

矮小銀河風における銀河の 形状依存性

筑波大学大学院 数理物質科学研究科 物理学専攻

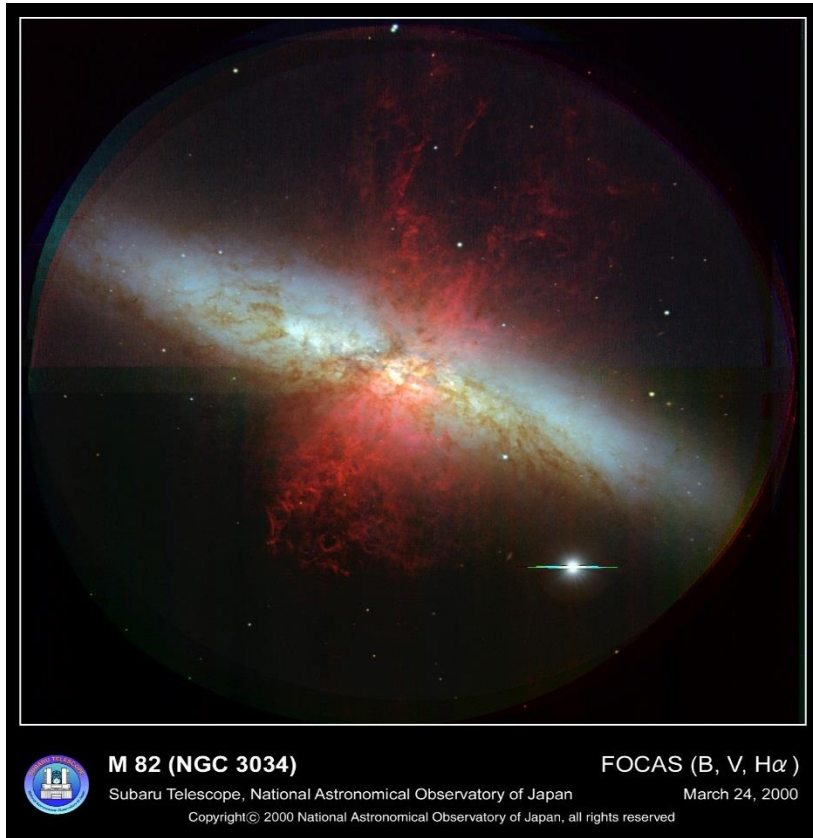
M2 村田貴紀

指導教員 森正夫先生

Abstract

- ・本発表では、銀河の形状の違いによるガス放出の割合について調べることを目的としている
- ・現在はリーマン近似解法の一つであるHLLC 法を用いてコードの開発を行い、二次元軸対称の数値流体シミュレーションを行っている
- ・HLLC 法で実装したシミュレーションコードテスト、そして、簡単な銀河風のシミュレーション結果、現在の研究状況について報告する

1.はじめに



M82における銀河風の放出 :すばる望遠鏡HP
赤色 : H α 輝線で観測された銀河風

銀河風

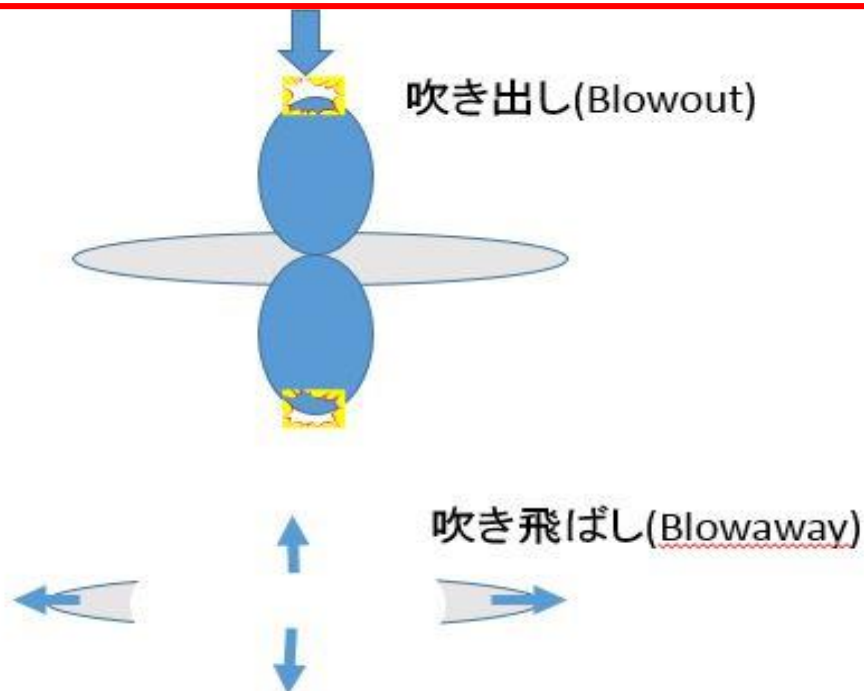
- ・メタルリッチなガスを銀河円盤からハローを通して効果的に銀河間媒質(IGM)に運ぶことができると考えられる
- ・分子ガスが吹き飛ばされてしまうと星生成活動は止まる
- ・銀河風のエネルギーが銀河の重力エネルギーに勝つことで銀河外に流出
- ・銀河の形成進化に影響を与えていると考えられる



スターバースト発生



O,B星など寿命の短い星における
超新星爆発により星間媒質(ISM)に衝撃波伝播



- ・衝撃波が重なり合いスーパーバブル生成
銀河の重力ポテンシャルに打ち勝つことにより吹き出し(Blowout)
- ・銀河形状により質量放出率変化
- ・銀河形状と銀河風放出の依存性に関してはあまり詳細に解析されていない(Ferrara & Tolstoy 2000, Recchi & Hensler 2013)

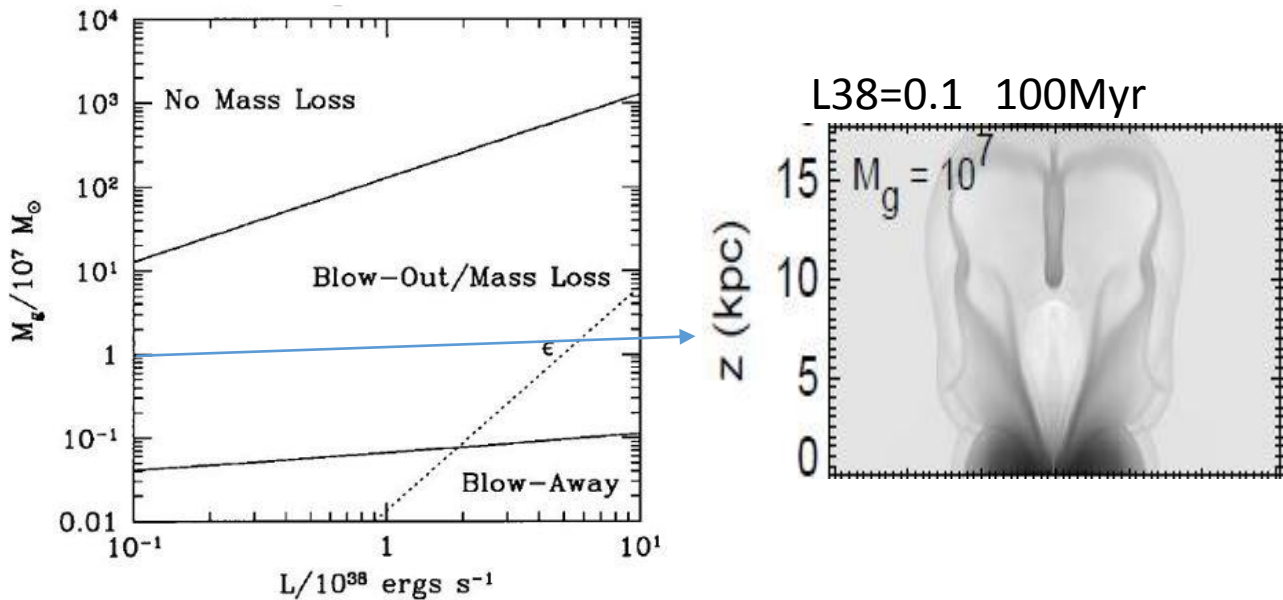
ISM中に衝撃波が伝播し、銀河外に放出することで
銀河内の物質が吹き飛ばす(Blowaway)

