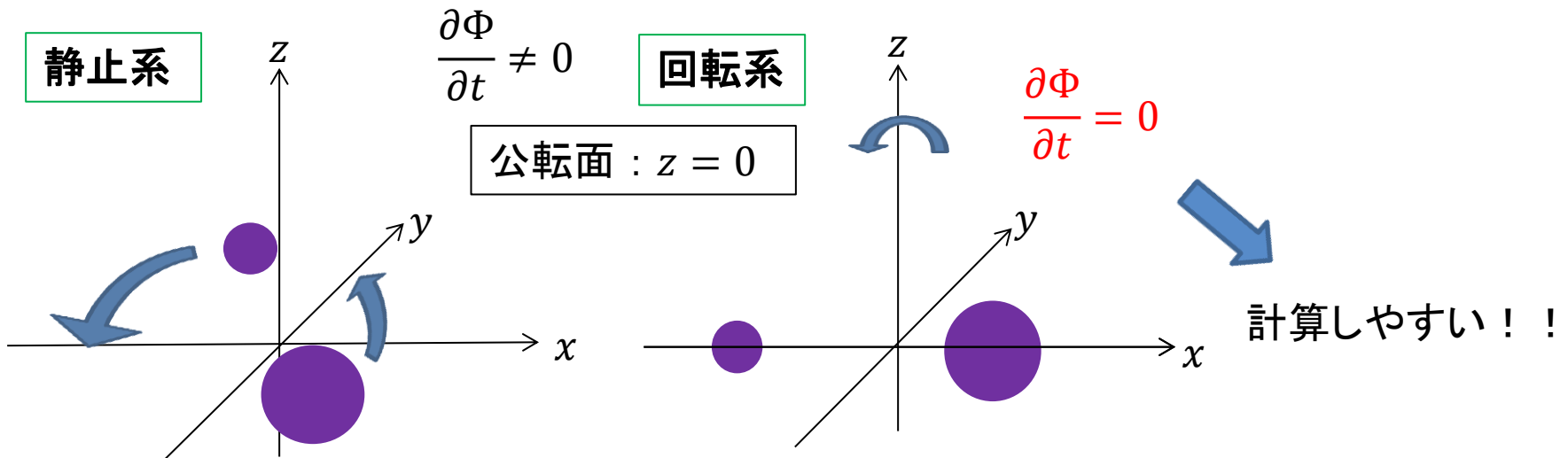
# 研究背景②(当初の目的②)

