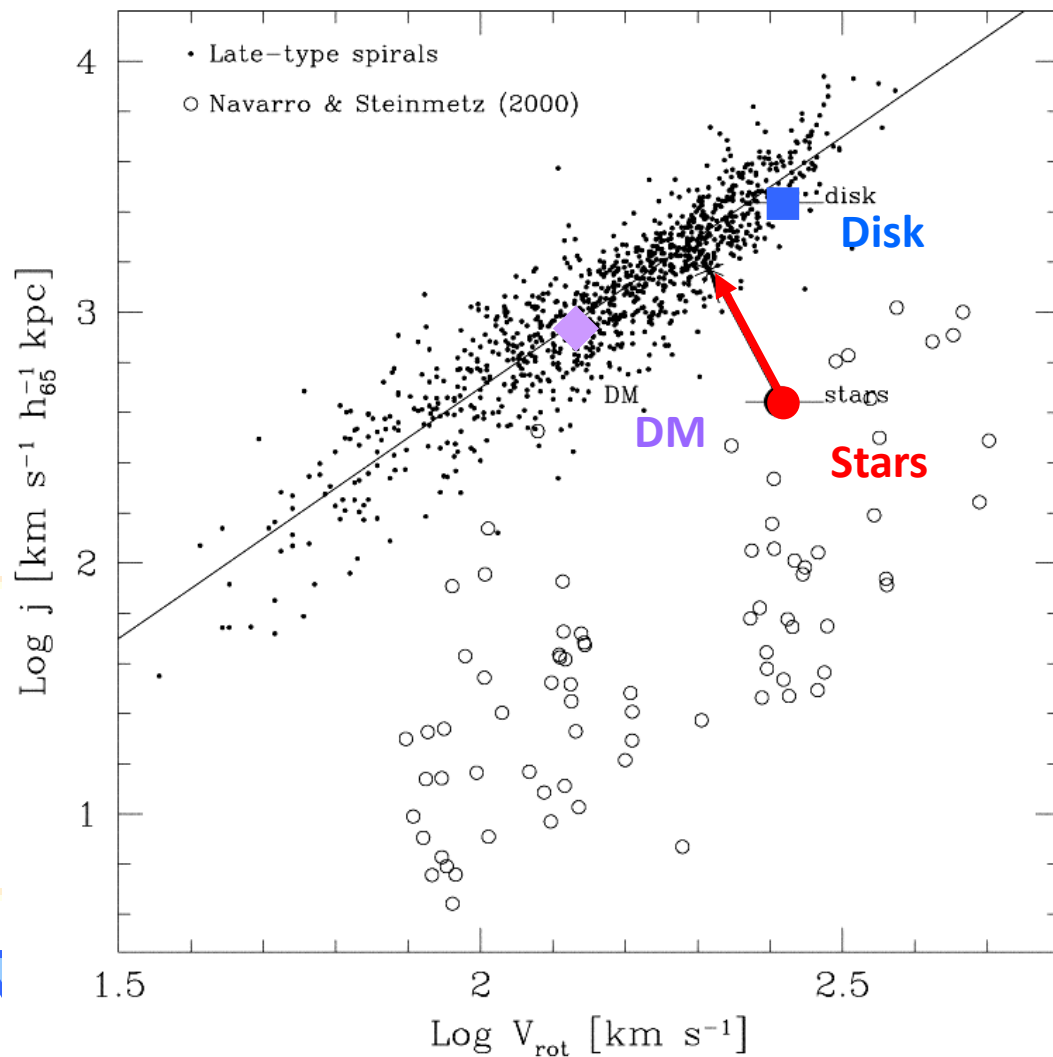


DISPH 法による 銀河形成シミュレーション

斎藤貴之
地球生命研究所(ELSI)/東京工業大学

A faint, light-colored geometric pattern, resembling a stylized honeycomb or a network of lines, is visible in the bottom left corner of the slide.

銀河形成シミュレーション



Abadi et al. 2003

- 宇宙初期の密度揺らぎ・質量分布からの時間進化を解く
- 立派な星の円盤が出来ないという角運動量問題があった
 - 最初の3Dシミュレーションの頃から指摘されていた(see Katz & Gunn 1991, Navarro & Benz 1991)
- Feedback が鍵とされている
- が今回は流体解法の問題について

Contents



- Standard Smoothed Particle Hydrodynamics 法から
Density independent Smoothed Particle Hydrodynamics 法へ
- サンタバーバラクラスターテスト
- DISPH 銀河形成シミュレーション

Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) とは



- SPH 法は、Lucy (1977)、Gingold & Monaghan (1977) により開発された圧縮性流体の解放
 - ラグランジュ法的一种
 - 流体物理量は粒子からの寄与の畳み込みで与えられる



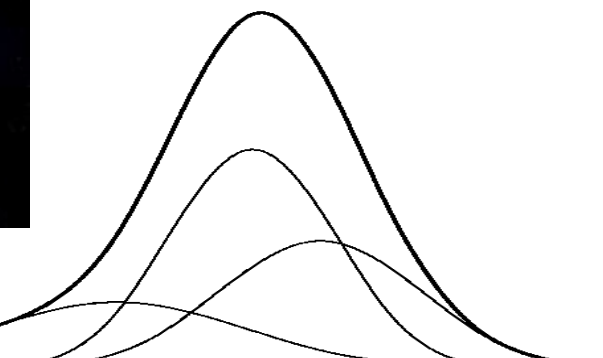
Muller+'03 SIGGRAPH

~cm scale



Saitoh et al.

~10²²cm scale



SPH 法の利点/欠点



- 利点
 - ガリレイ不変
 - ダイナミックレンジの大きな天文学の問題に適している
 - 高密度領域で高分解能
- 欠点
 - 場の量を表現するのが苦手
 - ショックの分解能が低い

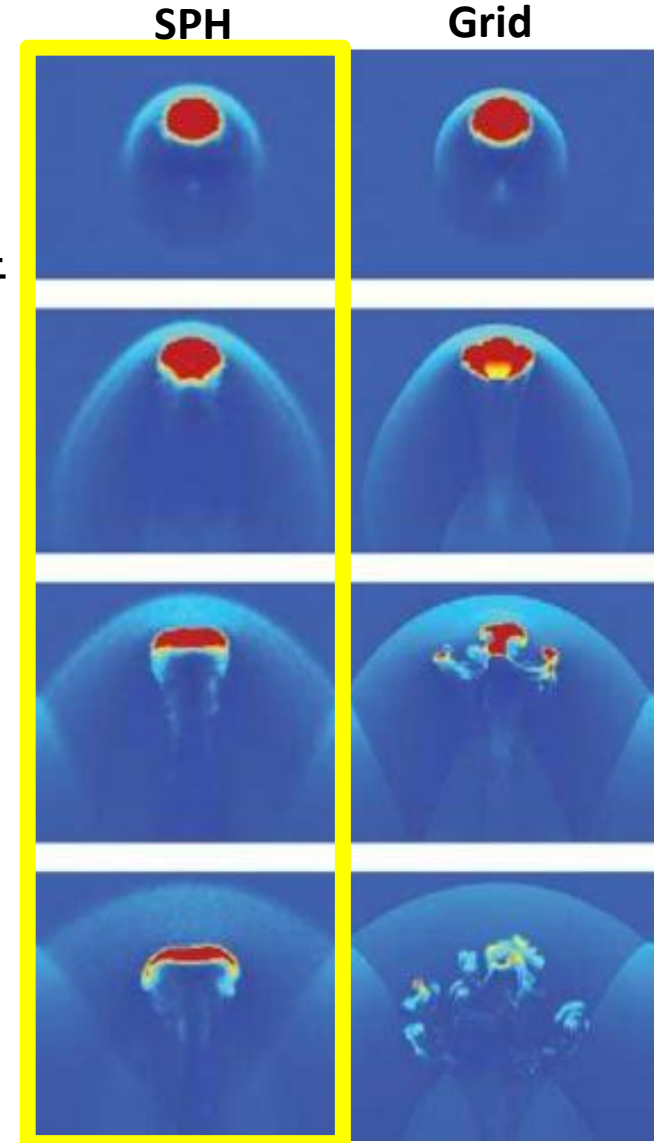
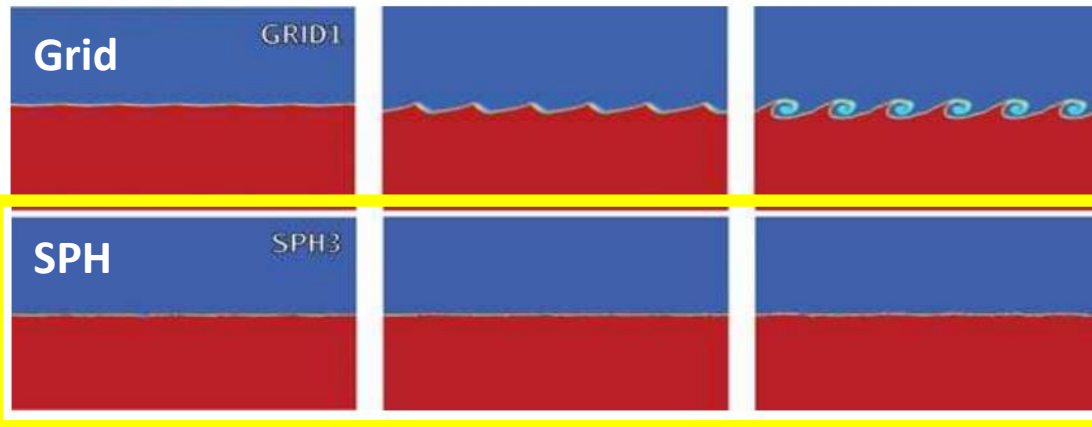
SPH 法の問題点



Agertz+2007

Agertz+2007

- SPH 法と Euler 法の比較
- SPH は接触不連続面の扱いが苦手
 - 不安定性成長の抑制
 - fundamental difference
- 原因はSPHの定式化に密度の微分可能性を用いているから