数値流体シミュレーションで銀河形状を考慮した質量放出率を計算

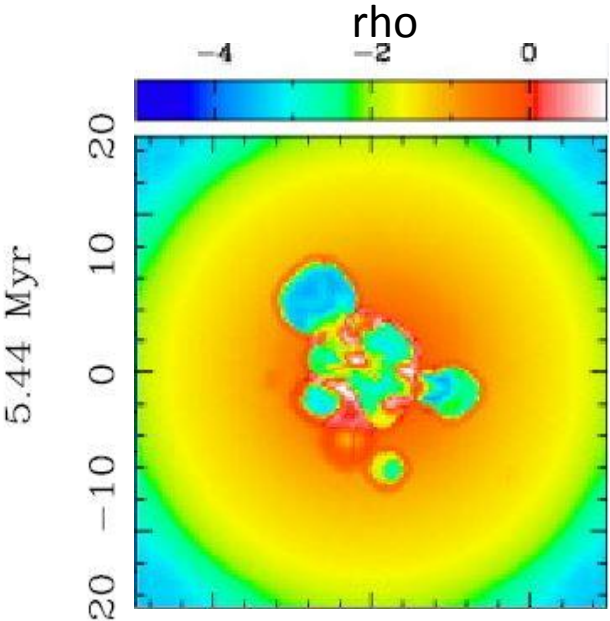
先行研究

MacLow & Ferrara 1999 → **Disk like**

銀河風の質量放出条件は？



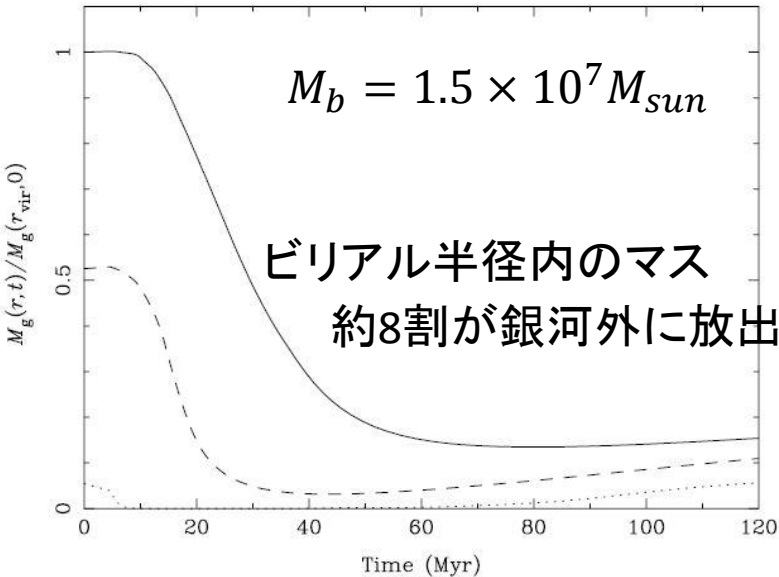
Mori et al 2002 → **Elliptical like**



質量放出率は？

TABLE 2
MASS EJECTION EFFICIENCY ξ

VISIBLE MASS (M_g/M_\odot)	LUMINOSITY ($10^{38} \text{ ergs s}^{-1}$)		
	0.1	1.0	10
10^6	0.18	1.0	1.0
10^7	$3.5\text{E}-3$	$8.4\text{E}-3$	$4.8\text{E}-2$
10^8	$1.1\text{E}-4$	$3.4\text{E}-4$	$1.3\text{E}-3$
10^9	0.0	$7.6\text{E}-6$	$1.9\text{E}-5$



扁平度の高い銀河



Disk like



- ・銀河風はそのまま軸方向へ抜ける
- ・質量放出率が小さくなる

扁平度の低い銀河



Elliptical like



- ・銀河風が球形に近い形で放出する
- ・質量放出率が大きくなる



実際に扁平度をパラメータに取り質量放出率を調べる

2.数値流体計算

2-1 基礎方程式

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial r} + \frac{\partial G}{\partial z} = S$$

ρ : 密度、 p : 圧力、 v_r, z, ϕ : 各方向の速度
 E : 単位質量あたりの全エネルギー
 ϕ : 重力ポテンシャル

$$U = (\rho, \rho v_r, \rho v_z, \rho E)^T$$

$\rho \dot{S}_N$: 超新星爆発による質量放出
 $\epsilon \dot{S}_N$: エネルギー放出

$$F = (\rho v_r, \rho v_r^2 + p, \rho v_r v_z, \rho v_r (E + p/\rho))^T \quad \Lambda : \text{冷却率}$$

$$G = (\rho v_z, \rho v_r v_z + p, \rho v_z^2 + p, \rho v_z (E + p/\rho))^T = 0$$

$$S = (-\rho v_r/r + \rho \dot{S}_N, -\rho \frac{\partial \phi}{\partial r} + \rho v_\phi^2/r + p/r, -\rho \frac{\partial \phi}{\partial z}, \rho v_\phi^2 v_r - \frac{\partial \phi}{\partial r} \rho v_r - \frac{\partial \phi}{\partial z} \rho v_z + \epsilon \dot{S}_N - \Lambda)^T = 0$$

ソース項 S 、 z 方向流束ベクトル G を無視($=0$) 一次元デカルト座標を考える

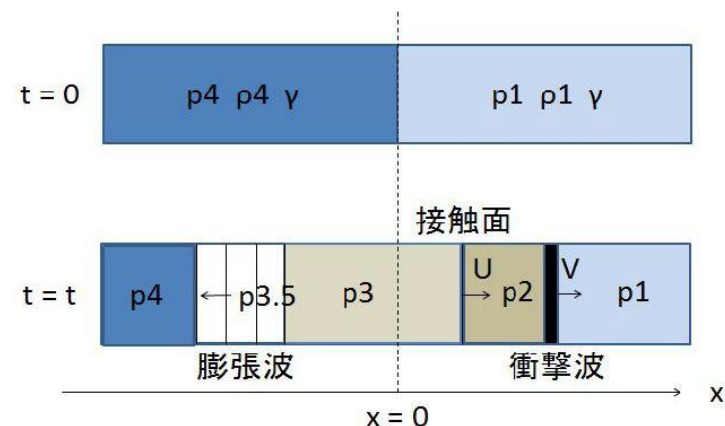
2-2 HLLC法(Toro et al 1994)

・リーマン問題とは **衝撃波管問題**

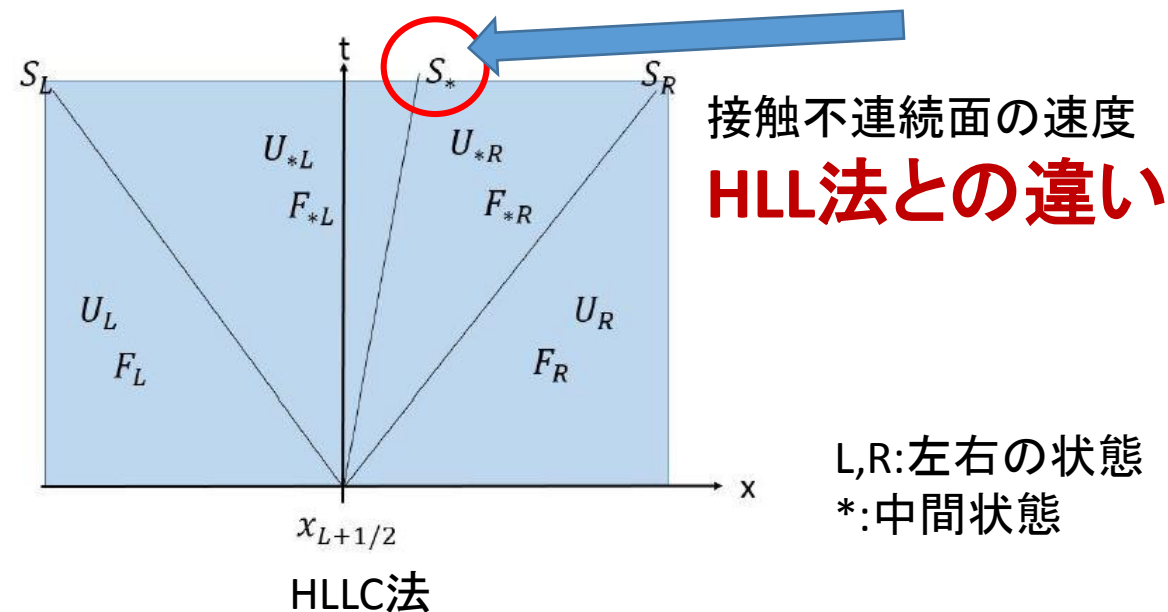
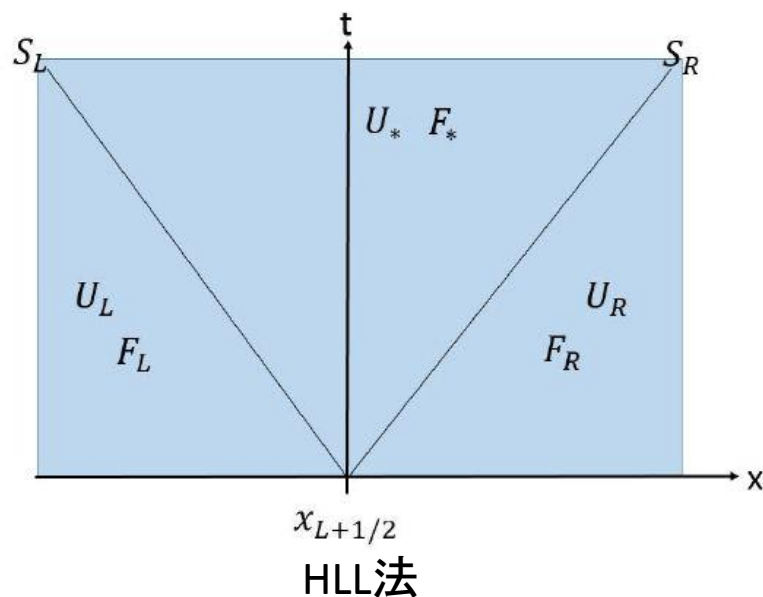
・リーマンソルバーとは
各メッシュでリーマン問題の解を利用する