原始連星系の周囲ガス円盤降着  
シミュレーションコードSFUMATOに物理型粘性を加える



衝撃波や角運動量輸送がどのように変わるのかを調べる。

回転系で計算



# 研究背景③

粘性を加える前に精度  
チェック

回  
転  
系

慣  
性  
系

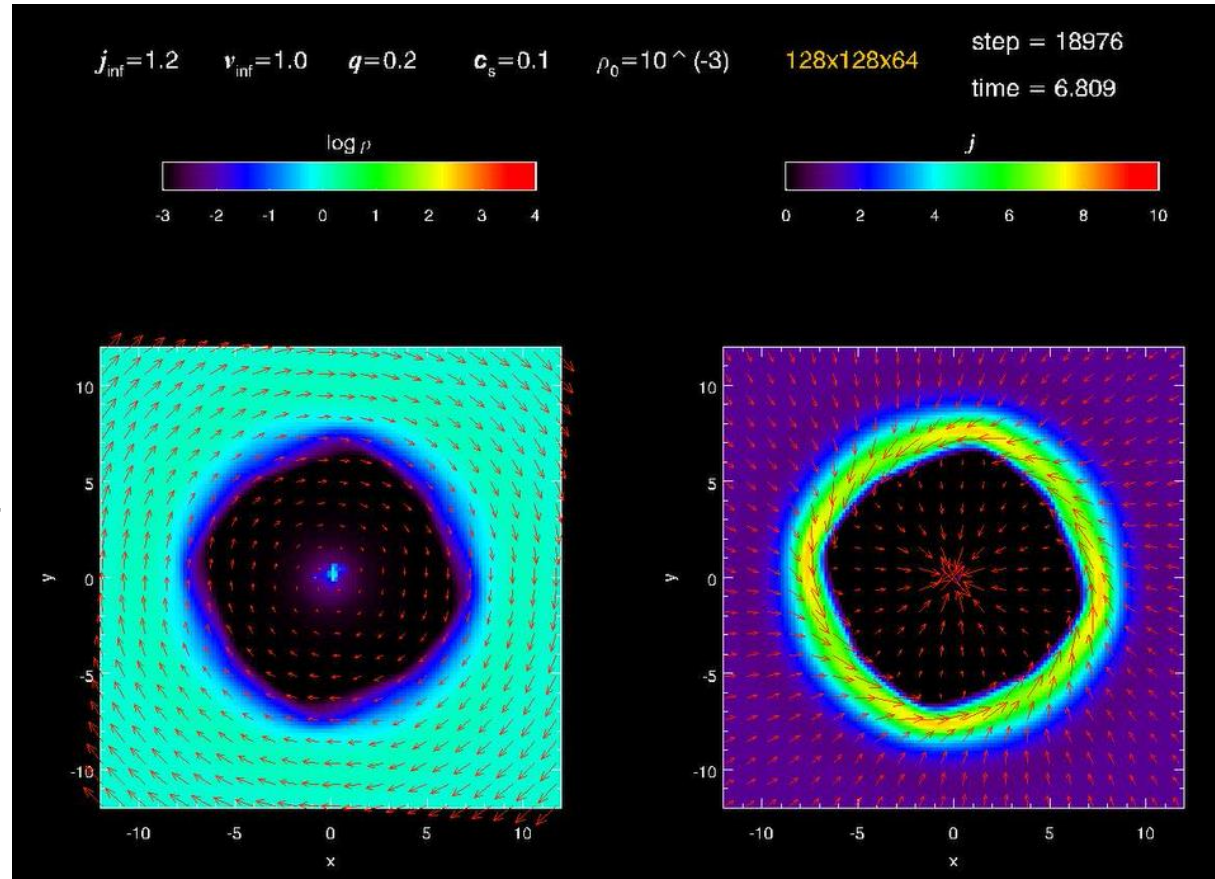


回転系で計算

慣性系で解析

角運動量の異常な  
増加を確認

$$\frac{\partial \mathbf{j}}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial t} \times \mathbf{v} + \mathbf{r} \times \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t}$$
$$= 0$$