Density Independent SPH

- カーネル近似をした物理量の推定：

$$f(\mathbf{r}) = \int f(\mathbf{r}') W(|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|, h) d\mathbf{r}'$$

- 通常 of 離散化

$$\rho_i = \sum_j m_j W(r_{ij}, h)$$

- 我々の採用した離散化(圧力を評価)

$$q_i = \sum_j U_j W(r_{ij}, h_i) \quad \begin{aligned} U_j &= m_j u_j \\ q_j &= \rho_j u_j \end{aligned}$$

— 運動方程式などは機械的に求まる (Saitoh & Makino 2013)

SPH 方程式



$$\rho_i = \sum_j m_j W(r_{ij}, h)$$

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = - \sum_j m_i m_j \left(\frac{P_i}{\rho_i^2} f_i^{\text{grad}} \nabla_i W_{ij}(h_i) + \frac{P_j}{\rho_j^2} f_j^{\text{grad}} \nabla_i W_{ij}(h_j) \right)$$

$$\frac{dU_i}{dt} = m_i \frac{P_i}{\rho_i^2} f_i^{\text{grad}} \sum_j m_j \mathbf{v}_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij}(h_i)$$

$$f_i^{\text{grad}} = \left(1 + \frac{h_i}{3\rho_i} \frac{\partial \rho_i}{\partial h_i} \right)^{-1}$$

$$P = (\gamma - 1) \rho u$$

DISPH 方程式



$$q_i = \sum_j U_j W(r_{ij}, h_i)$$

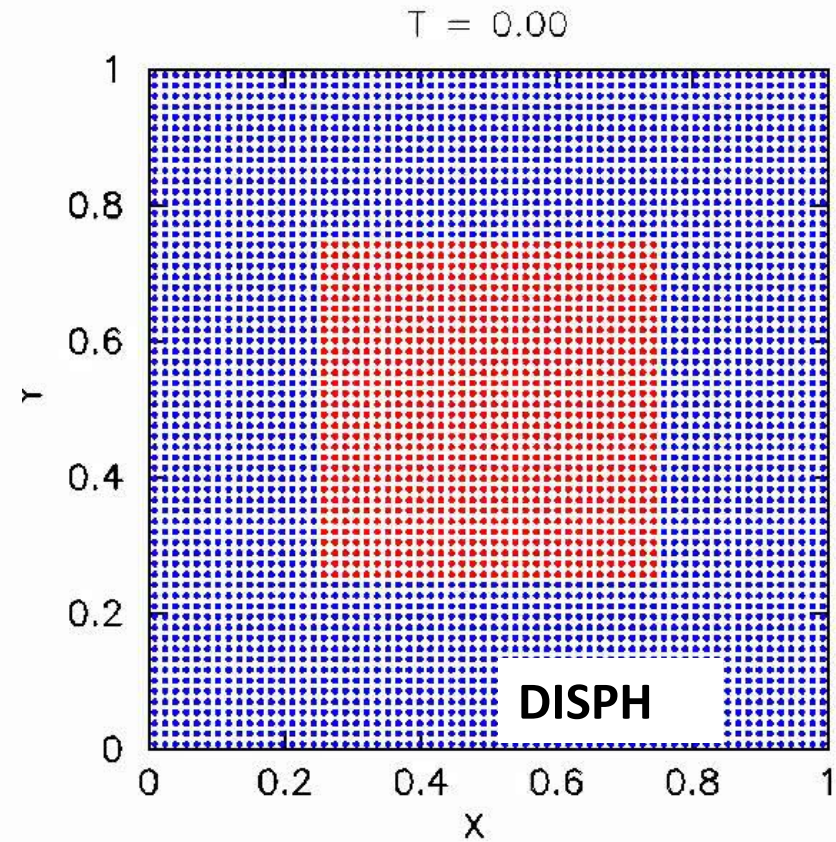
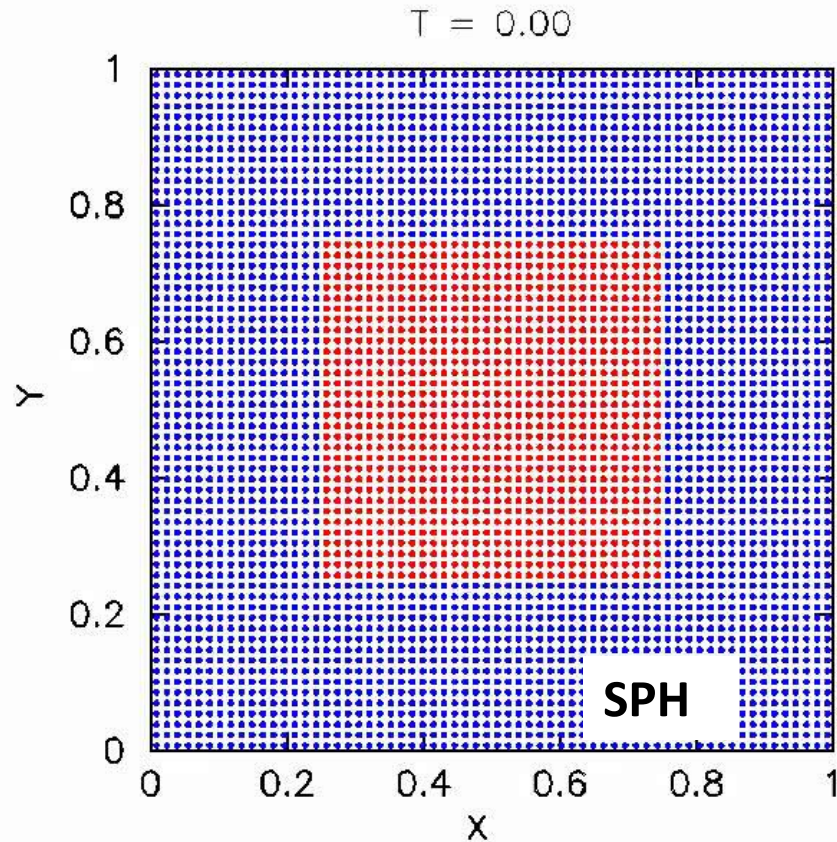
$$m_i \frac{dv_i}{dt} = -(\gamma - 1) \sum_j U_i U_j \left(\frac{f_i^{\text{grad}}}{q_i} \nabla_i W_{ij}(h_i) + \frac{f_j^{\text{grad}}}{q_j} \nabla_i W_{ij}(h_j) \right)$$

$$\frac{dU_i}{dt} = (\gamma - 1) \sum_j \frac{U_i U_j}{q_i} f_i^{\text{grad}} \mathbf{v}_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij}(h_i)$$

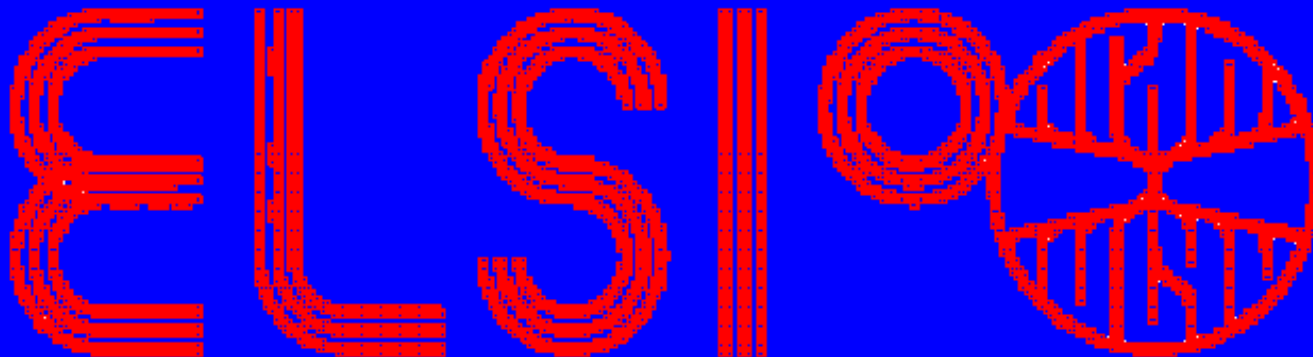
$$P = (\gamma - 1) \rho u$$

$$f_i^{\text{grad}} = \left(1 + \frac{h_i}{3q_i} \frac{\partial q_i}{\partial h_i} \right)^{-1}$$