→ 厳密 Godonov法 ← 計算コスト大

→ 近似的 **HLL法、HLLC法、Roe法** ← 主流



リーマン問題(衝撃波管問題)



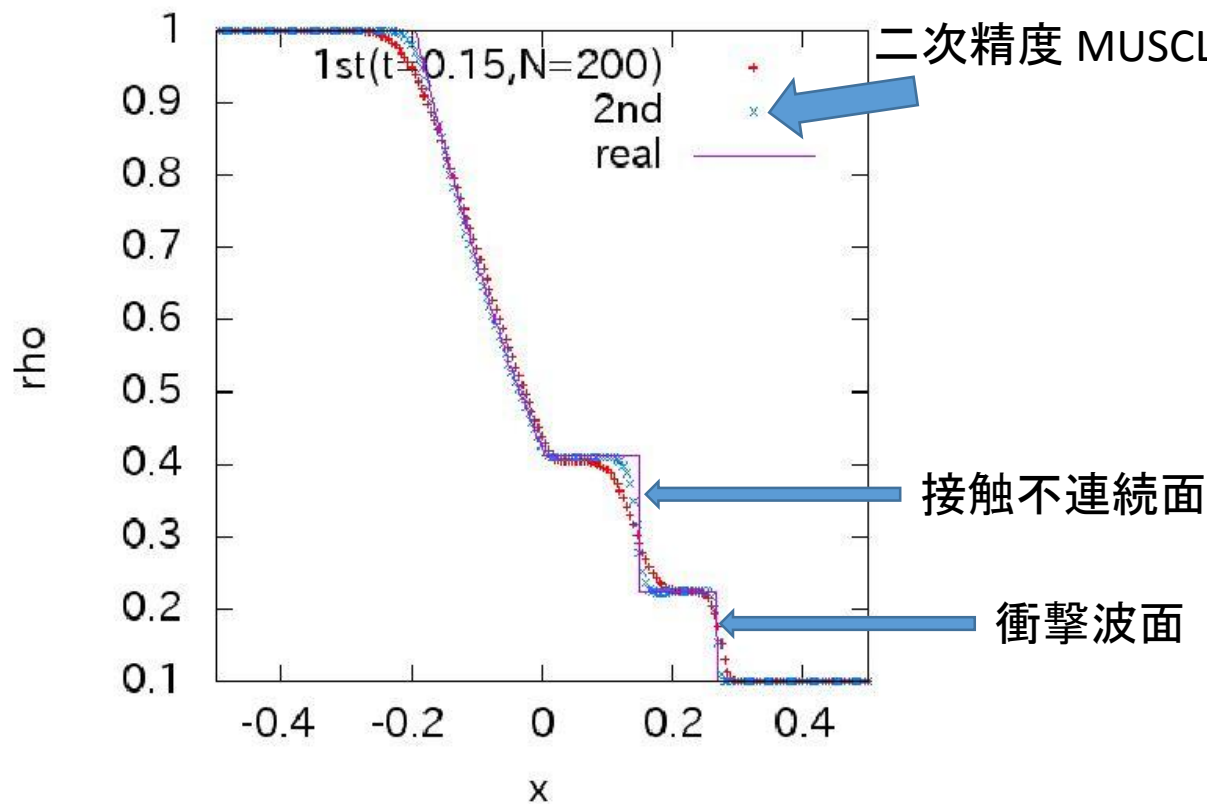
3.テスト問題

・衝撃波管問題

初期条件

① $p_1 = 0.05, \rho_1 = 0.1, v_1 = 0, p_4 = 1.0, \rho_4 = 1.0, v_4 = 0$

② $p_1 = 0.01, \rho_1 = 1.0, v_1 = -19.59745, p_4 = 1000.0, \rho_4 = 1.0, v_4 = -19.59745$