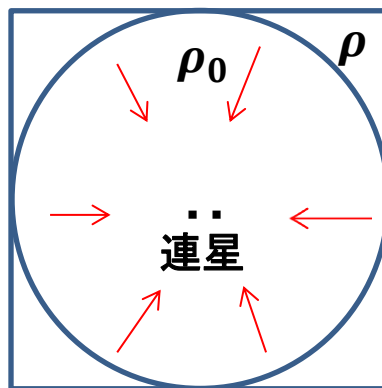
原因は何か、また、抑える方法はないか

# 研究内容

## 不自然な角運動量増加の

1. 解像度依存性
2. 初期密度依存性

a) 初期密度比依存性



注入するガス密度 :  $\rho$

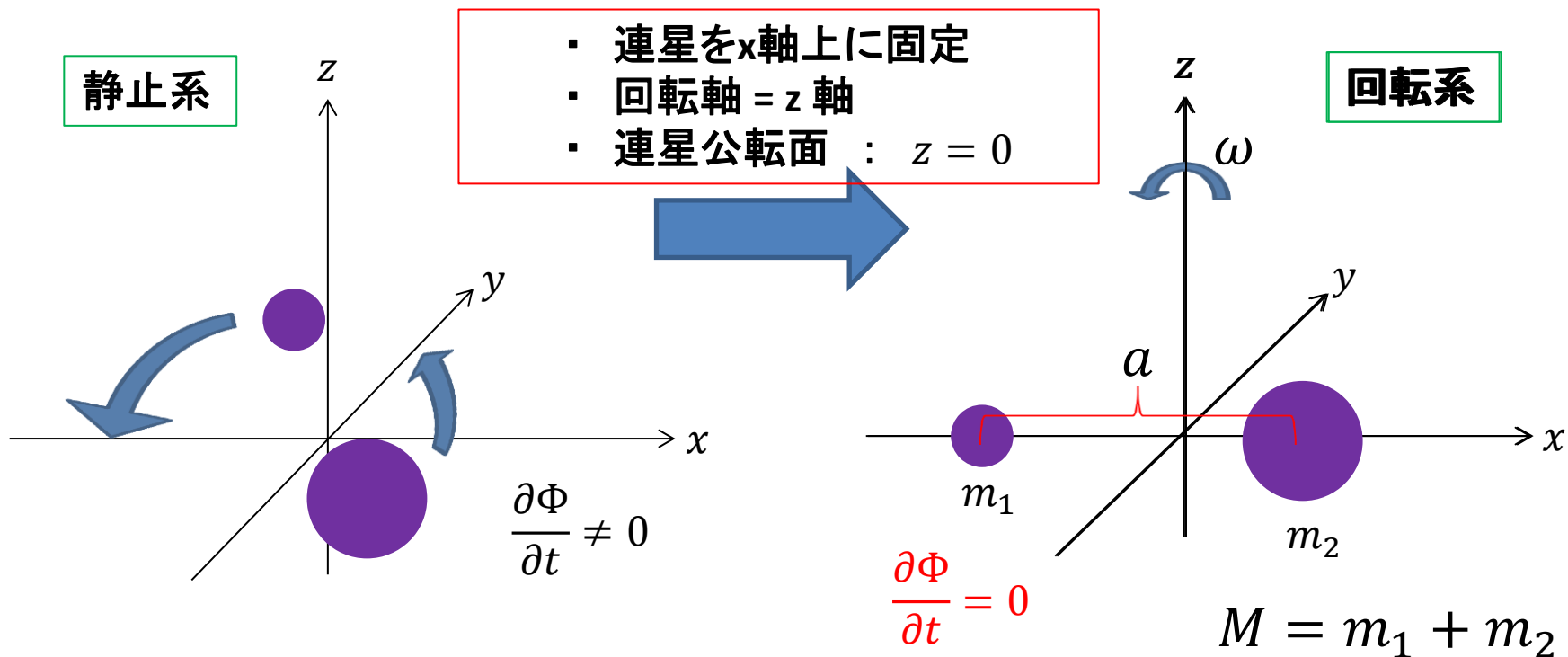
連星周囲のガス密度 :  $\rho_0$

初期密度比 :  $\frac{\rho}{\rho_0}$

b) 連続的な密度分布

3. 別コード(2次元)での検証

# シミュレーションモデル



$$MG = 1, \omega = 1, a = 1$$

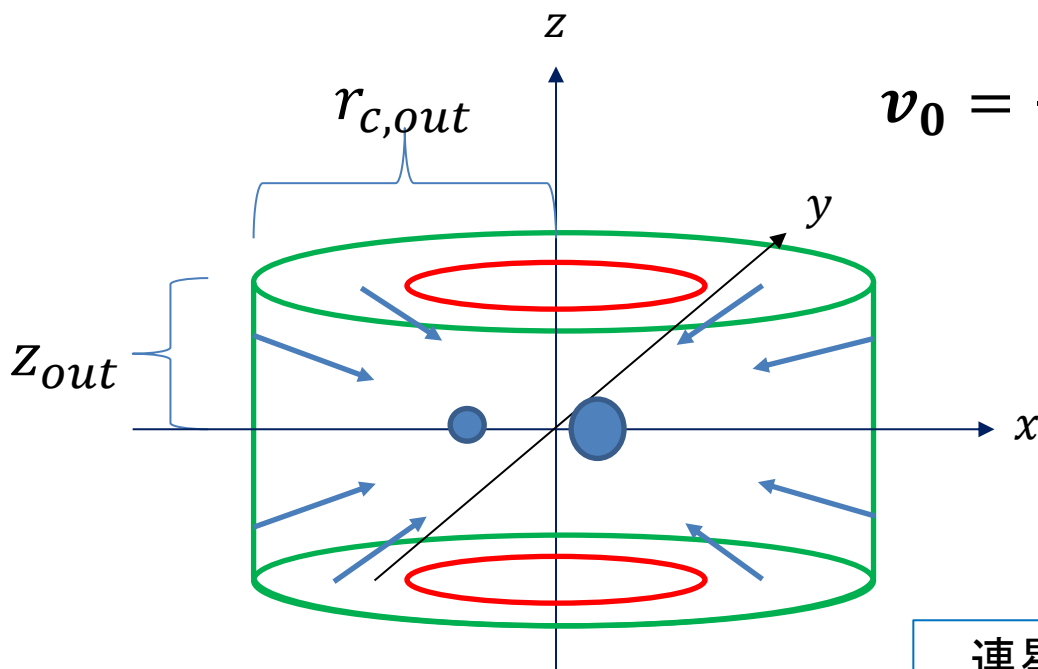
注入するガス密度は **1** で固定

# ガスの注入方法

円柱表面(側面・底面)からガスを降らせる。

$$v_{inf} = \sqrt{\frac{2GM}{r} - \frac{j_{inf}^2}{r_c^2}}$$

$$\mathbf{v}_0 = -\frac{v_{inf}}{r} \mathbf{r} + \frac{j_{inf}}{r_c^3} (\mathbf{e}_z \times \mathbf{r}) \quad (\text{慣性系})$$



$$j_{inf} = 1.2 \quad (\text{慣性系})$$

$$r_{c,out} = 12$$

$$z_{out} = 6$$

連星重心=座標原点

遠心力 > 重力の公転面方向の成分



ガス落下なし



# 基礎方程式

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} = S$$

$$U = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho v_x \\ \rho v_y \\ \rho v_z \end{pmatrix} \quad F_x = \begin{pmatrix} \rho v_x \\ \rho c_s^2 + \rho v_x^2 \\ \rho v_x v_y \\ \rho v_x v_z \end{pmatrix} \quad F_y = \begin{pmatrix} \rho v_y \\ \rho v_x v_y \\ \rho c_s^2 + \rho v_y^2 \\ \rho v_y v_z \end{pmatrix} \quad F_z = \begin{pmatrix} \rho v_z \\ \rho v_x v_z \\ \rho v_y v_z \\ \rho c_s^2 + \rho v_z^2 \end{pmatrix} \quad S = \begin{pmatrix} 0 \\ S_x \\ S_y \\ S_z \end{pmatrix}$$