Hydrostatic Equilibrium test



Initial condition

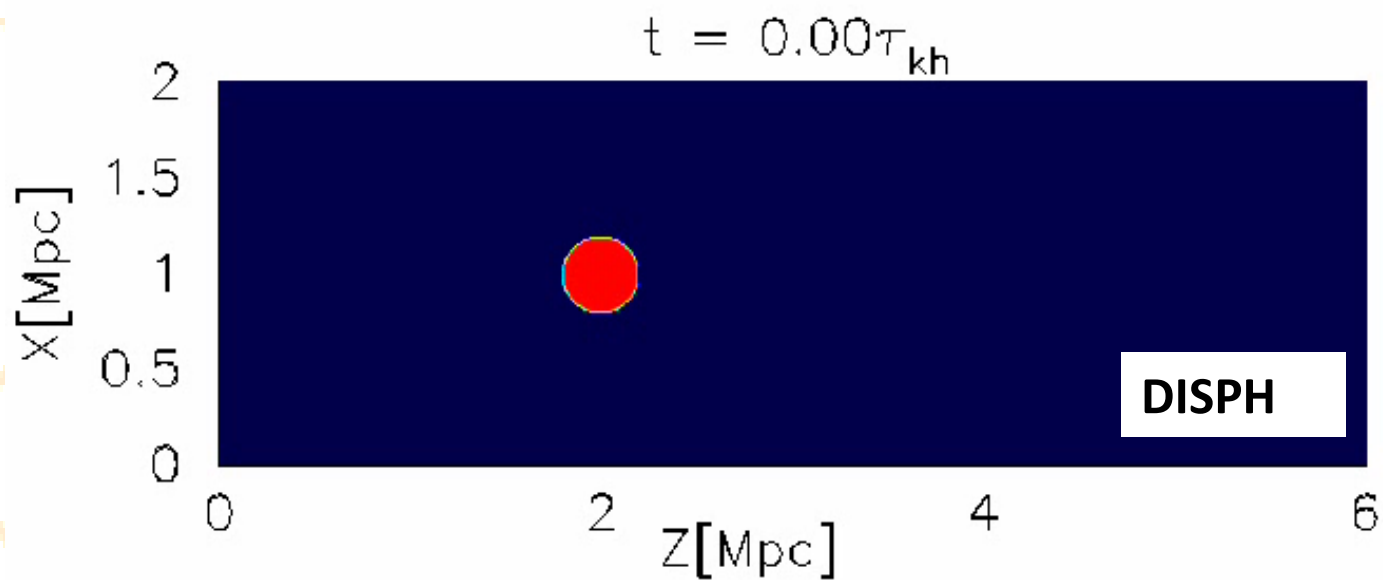
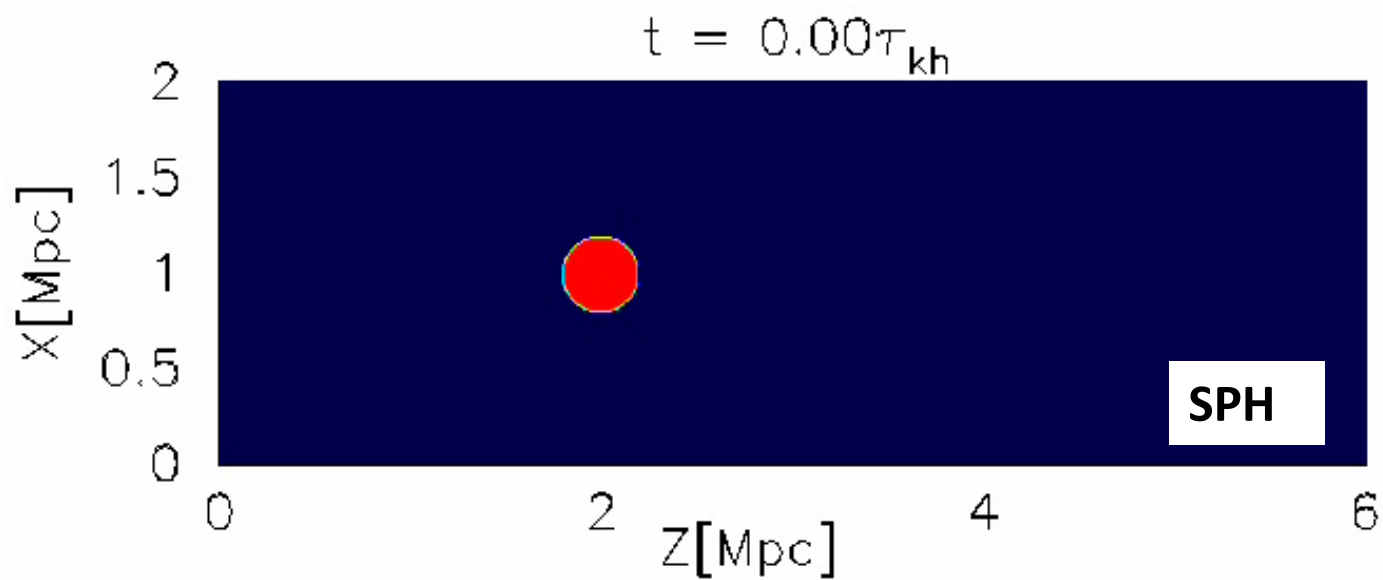


Our SPH



Standard SPH





Contents



- Standard Smoothed Particle Hydrodynamics 法から
Density independent Smoothed Particle Hydrodynamics 法へ
- サンタバーバラクラスターテスト
- DISPH 銀河形成シミュレーション

Santa Barbara Cluster Comparison Test



Frenk+1999

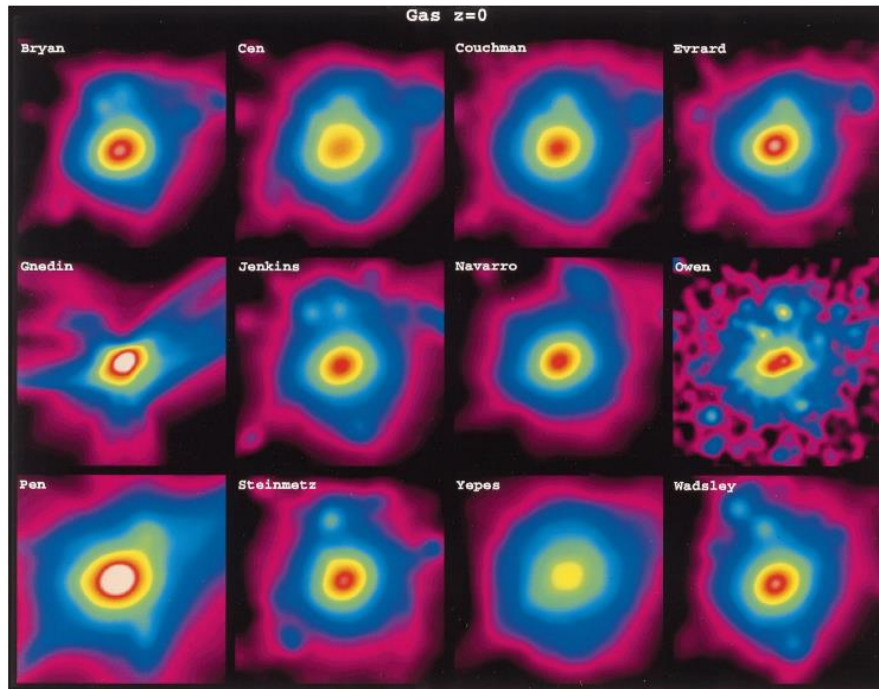


FIG. 3.—Projected gas density at $z = 0$. The images, covering the inner 8 Mpc of each simulation cube, have been smoothed using the standard Gaussian filter of 250 kpc half-width described in the text.

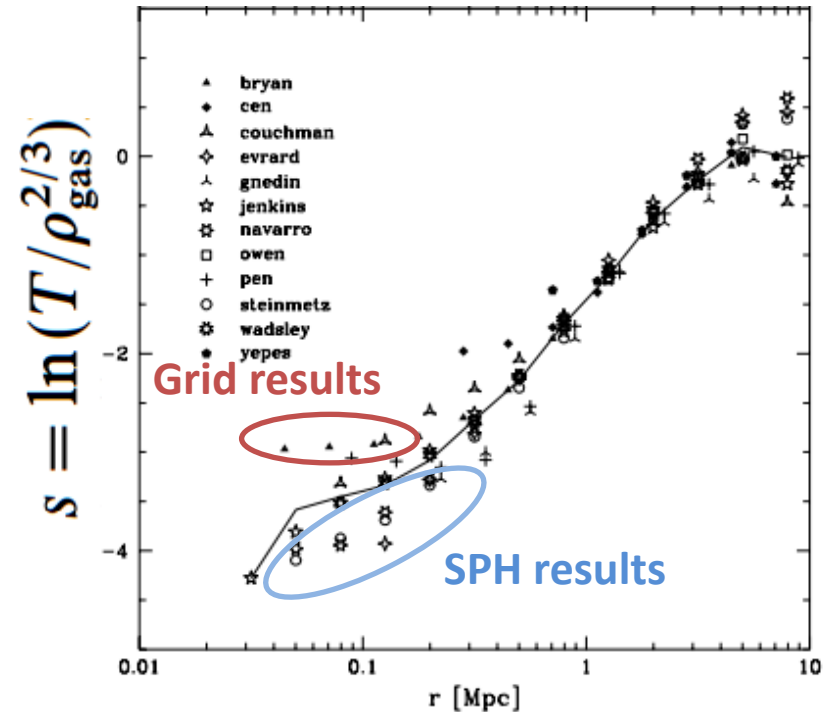


FIG. 18.—Radial variation of the gas entropy. The entropy is defined as $s = \ln(T/\rho_{\text{gas}}^{2/3})$. See legend to Fig. 10 for further details.

- エントロピープロファイルに系統的な違い
 - Grid results: **Core at the center**
 - SPH results: **No entropy core**

エントロピープロファイルの 違いの起源は？



- Frenk+1999 の解釈

the entropy remains approximately constant within ~ 200 kpc. This difference might reflect differences in the way in which shocks are treated in the SPH and grid codes; however, the effect is small and occurs at the resolution

- 従来の SPH 法は接触不連続面に非物理的表
面張力が発生(e.g., Agertz+2007)
 - クランプ落下時にラム圧・流体不安定性による破壊を免れて低エントロピー成分を中心に供給する可能性
 - Blob test (Agerztz+2007) の結果が示唆的
 - See also Power+2014

メッシュの問題： !=ガリレイ不変 数値拡散

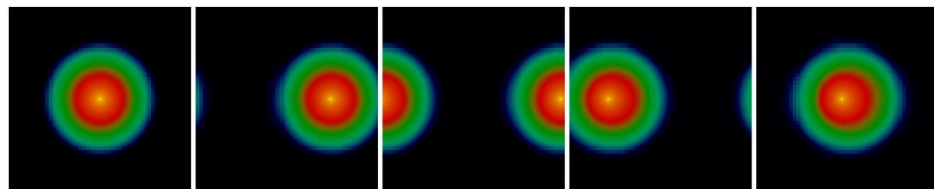


Figure 12. Density projections of the cluster over the course of 1 Gyr in which it moves once around the simulation box. Images taken at 0, 250, 500, 750, 1000 Myr with projected density range $[10^{8.4}, 10^{16.5}] \text{ M}_{\odot} \text{ Mpc}^{-2}$. Yellow and red shows higher density regions than green, while black is very low density. [Images produced with ENZO (ZEUS).]