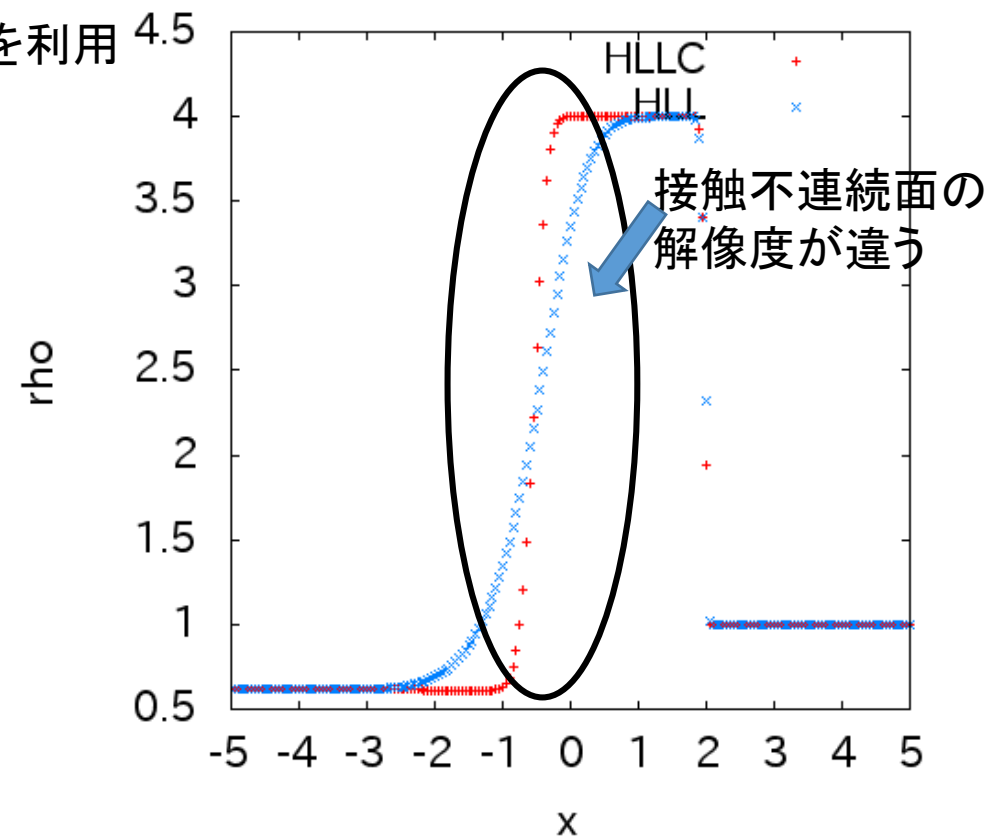
初期条件①

一次元衝撃波管問題密度分布

赤: 1次精度

青: 二次精度

直線: 厳密解



初期条件②

一次元強い衝撃波の問題

一次精度、HLL法、HLLC法密度比較

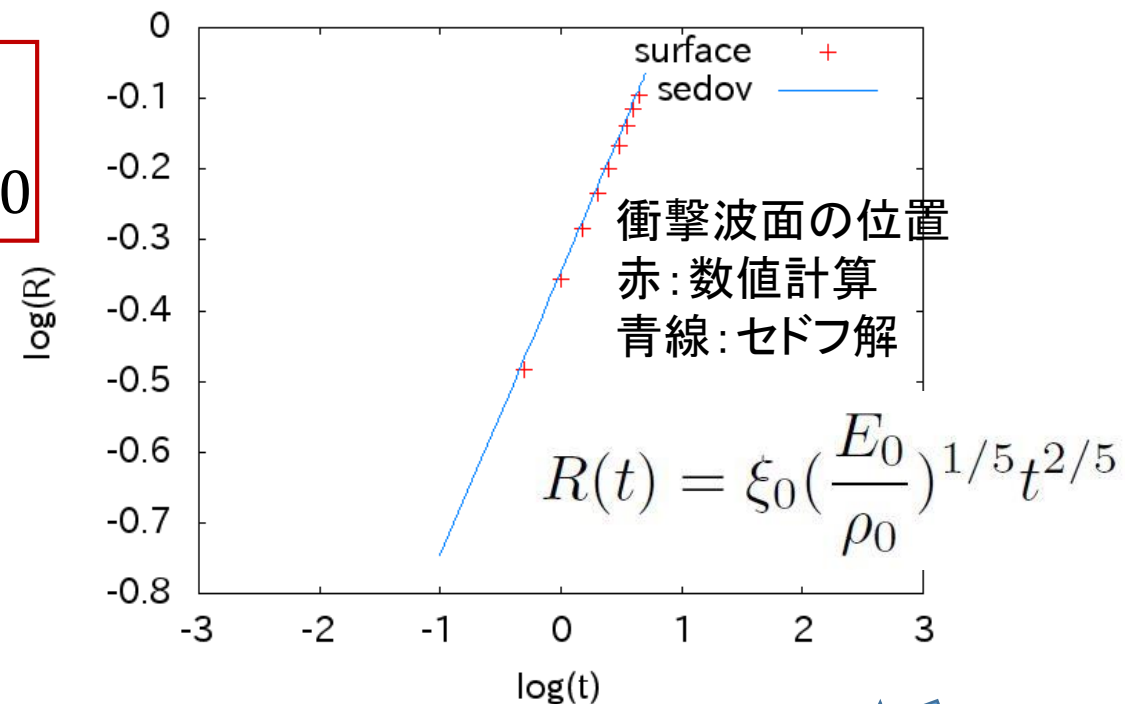
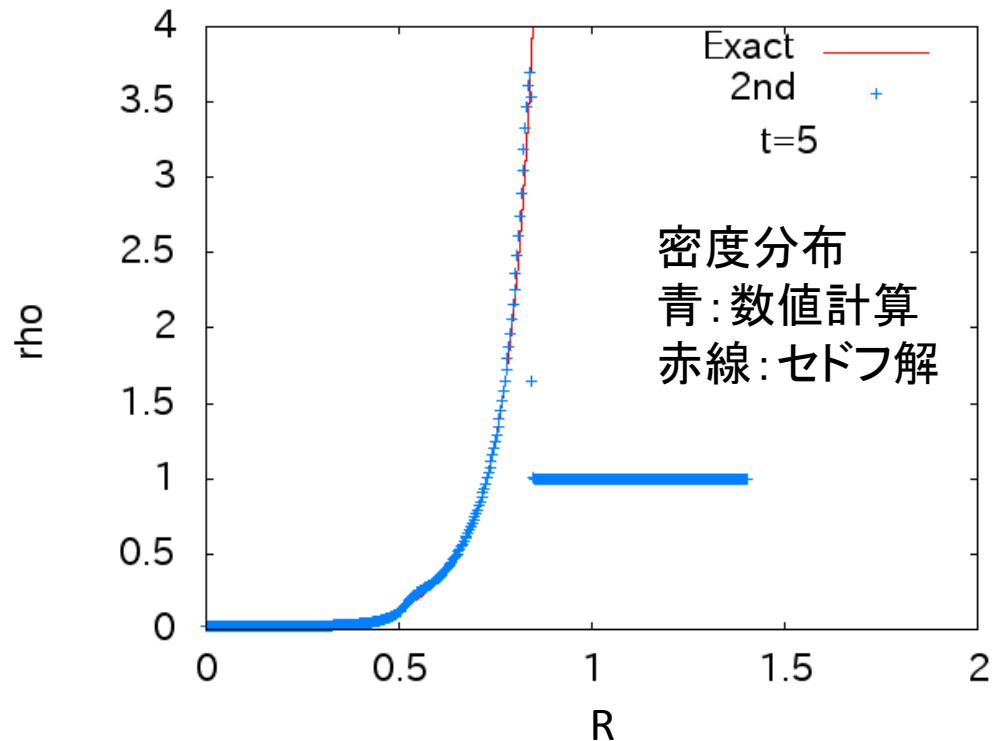
赤: HLLC法

青: HLL法

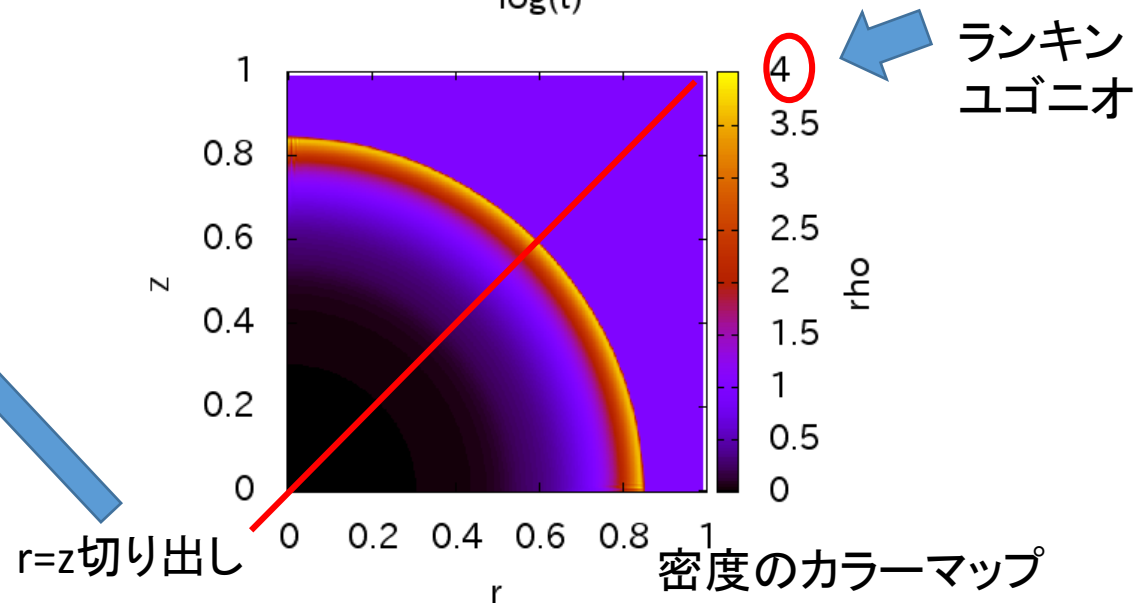
・点源爆発

初期条件

$$p_0 = 10^{-5} + (1 - 10^{-5})e^{-\frac{x^2}{(0.1)^2}}, \rho_0 = 1.0, v_0 = 0$$



二次元二次精度円筒座標点源爆発
メッシュ数400*400



4 セットアップ

二次元軸対称の銀河風の数値流体シミュレーションを行う

$$S = (-\rho v_r/r + \cancel{\rho v_\phi^2/r}, \boxed{-\rho \frac{\partial \phi}{\partial r} + \rho v_\phi^2/r + p/r}, \boxed{-\rho \frac{\partial \phi}{\partial z}}, \boxed{\rho v_\phi^2 v_r - \frac{\partial \phi}{\partial r} \rho v_r - \frac{\partial \phi}{\partial z} \rho v_z} + \boxed{\epsilon \dot{S} N} \cancel{\epsilon \dot{S} N})^T$$

簡単のため $\Lambda=0, p_{sn}=0$ とする

青枠: 重力による項

赤枠: 超新星爆発のエネルギー注入項

ダークマターハロー

ビリアル半径(銀河の大きさ)

$$r_{vir} = 0.75 kpc M_8^{1/3} h^{-1} \left(\frac{1+z}{10} \right)^{-1} \quad (\text{Mori et al 2002})$$

中心集中度

$$c \equiv \frac{r_{vir}}{r_s}$$

NFWポテンシャル ← DMHが支配的とする
(ガスの重力場は無視する)

$$\Phi(r) = -\frac{GM_h}{r_s} \frac{1}{\ln(1+c) - \frac{c}{1+c}} \frac{\ln(1+r/r_s)}{r/r_s}$$
$$r = \sqrt{\varpi^2 + z^2}$$

バリオン

全質量

$$M_{tot} = M_b + M_h$$

バリオン質量

$$M_b = f M_{tot} = \frac{f}{1-f} M_h$$

ガス質量

$$M_g = M_b - M_*$$

星質量

$$M_* = f_s \frac{f}{1-f} M_h$$

バリオン比

$$f \equiv \Omega_b / \Omega_m$$

星生成効率

$$f_s \equiv M_*/M_b$$

$$= \frac{f}{1-f} (1-f_s) M_h$$

ハロー質量はパラメータとして与える

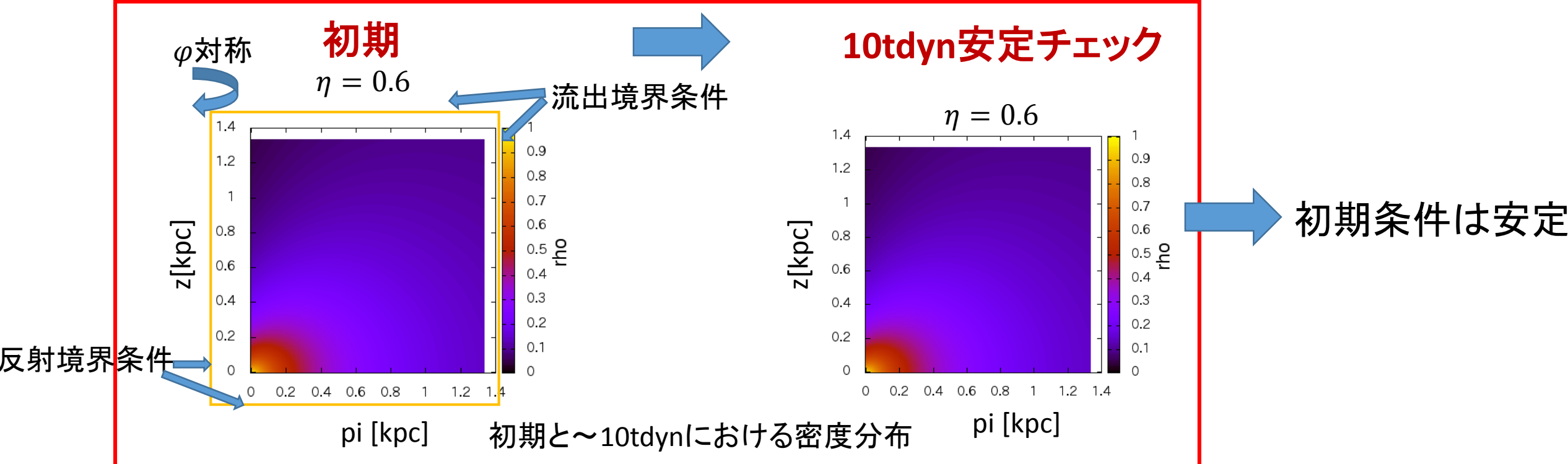
初期分布

遠心力を考慮し、等温($T=10^4\text{K}$)静水圧平衡を仮定

$$\rho(\varpi, z) = \rho(0, 0) \exp\left(-\frac{\Phi(\varpi, z) - (1 - \eta^2)\Phi(0, 0) - \eta^2\Phi(\varpi, 0)}{c_s^2}\right) \quad \leftarrow \quad v_\phi(\varpi, z) = \eta \sqrt{r \frac{\partial \Phi}{\partial r}}$$