$$S_x = \rho(x\omega^2 + 2\omega v_y + g_x)$$

遠心力

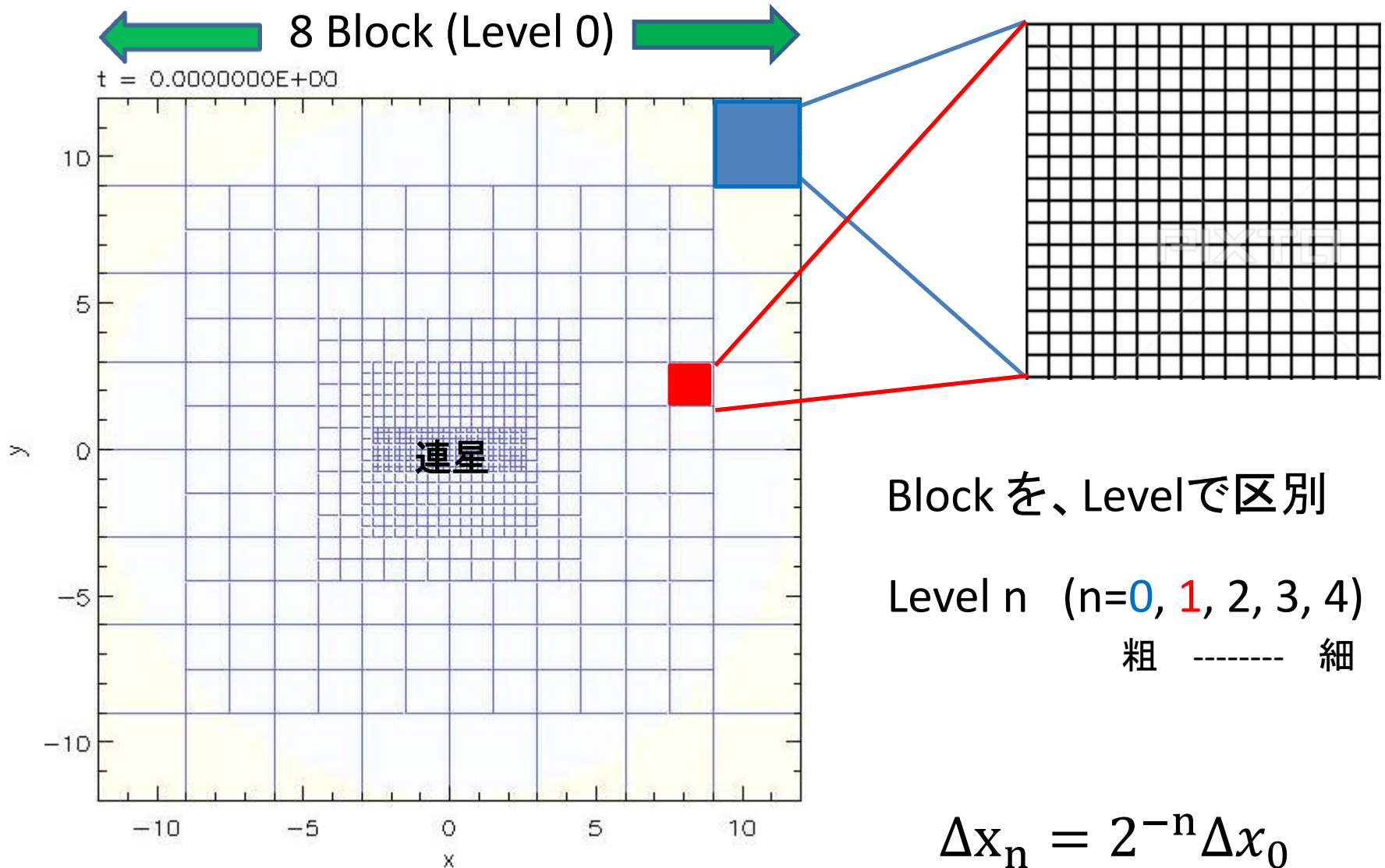
コリオリ力

$$S_y = \rho(y\omega^2 - 2\omega v_x + g_y)$$

$$S_z = \rho g_z$$

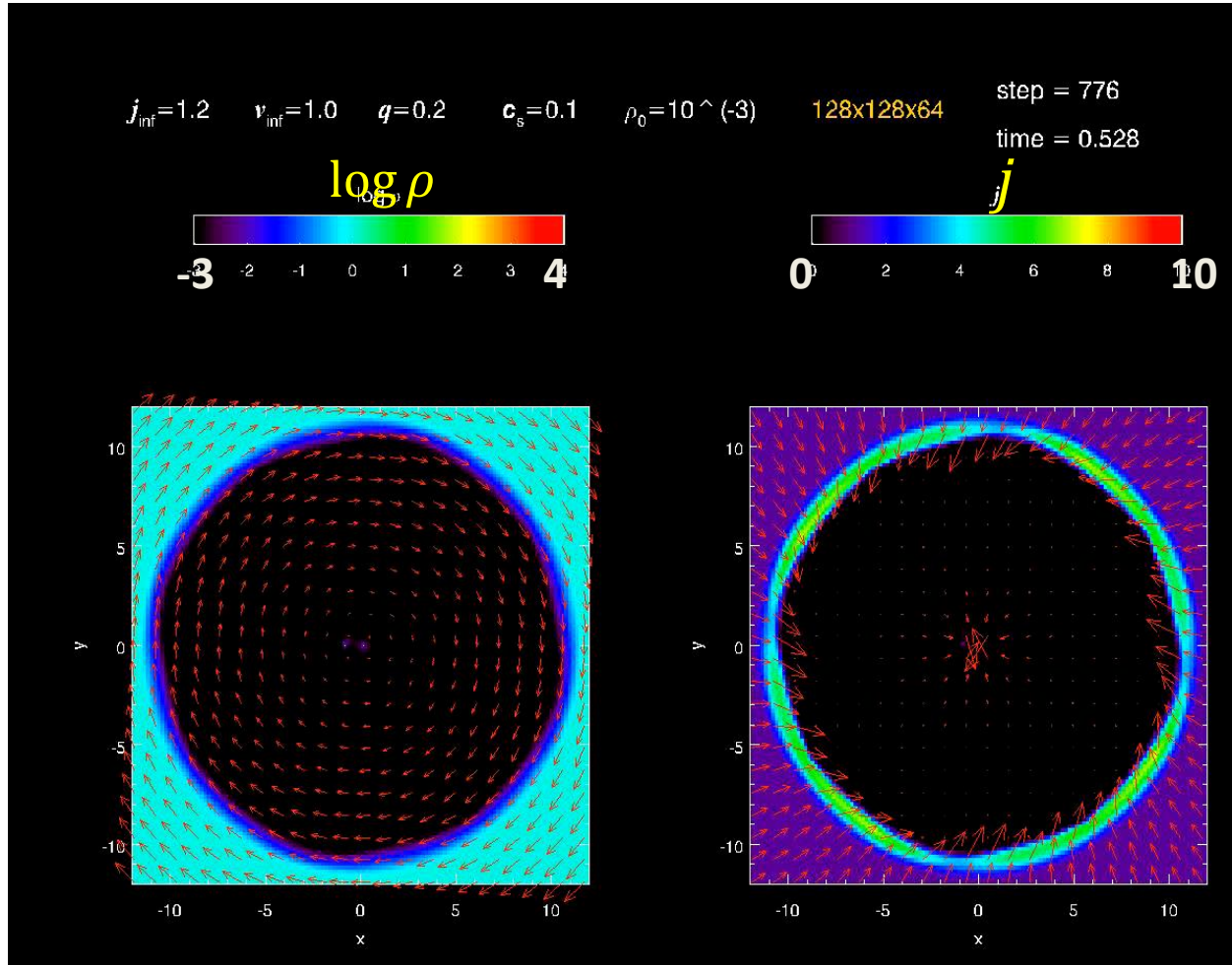