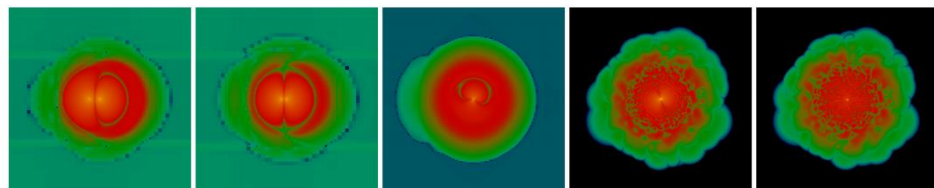
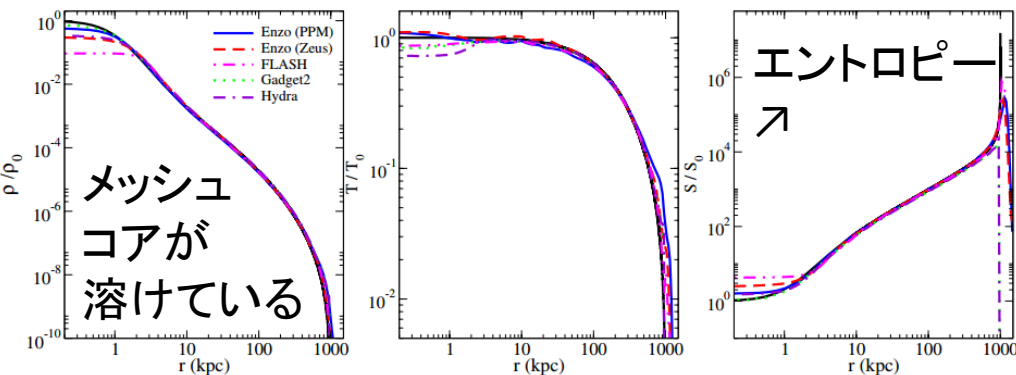


Figure 13. Image subtractions of the density projections at the start and end of the translating cluster test. From left- to right-hand side shows ENZO (PPM), ENZO (ZEUS), FLASH, GADGET2 and HYDRA. The projected density range is $[10^4, 10^{18.6}] \text{ M}_{\odot} \text{ Mpc}^{-2}$.



Tasker+2008

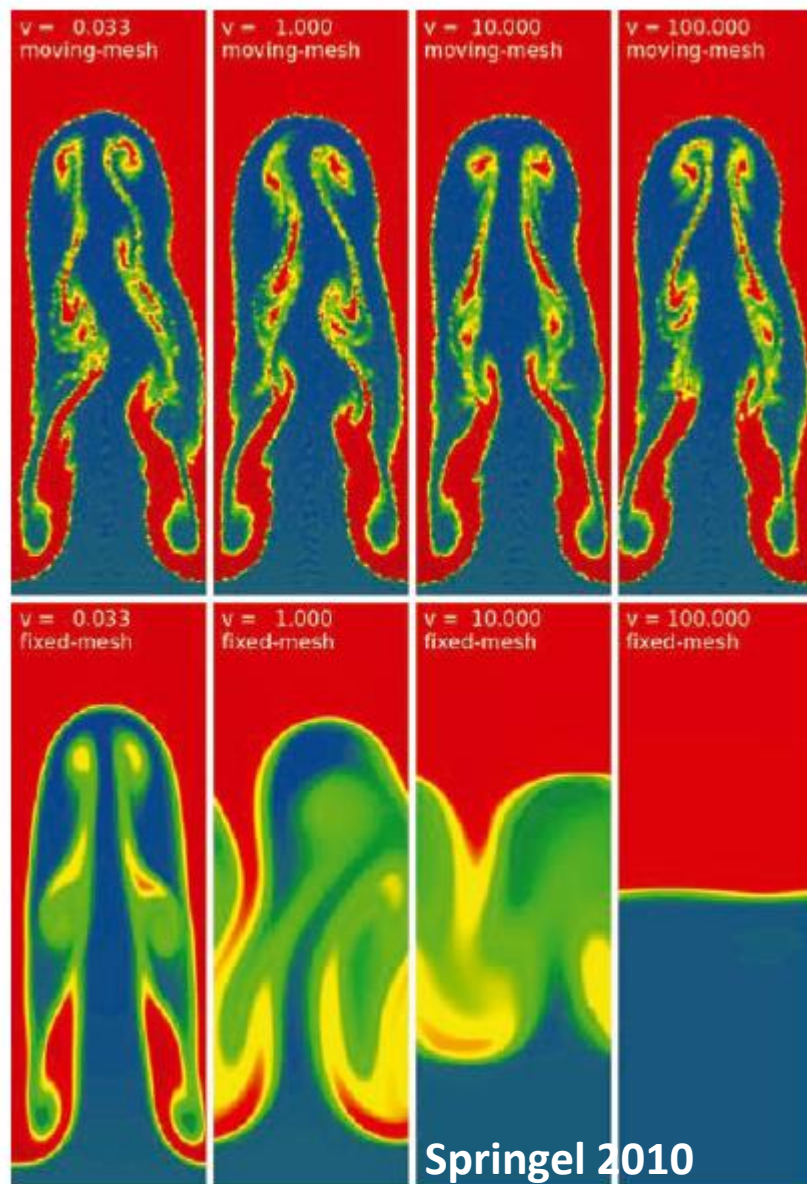
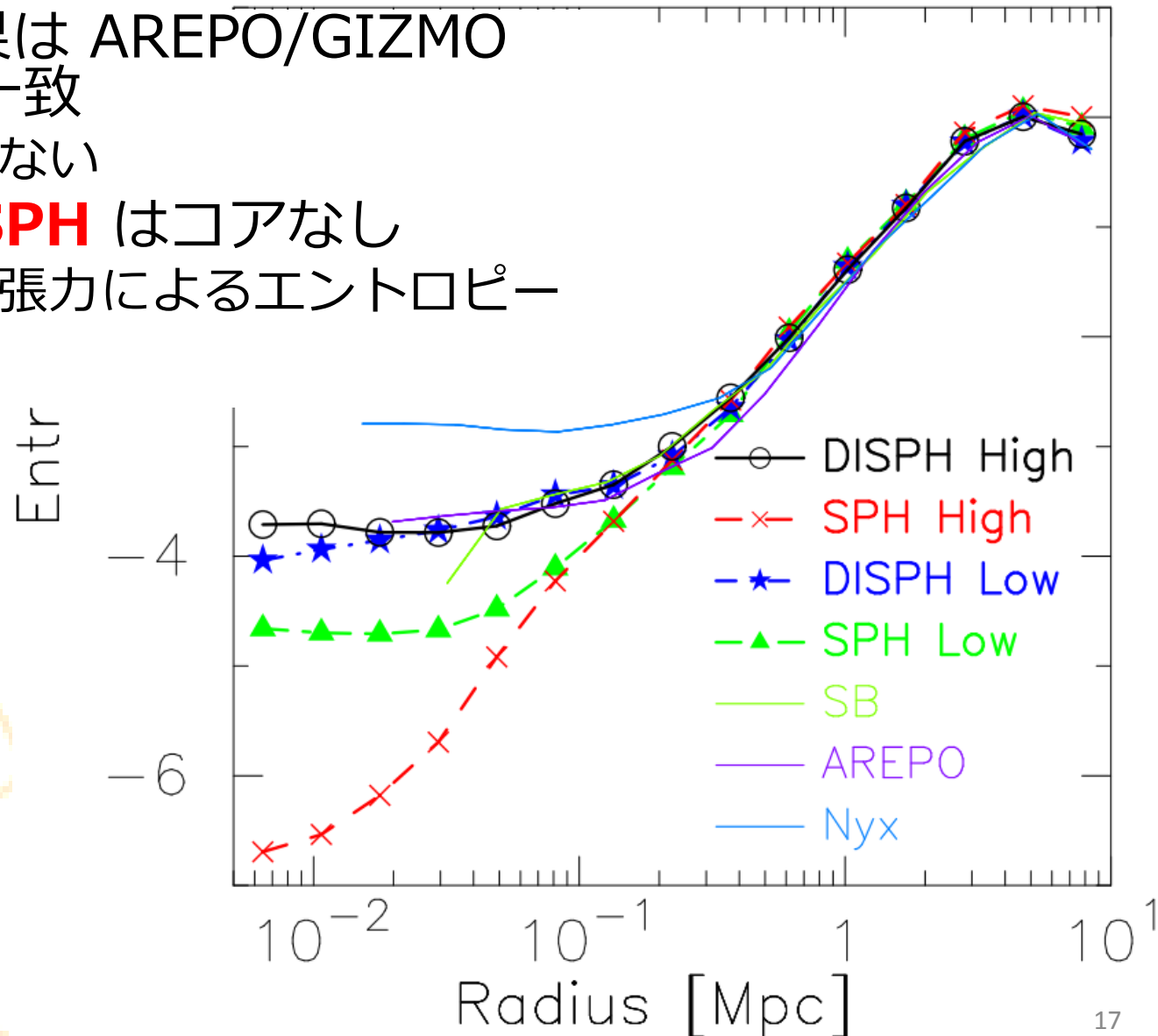


Figure 36. RT instability calculated with different Galilean boosts v_x in the horizontal direction (the simulation domain is periodic in the x -direction). The correct result should in principal be independent of v . The top row shows the result at time $t = 15.0$ computed with our moving-mesh approach, while the bottom row of panels gives the corresponding results for a fixed-mesh calculation with AREPO.