重力テスト(初期条件安定テスト)

η : 偏平度 銀河の偏平度を表すパラメータ
遠心力効果を0~1の値で大きくなるほど遠心力が強い



エネルギー注入

サルピータIMFより超新星爆発の個数を見積もる

超新星爆発数

$$N_{SN} \simeq 7.4 \times 10^{-3} M_*$$

→

$$E_{tot} = E_0 \times N_{SN}, E_0 = 10^{51} [erg]$$

ガウシアン分布で圧力として中心部数メッシュに初期条件で注入

固定パラメータ

γ	c	z	h	f
5/3	5	3	0.7	0.17

γ : 比熱比、c: 中心集中度
z: 赤方偏移、h: ハッブルパラメータ
f: 星生成効率

変動パラメータ

$$\eta = 0.1 \sim 0.9$$

$$M_h = 10^6 M_\odot \sim 10^9 M_\odot$$

η : 偏平度
Mh: ハロー質量

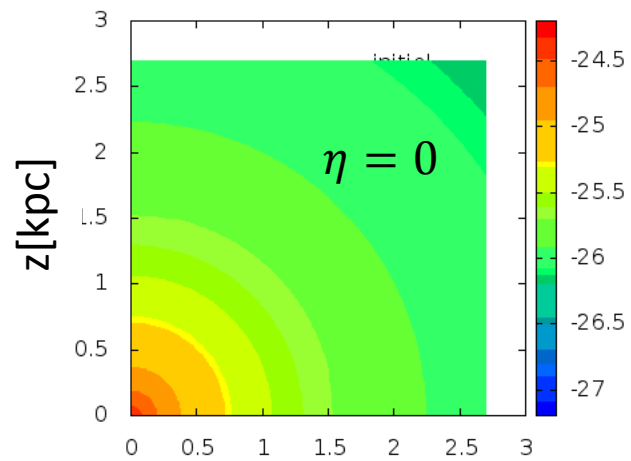
簡単のため以下の仮定を導入する

- 超新星爆発は点源爆発であり銀河中心からEtotを注入する
(初期条件でエネルギーをすべて注入)
- 衝撃波の膨張段階は断熱膨張段階とする
(冷却は効かない)

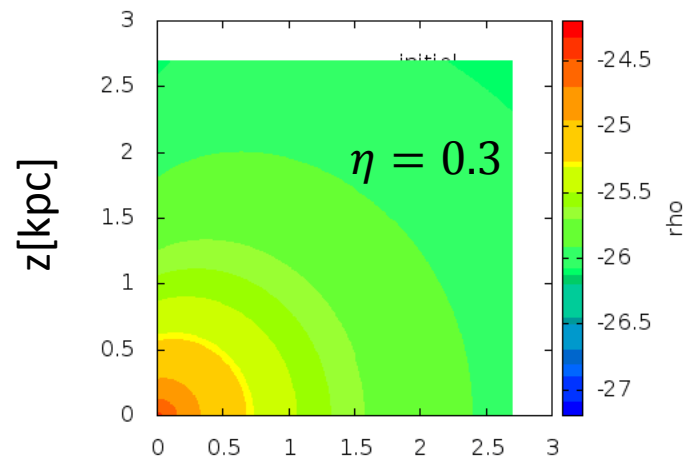
500 × 500mesh 解像度	
10 ⁶ Msun	1.154pc
10 ⁷ Msun	2.486pc
10 ⁸ Msun	5.356pc
10 ⁹ Msun	11.542pc

5.結果

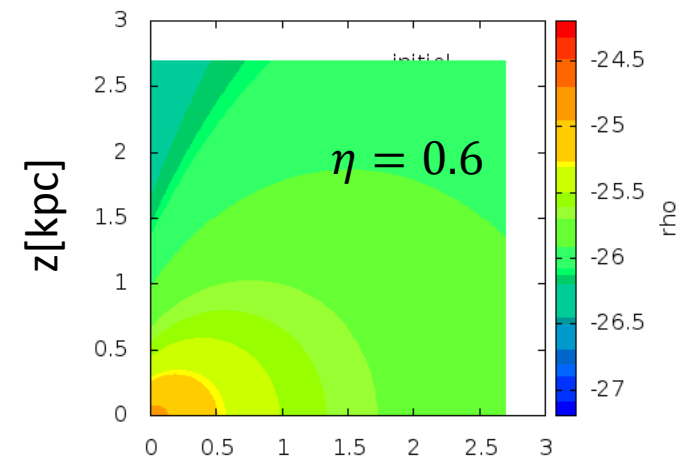
初期密度分布 $M_h = 10^8 M_{\text{sun}}$



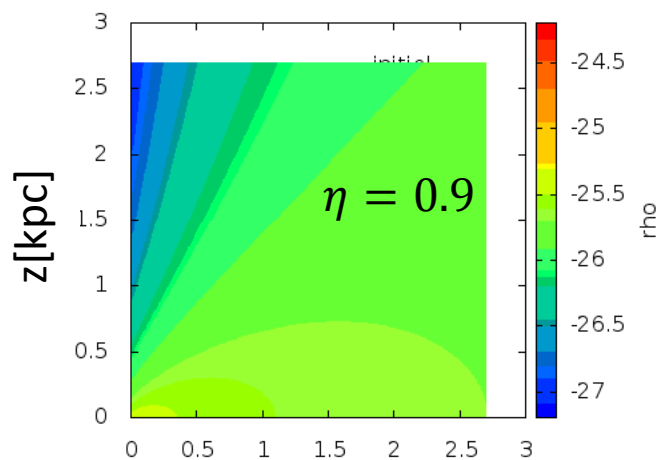
π [kpc]



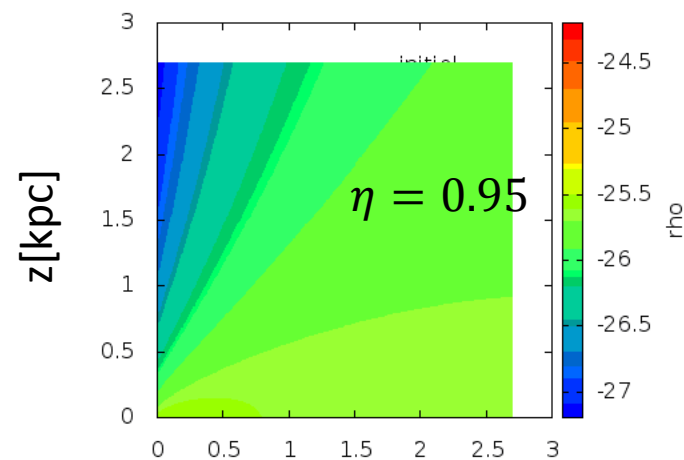
π [kpc]



π [kpc]



π [kpc]



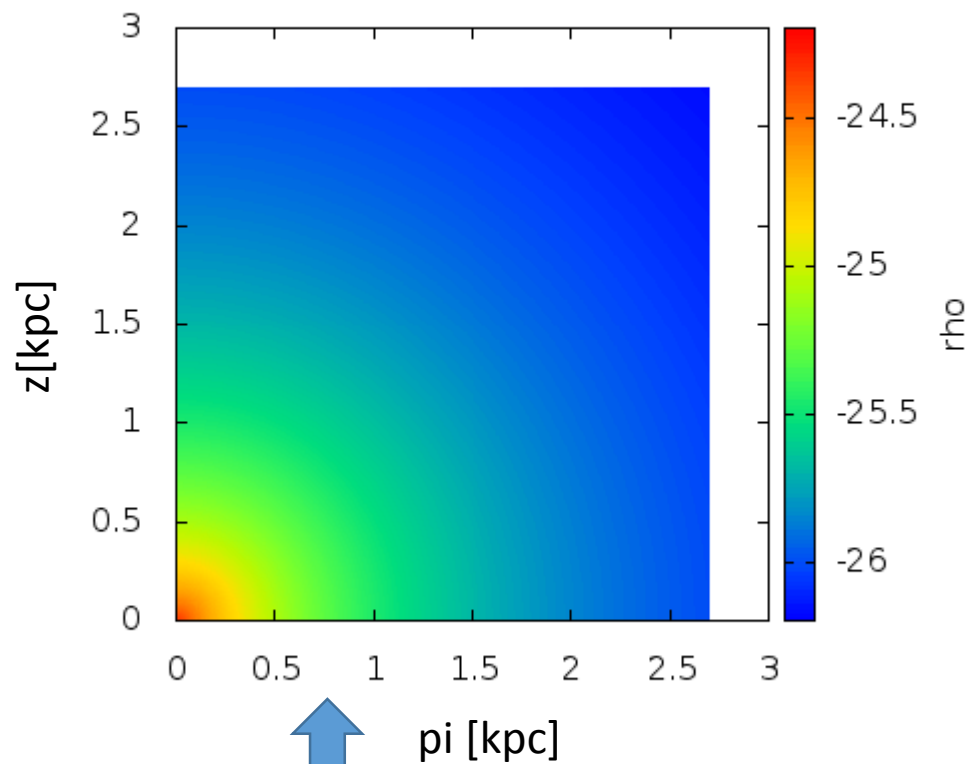
π [kpc]