※今回は磁場なし・等温を仮定している

# nested grid



# シミュレーション結果①

## (密度分布と比角運動量の相関)



密度差が大きいところで角運動量が不自然に増加

# シミュレーション結果②

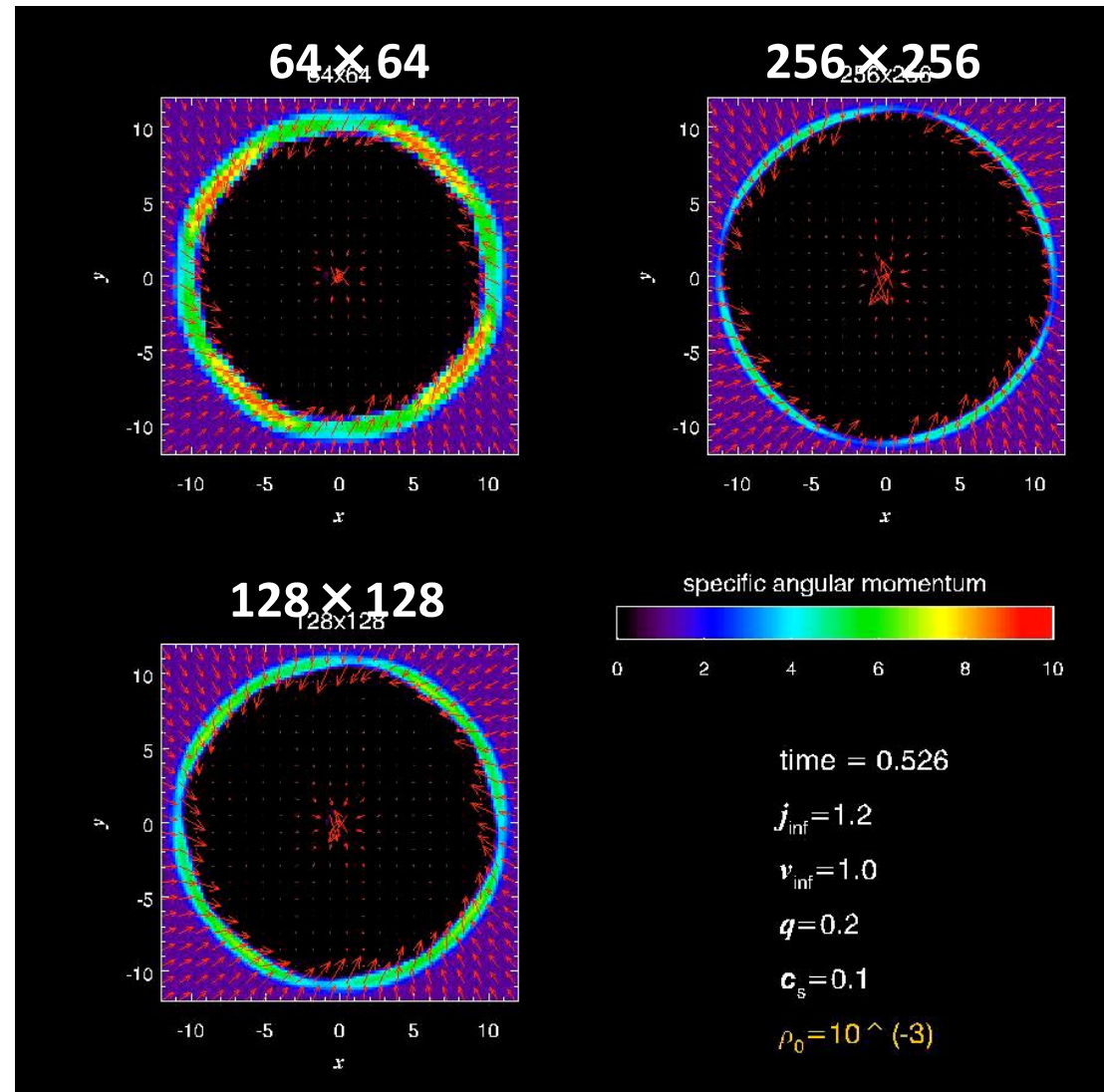
## (比角運動量の解像度依存性)