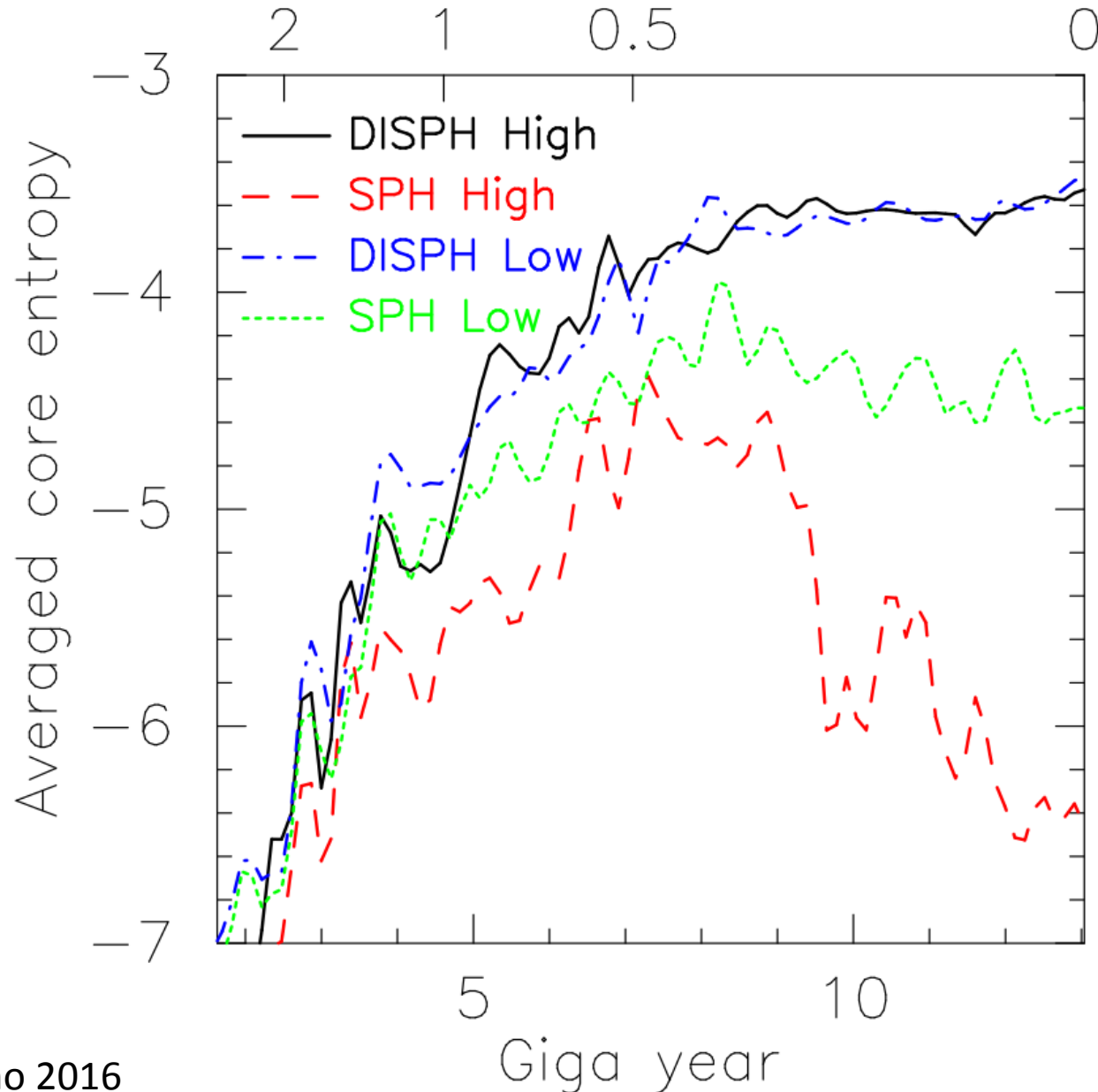
Entropy Profile



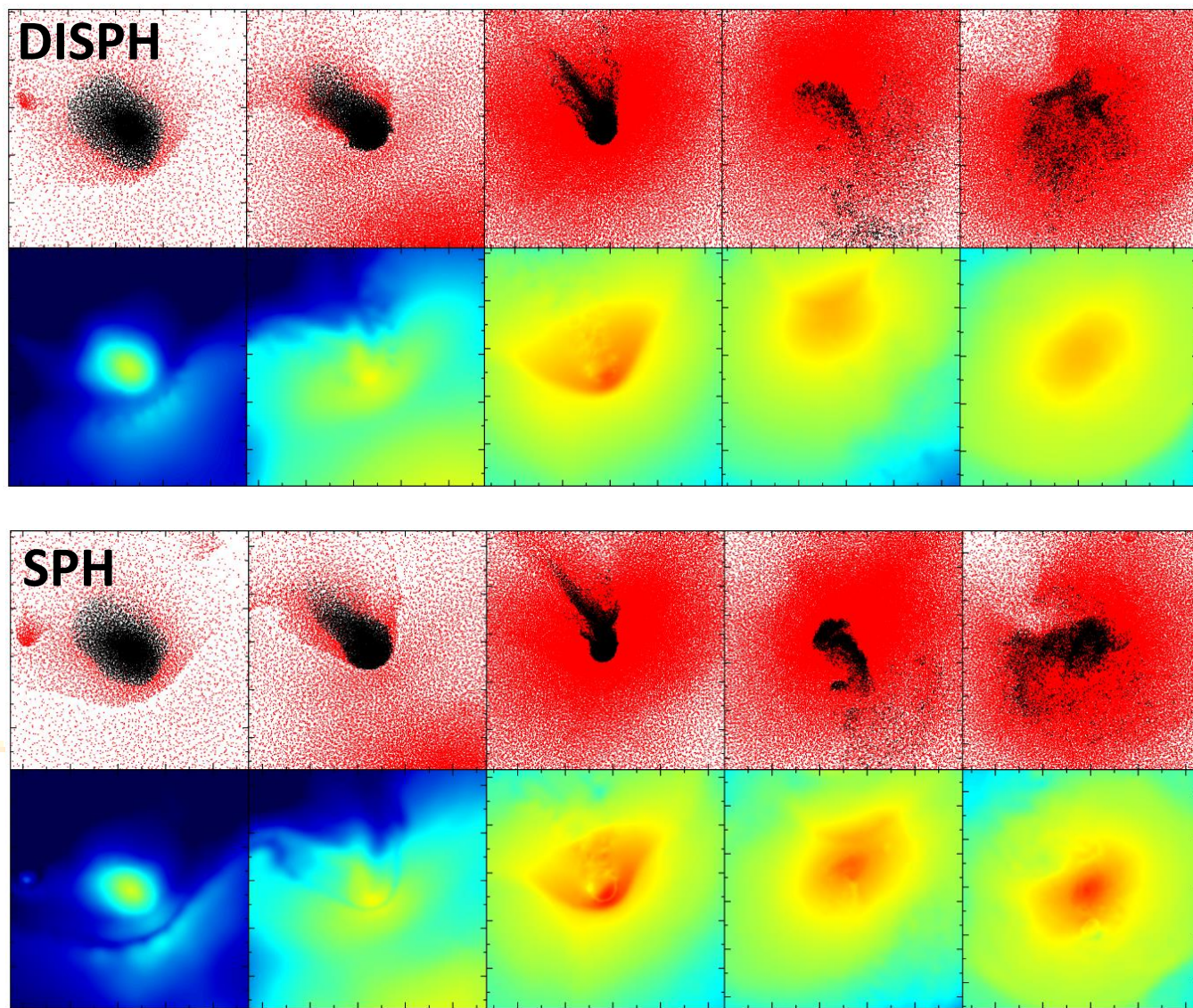
- **DISPH** の結果は AREPO/GIZMO の結果と良く一致
 - 分解能によらない
- 高分解能版 **SSPH** はコアなし
 - 非物理的表面張力によるエントロピー生成の阻害



Averaged Core Entropy



低エントロピークランプ周りの の非物理的表面張力



- SSPH の計算ではクランプとハローの間にギャップが発生→ギャップがクランプをラム圧から守る
- DISPH の計算ではギャップはない

Contents



- Standard Smoothed Particle Hydrodynamics 法から
Density independent Smoothed Particle Hydrodynamics 法へ
- サンタバーバラクラスターテスト
- DISPH 銀河形成シミュレーション

ASURA



- **C (C99) + MPI**
- **Domain decomposition: ORB**
- **Gravity: Parallel Tree+GRAPE**
 - Phantom-GRAPE (Tanikawa+2012)
 - Symmetrized softening for tree (Saitoh & Makino 2012)
- **Hydro : Smoothed Particle Hydrodynamics**
 - DISPH (Saitoh & Makino 2013)
- **Time integrator: Leap-frog**
 - + Individual time steps
 - + Time-step limiter (Saitoh & Makino 2009)
 - + FAST (Saitoh & Makino 2010)

Models



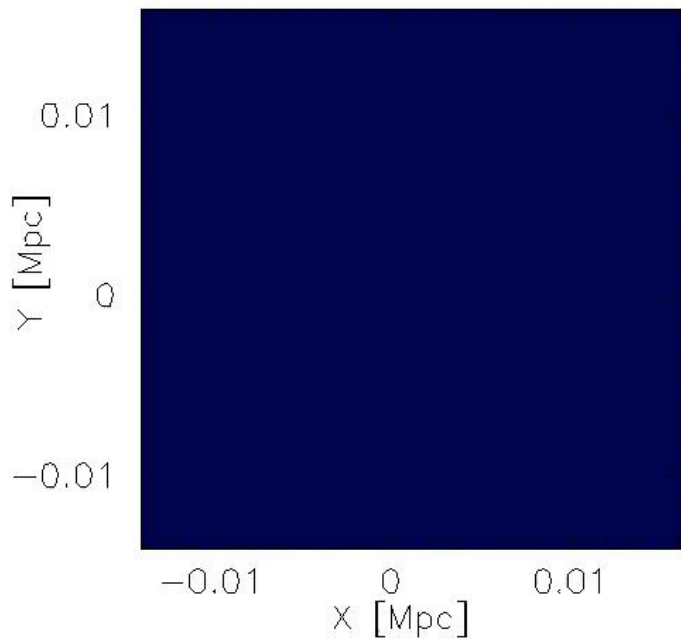
- **Cooling/Heating functions**: Cloudy c13.03 + Haardt & Madau (2012) UVB + Rahmiti et al (2013)'s self-shielding model (extended to $z \sim 15$)
- **Star formation**: High density/low temperature threshold model (Saitoh et al. 2008)
- **Feedback & Chemical evolution**: Type II/Ia/AGB (CELib, Saitoh 2016, in prep.)
 - The Chabrier IMF (Chabrier 2003)
 - The Susa (Pop III) IMF for extremely low-metal stars (Susa et al. 2013)