カラーバー 密度 \ln スケール

エネルギー注入

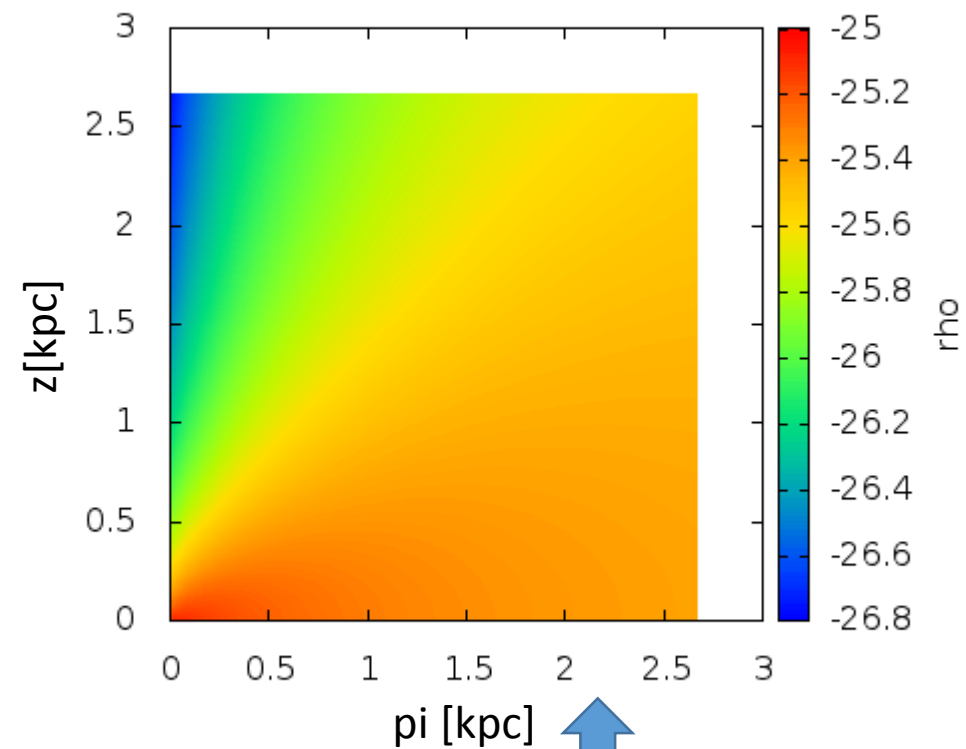
$M_h = 10^8 M_{\text{sun}}$

$\eta = 0$



Elliptical like

$\eta = 0.9$

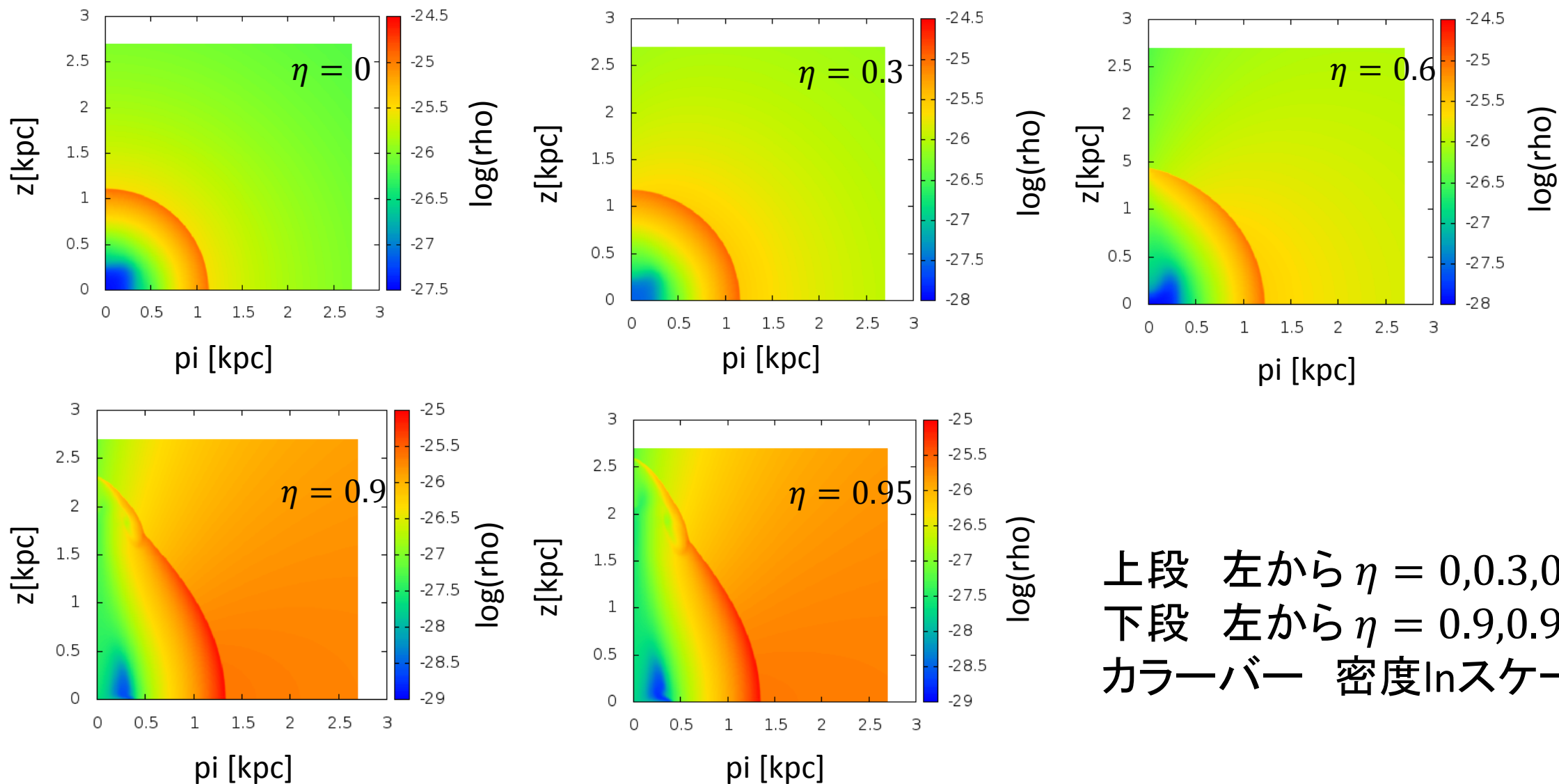


Disk like

カラーバー 密度lnスケール

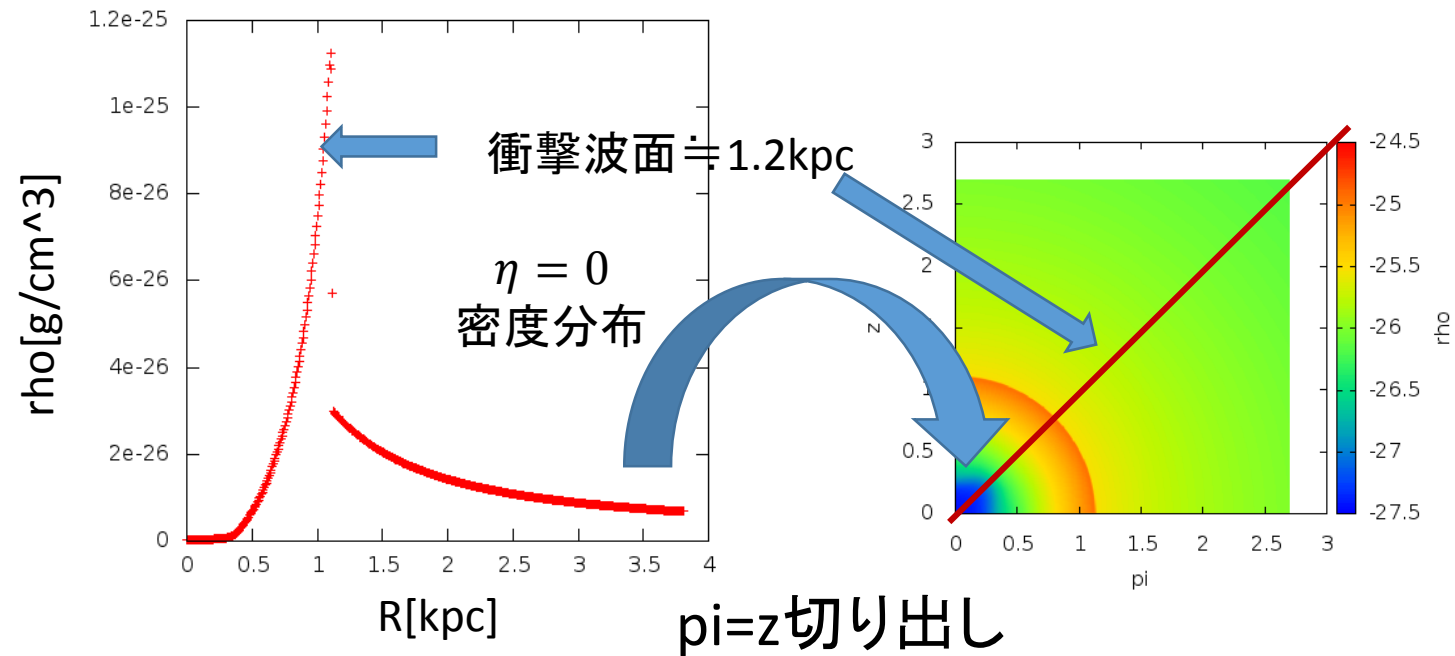
$M_h = 10^8 M_{\text{sun}}$

$t = 3 \text{ Myr}$ における密度分布

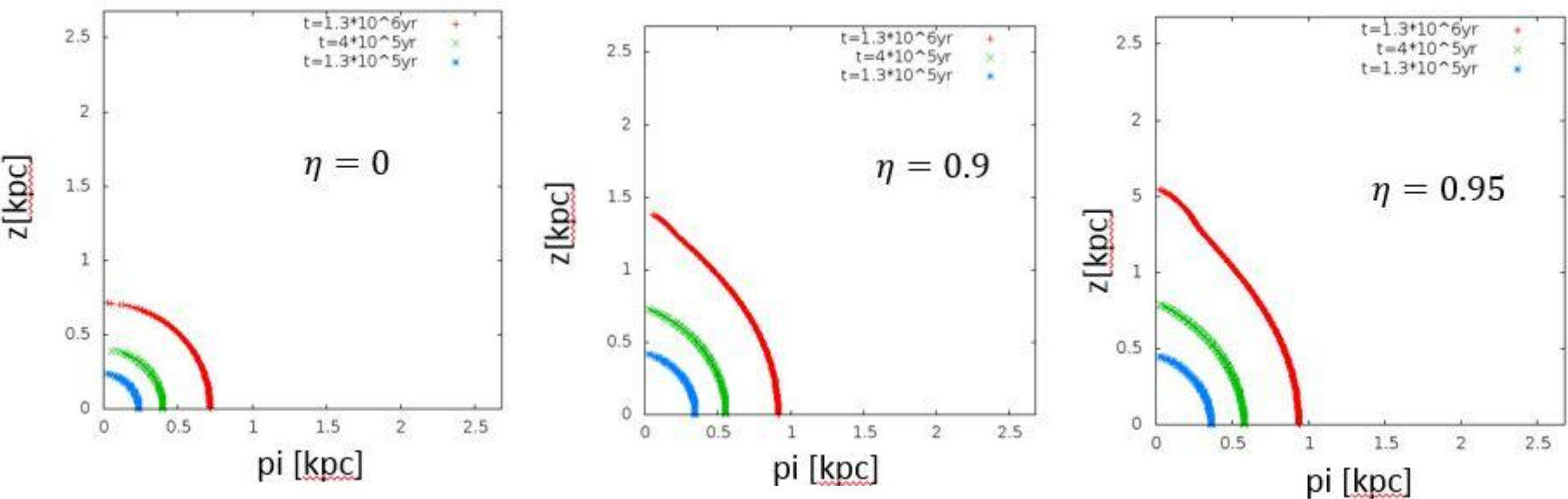


上段 左から $\eta = 0, 0.3, 0.6$
下段 左から $\eta = 0.9, 0.95$
カラーバー 密度 \ln スケール

pi=z切り出し Mh=10^8Msun t=3Myr



衝撃波面の時間変化 Mh=10^8Msun

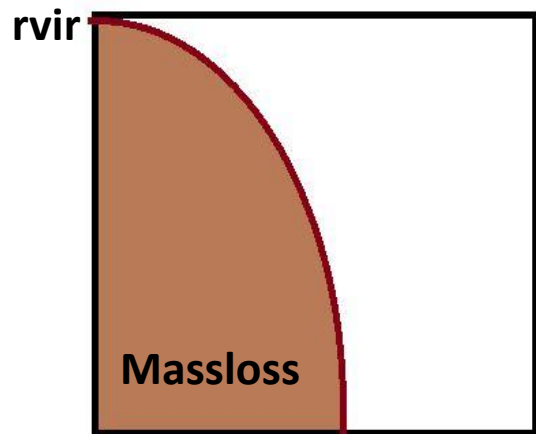


赤 1.3×10^6 yr
緑 4×10^5 yr