64 x 64 では、密度、角運動量に  
手裏剣型の構造  
(128 x 128 にも……)



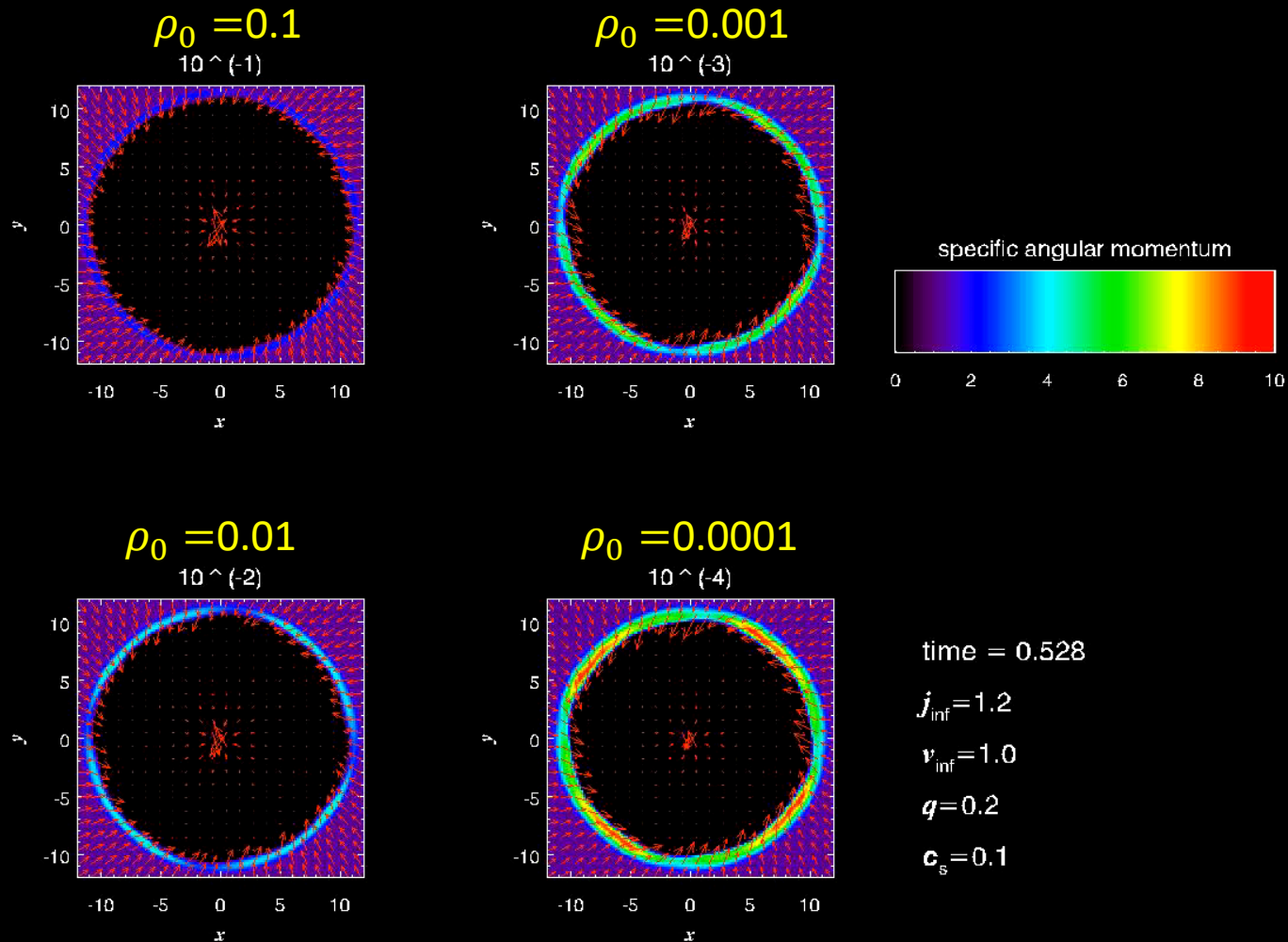
低解像度すぎる？

これ以上解像度を上げて、比  
角運動量の不自然増加は起こり  
そう……



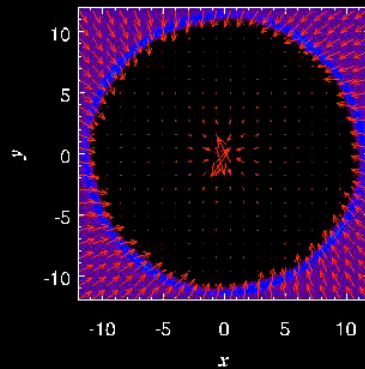
# シミュレーション結果③

## (比角運動量の初期密度依存性)

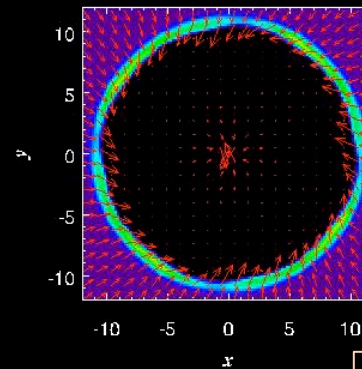


# シミュレーション結果④ (連続的な初期密度分布)

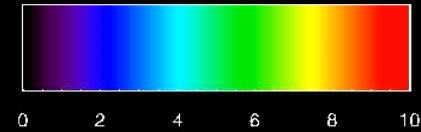
不連続  $\rho_0 = 0.1$