Init condition/ Runs/resolutions

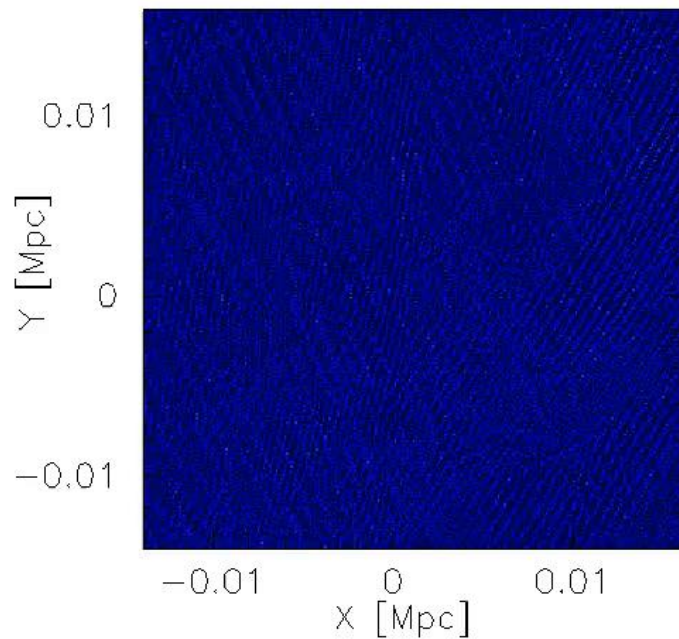
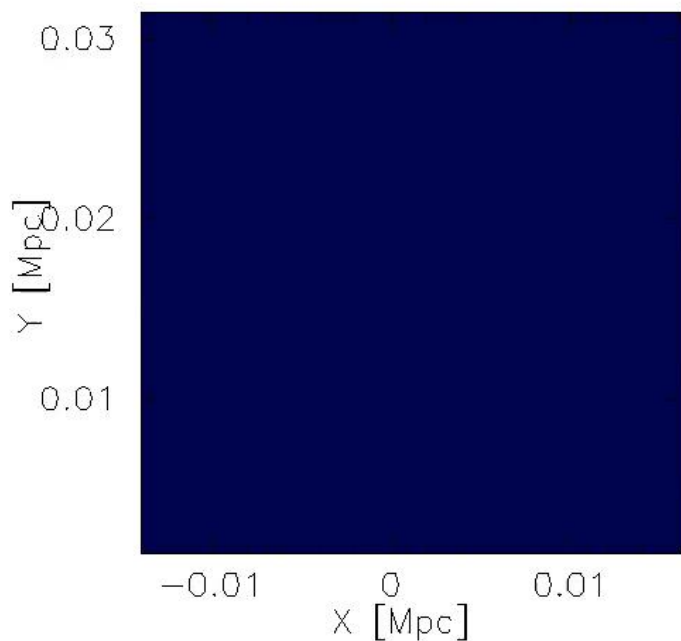


- Initial condition
 - Zoom-in 初期条件(Planck cosmology params)
 - 半径 $\sim 18\text{Mpc}/h$ 、解放境界
 - $M_h \sim 10^{12} M_\odot @ z=0$
- Two runs
 - DISPH
 - SSPH
- Some parameters
 - Mass: $\sim 10^6 M_\odot$ for gas
 - Softening: 50 pc for gas, 100 pc for DM

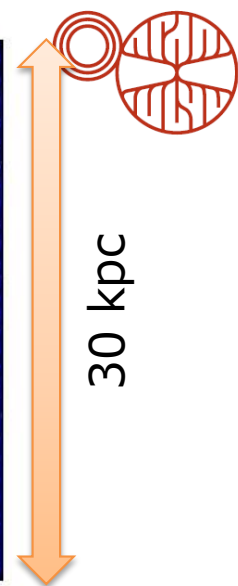
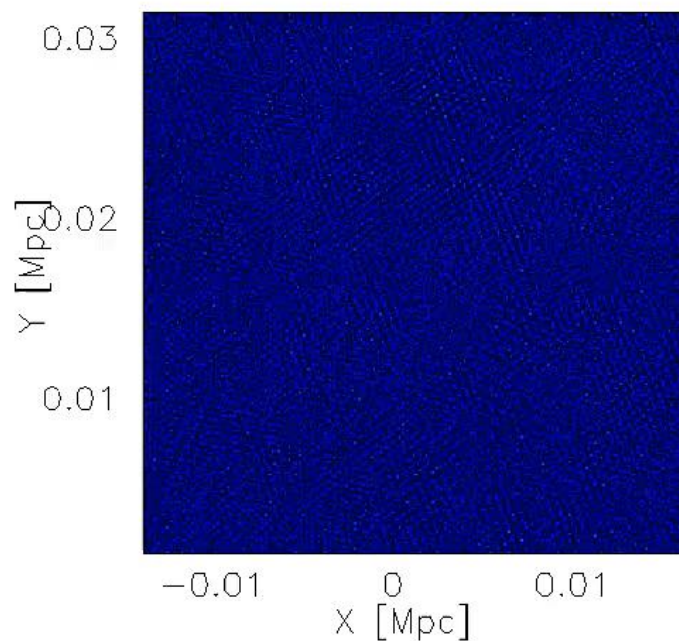
DISPH



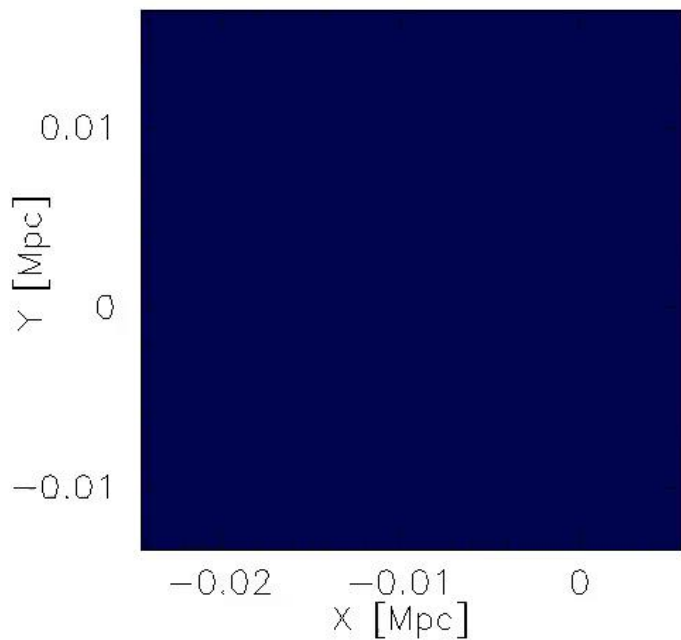
星



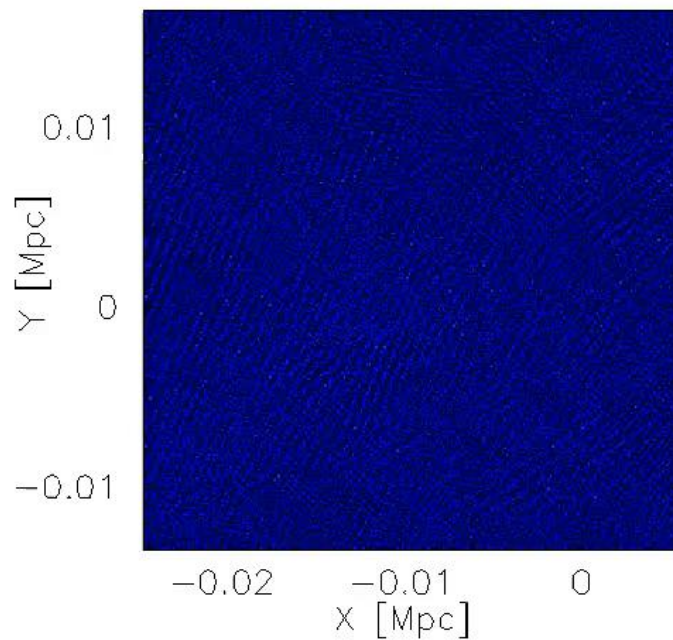
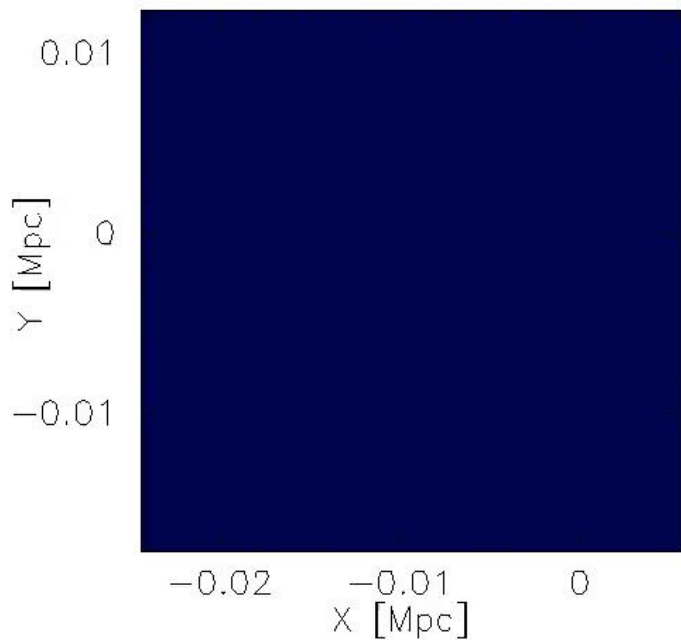
ガス