青 1.3×10^5 yr

質量放出

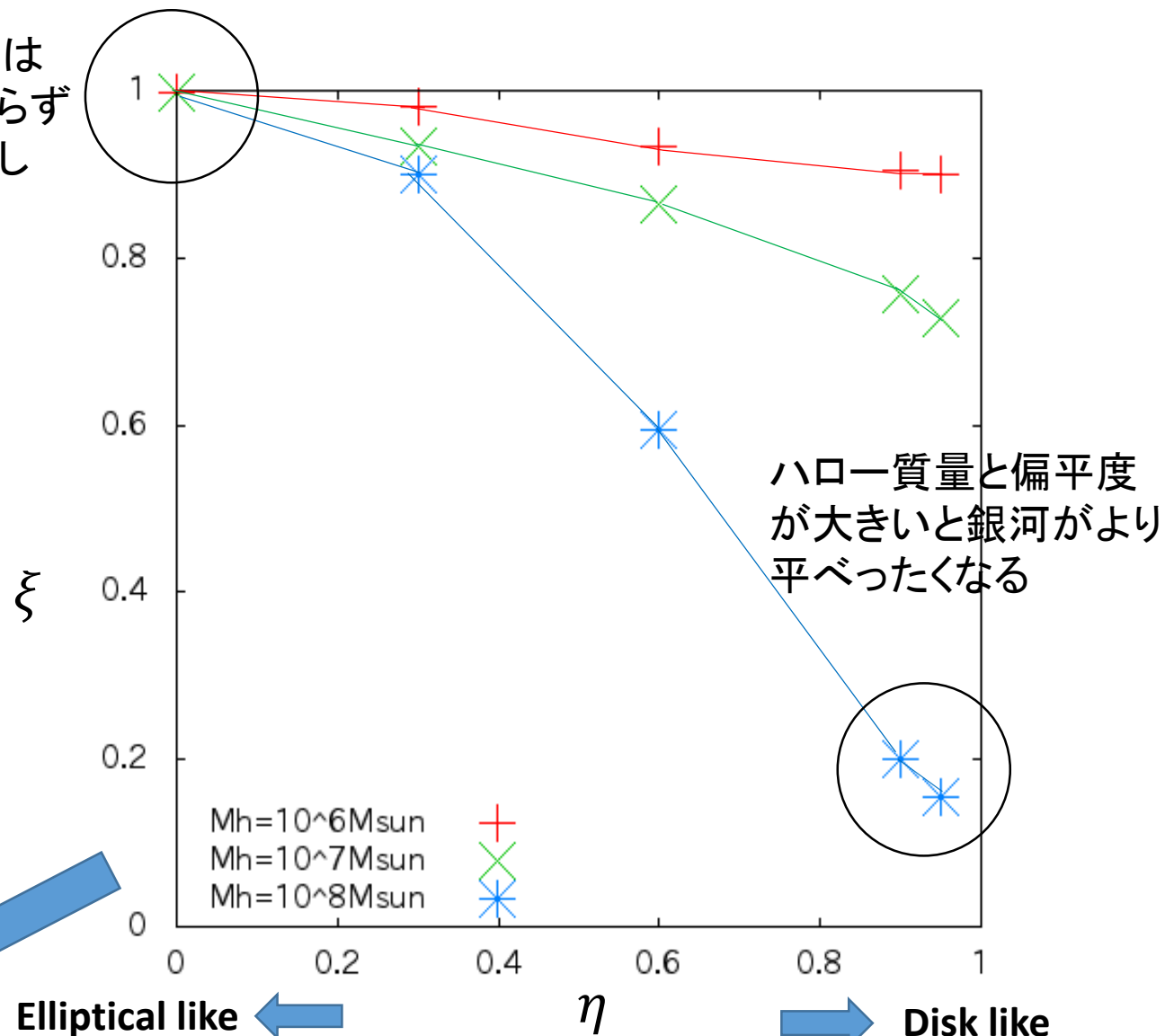
$$\xi \equiv \frac{M_{loss}}{M_g}$$

$f_s \equiv M_*/M_b = 0.01$ で固定
 η を変化させる



ビリアル半径に到達した衝撃波で囲まれた
領域のガスがすべて放出すると仮定する

丸い銀河は
質量によらず
吹き飛ばし



質量放出率は形状(偏平度)とハロー質量
に強く依存する

赤	Mh=10 ⁶ Msun	横軸	偏平度
緑	Mh=10 ⁷ Msun	縦軸	質量放出率
青	Mh=10 ⁸ Msun		

6.現在の研究状況

星形成が連続的に起こるモデル

エネルギー、マスを徐々に注入する $\tau=500\text{Myr}$ (Recchi & Hensler 2013)に渡り注入

$$L = \frac{E_0 N_{SN}}{\tau} = 9.65 \times 10^{37} [\text{erg/s}] \quad \leftarrow \text{Mh}=10^8 \text{Msunのとき} \quad \dot{m}_{rem} = \frac{M_{rem}}{\tau}$$