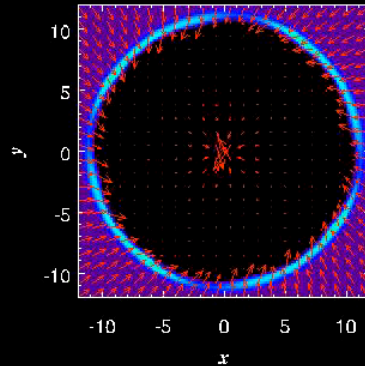
$\rho_0 = 0.001$



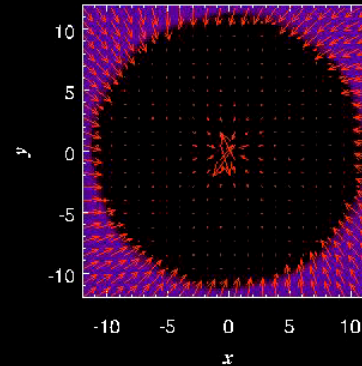
specific angular momentum



$\rho_0 = 0.01$



連続



$$\rho_0 = 10^{\frac{\max(r_c - 6, 0)}{2} - 3}$$

time = 0.528

$j_{\text{inf}} = 1.2$

$v_{\text{inf}} = 1.0$

$q = 0.2$

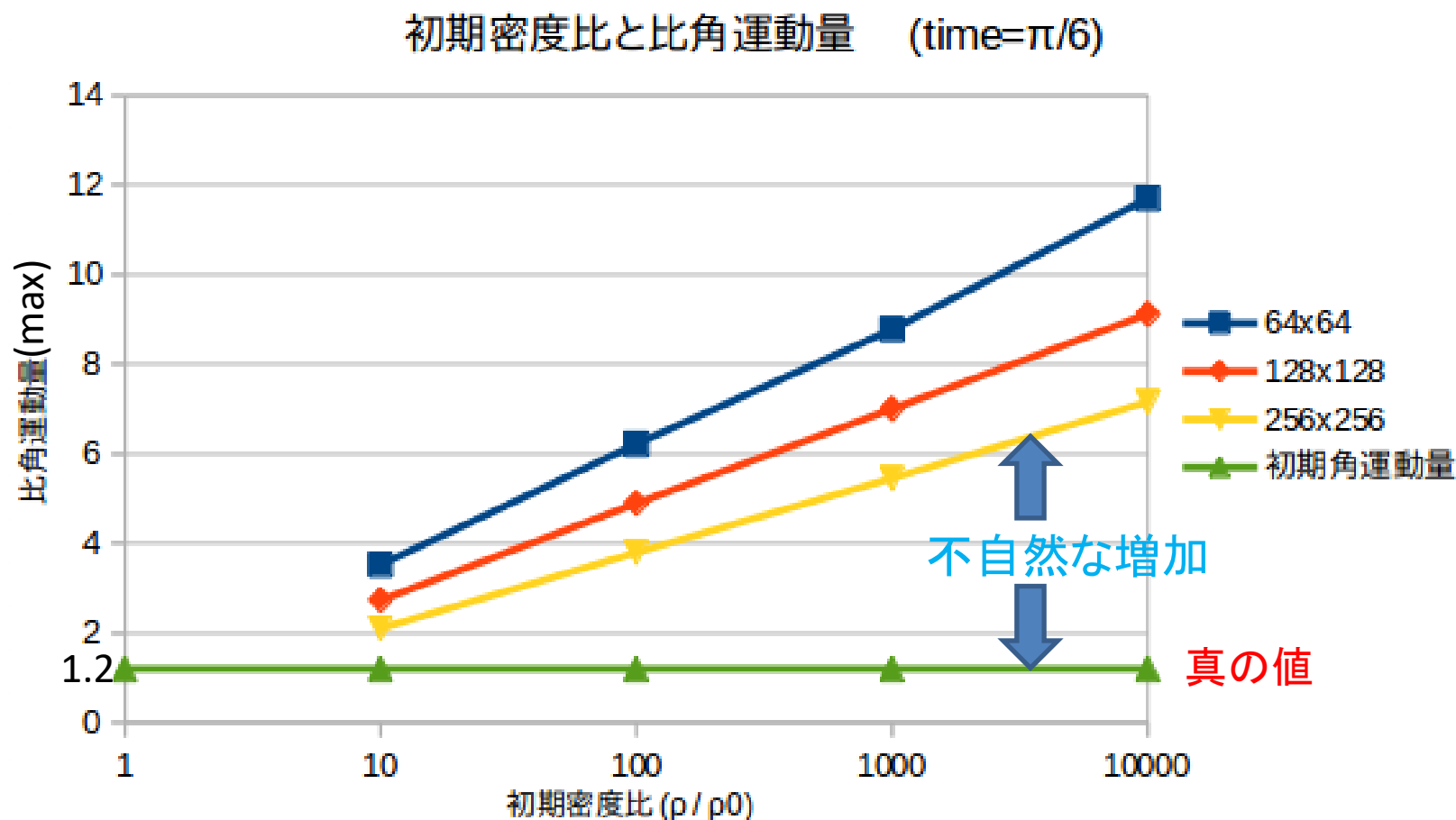
$c_s = 0.1$

初期のリングが  
消失