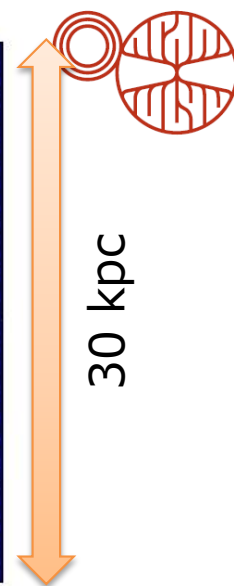
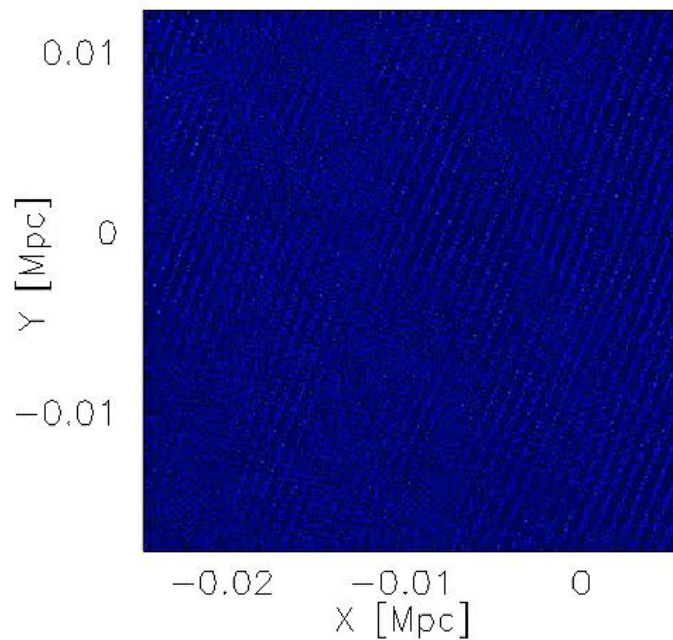
SSPH



星



ガス

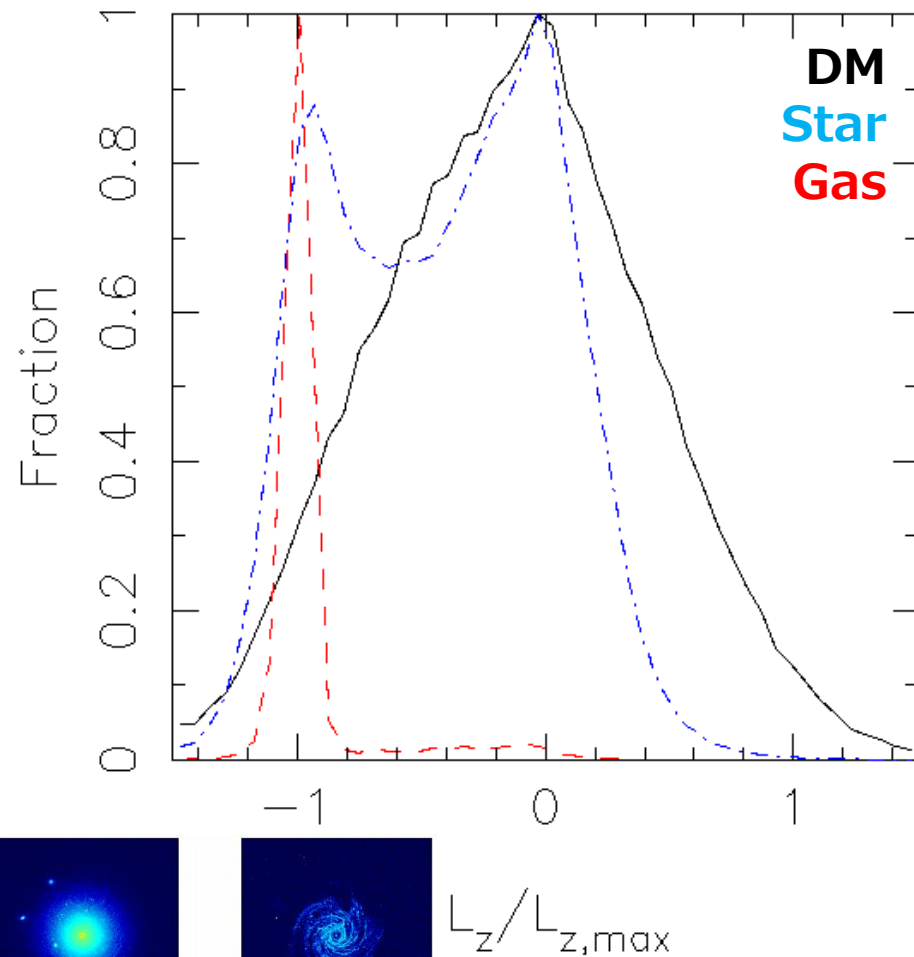
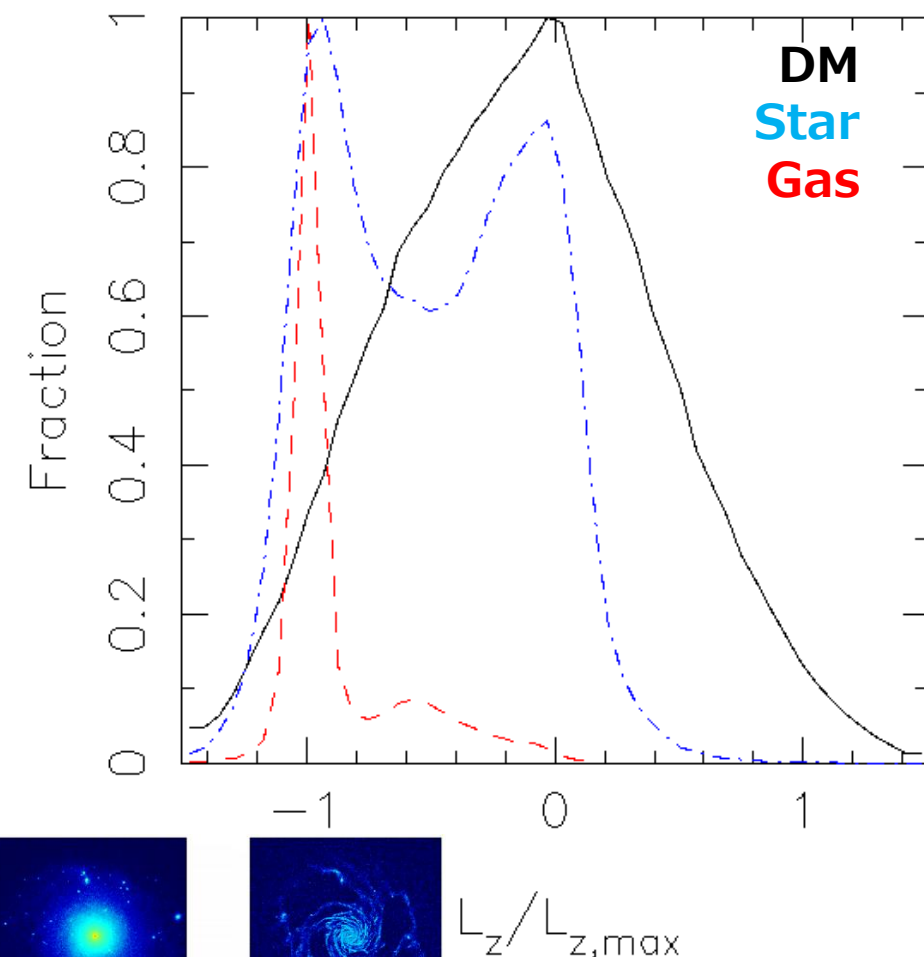


A.M. distributions

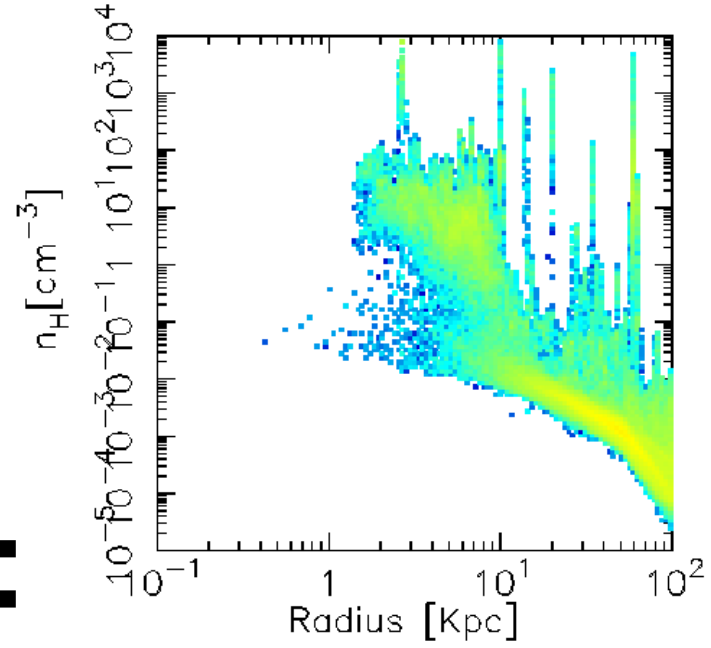
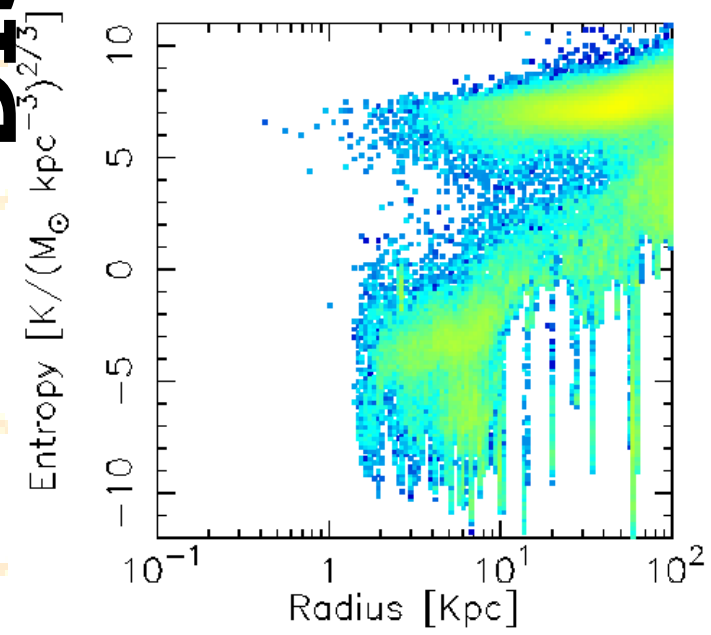