L:単位時間あたりに注入するエネルギー

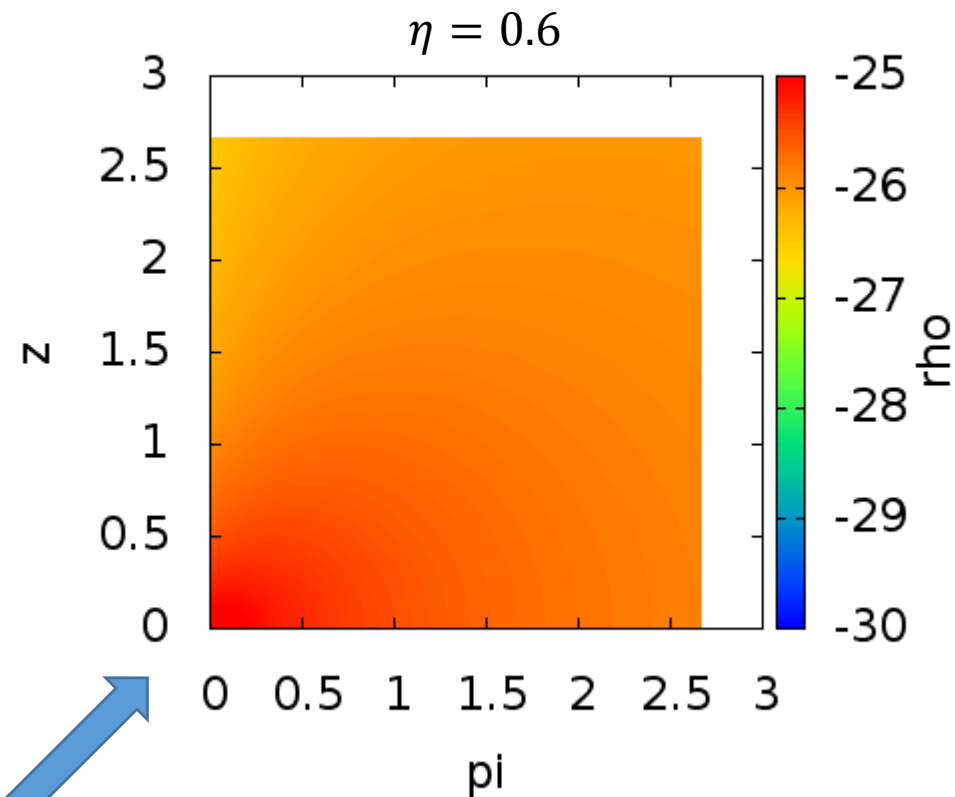
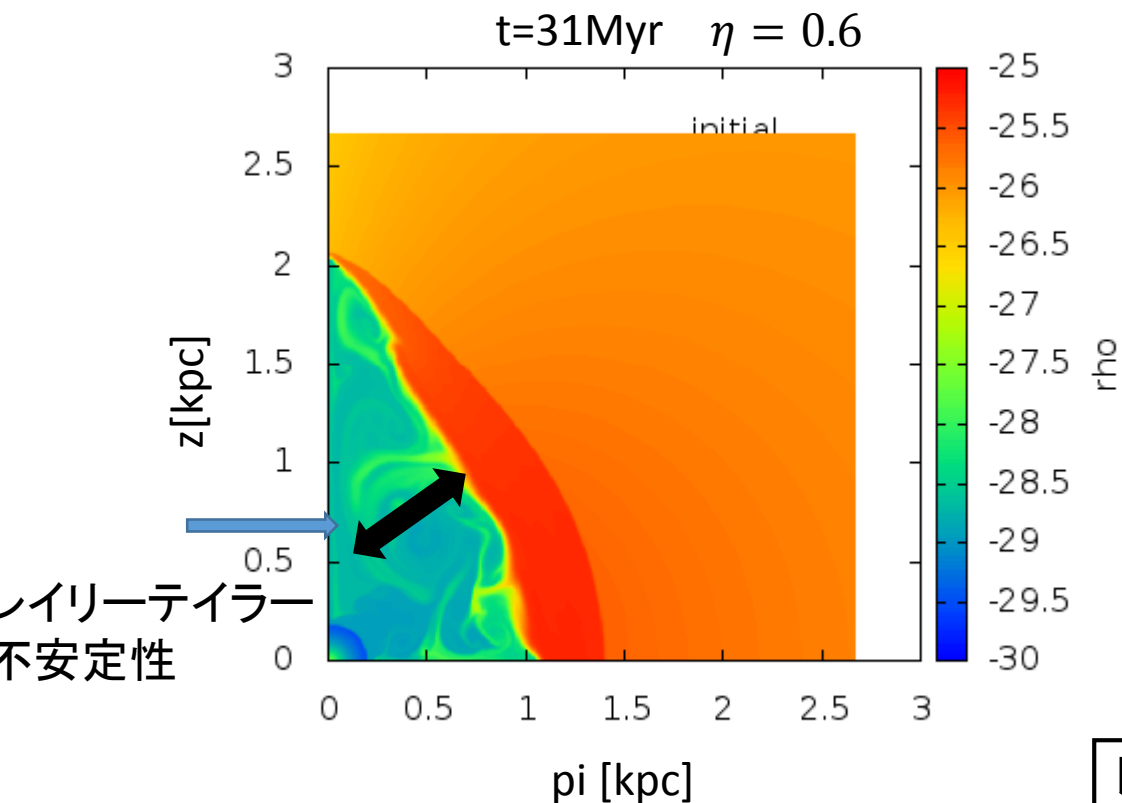
mrem:単位時間あたりに注入する質量

- ・実際1ループで中心数メッシュに注入するのは $L \times dt, m_{rem} \times dt$
- ・今回は実験的に $Mh=10^8 \text{Msun}, \eta = 0.6$ の場合に関してシミュレーションを行う
- ・レイリーテイラー不安定性の成長時間を見積もる

レイリーテイラー(RT)不安定性評価

先ほどまでの結果はRT不安定性が成長する前にアウトフローが銀河外に脱出していたと考えられる

$$t_{RT} \simeq \sqrt{\frac{\lambda(\rho_2 + \rho_1)}{2\pi g(\rho_2 - \rho_1)}} = 13.4 \text{ Myr}$$



t=49Myrまでの1Myrごとのムービー

レイリーテイラー不安定性→ケルビンヘルムホルツ不安定性

7. 結論とこれからの計画

結論

- ・二次元軸対称流体コードを実装することができた
- ・銀河の形状の違いによる簡単な銀河風のシミュレーションを行うことができた
- ・扁平度が高い銀河ほど選択的に軸方向に銀河風が放出し、質量放出は小さい
- ・質量が大きい銀河ほどこの効果は顕著に現れる

これからの計画

- ・星生成率も変化させることにより、重力の効果を見たい
- ・星形成が連続的に起こるモデルに対して冷却を導入することにより現実的な計算を行いたい

- 主な参考文献

- 1)E.F.Toro,M.Spruce,W.Speares. Restoration of contact surface in the HLL Riemann solver. ShockWaves (1994)
- 2)MacLow M.-M., Ferrara A . 1999,ApJ,513,142
- 3) Recchi, S., Hensler, G. 2013, A&A 551, A41
- 4)Mori,M.,Ferrara,A.,Madou,P.,2002,ApJ,571,40
- 5)Tomisaka,K.,Ikeuchi,S.,1988,ApJ,330,695
- 6)Navarro,J.F.,Frenck,C.S.,White,S.D.M.1997,ApJ,490,493
- 7)E.F.Toro Riemann Solvers and Numerical Methods (2009) Springer
- 8)坂下志郎他 新物理学シリーズ30 宇宙流体力学(1996) 培風館
- 9)超新星残骸 千葉大学2001年数値天体物理学サマースクール講義資料
http://www.astro.phys.s.chibau.ac.jp/netlab/cans/cans1d/md_sedov/
- 10)水田晃 相対論的流体方程式の数値解法(2011) 原子核研究,vol.56,No.1,(2011),pp. p59-p78
- 11)三好隆博、草野完也 高速プラズマ流を伴う計算機シミュレーションの基礎(2007) J.Plasma FusionRes.Vol83,No3(2007) p228-p240
- 12)三好隆博 磁気流体力学方程式に対する近似リーマン解法 千葉大学2012年数値天体物理学サマースクール講義資料
- 13)すばる望遠鏡HP(http://subarutelescope.org/Pressrelease/2000/03/24/j_index.html)
- 14) A.Ferrara,E.Tolstoy,2002, Mon. Not. R. Astron. Soc. 313, 291,309