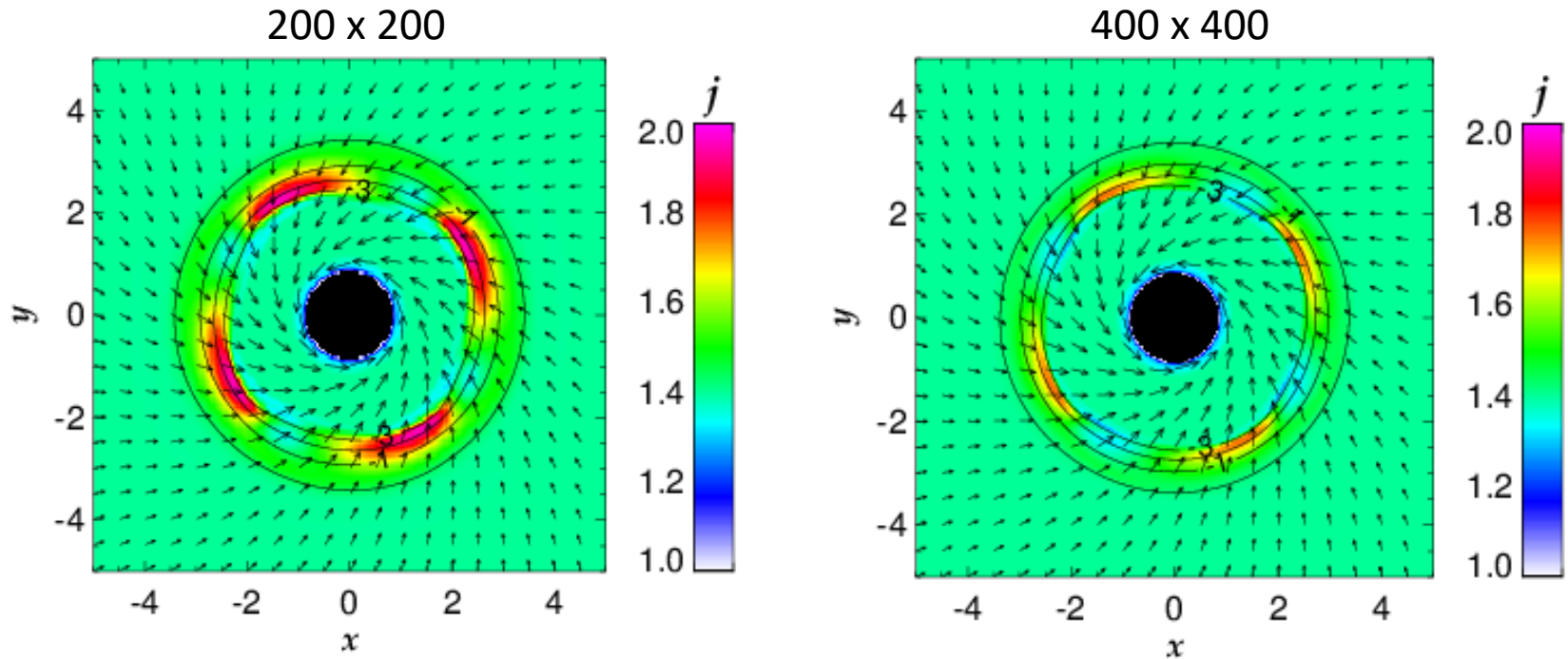
その後、徐々に  
増加

# 初期密度比と比角運動量の相関





# SFUMATOに特有の現象ではない



$$\rho_0 = \frac{1}{2} (\tanh(50(r_c - 4)) + 1.0001)$$

Uniform grid でも角運動量が不自然に増加！



# まとめ

- 解像度を上げると比角運動量の不自然な増加は抑えられるが、完全に消すことは出来なさそう
- 連続的な初期密度分布にすると初期の不自然な増加は極端に減る
- 初期密度比と比角運動量には強い相関がある
- この問題はSFUMATOに特有のものではなく、回転系で衝撃波がある場合の計算で起こる

# Shock