DISPH

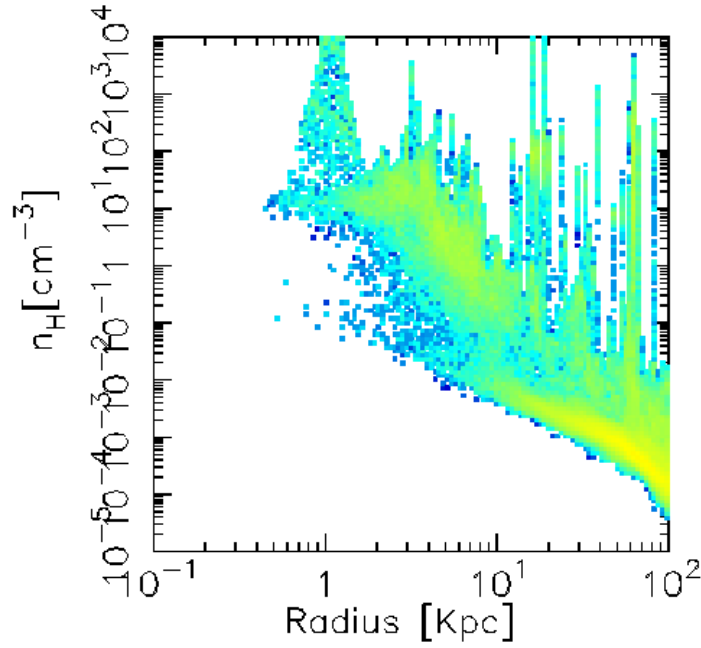
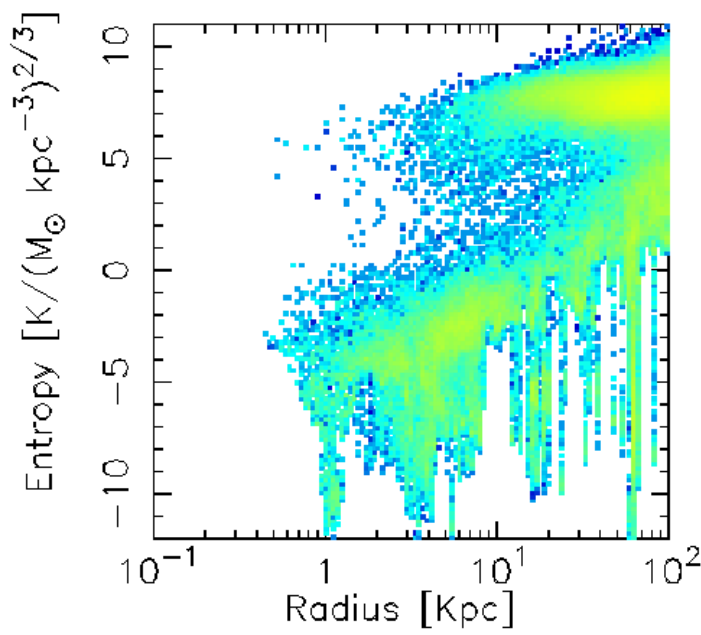
SSPH



DISPH



$Z=4.3$



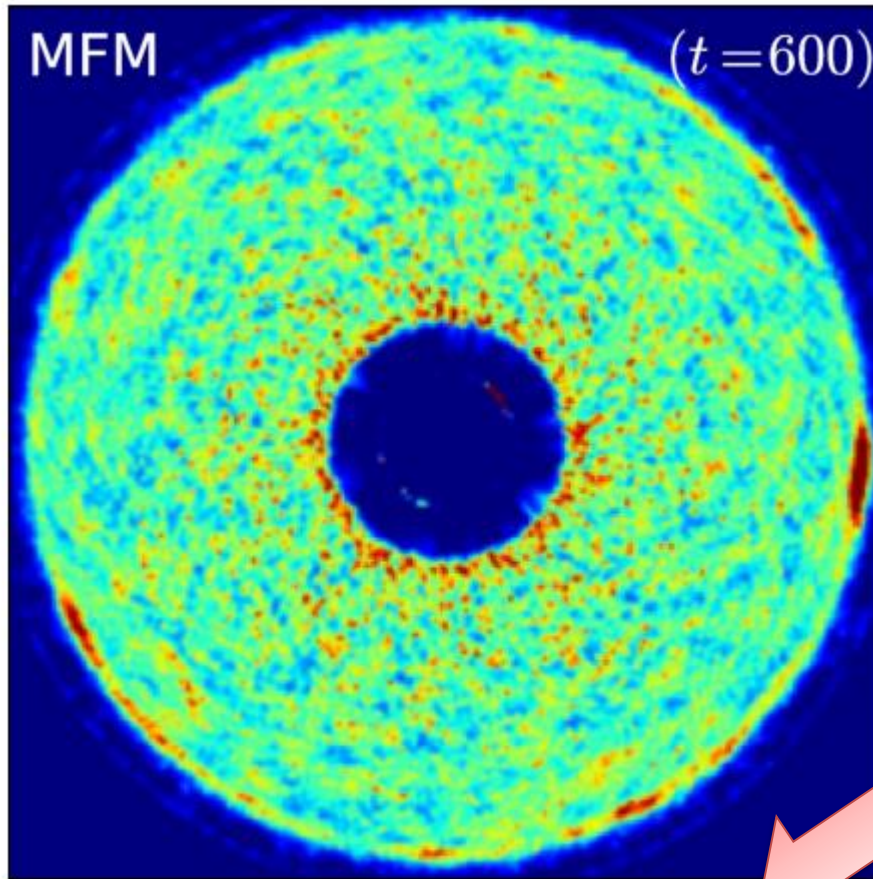
SSPH

Gizmo?



- Hopkins (2015) のメッシュフリー法

- Higher special order
- Riemann solver for shock



, at time $t = 600$ (not a typo)!

～100回転ぐらい保つ

Figure 7. Keplerian disc as Fig. 6, at time $t = 600$ (not a typo)! The inner ($r \sim 0.5$) disc has executed >250 orbits, at this time, without decaying or disrupting.

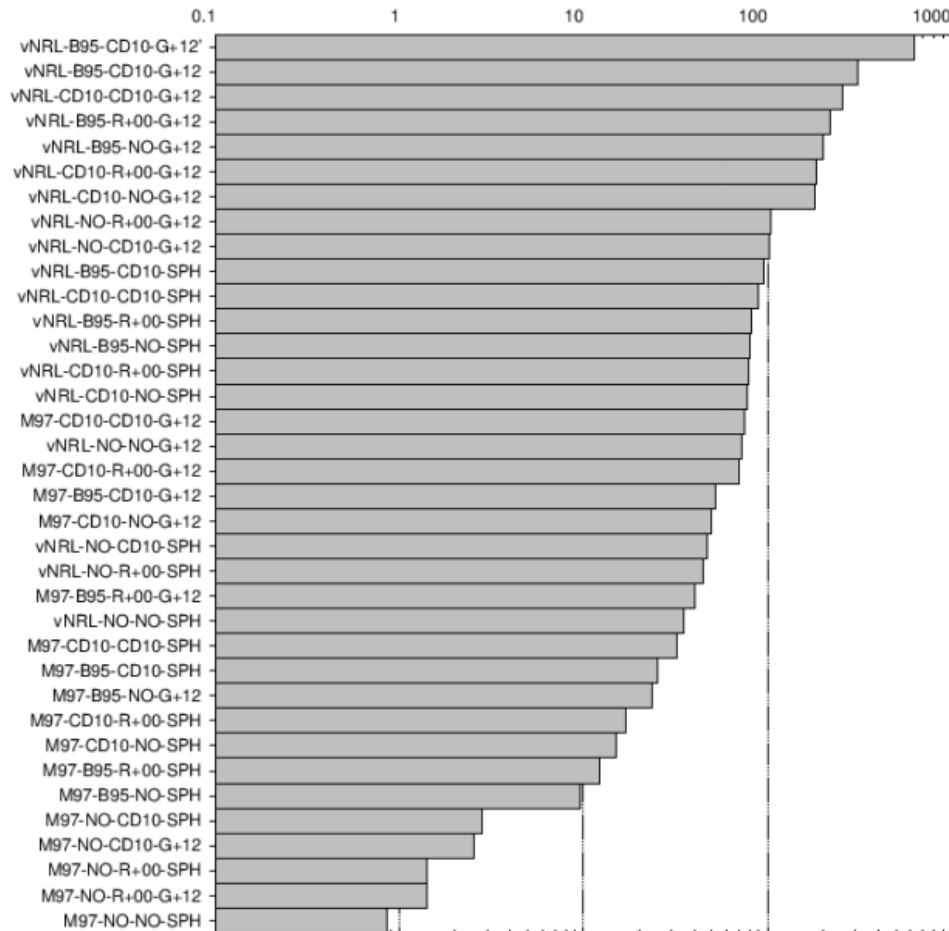
Artificial Viscosity tests



- AV の組み合わせからベストを探す

Type	Abbreviation	Equations	Reference
Form of AV	vNRL	(1)	von Neumann & Richtmyer (1950); Landshoff (1955)
	M97	(6)	Monaghan (1997)
Shock indicator	No	No	Do not use
	R+00	(16)	Rosswog et al. (2000)
	CD10	(18)-(21)	Cullen & Dehnen (2010)
Shear switch	No	No	Do not use
	B95	(22)	Balsara (1995)
	CD10	(25)-(27)	Cullen & Dehnen (2010)
$\nabla \cdot v$	SPH	(3)	Lucy (1977)
	G+12	(4)	García-Senz et al. (2012)

- 最も良いもので100回転以上
- SSPH/DISPH どちらでも有効



まとめ



- 圧力を使った定式化をした SPH 法(DISPH)は、接触不連続面をより正しく扱える
- サンタバーバラクラスターテストに DISPH を適用すると、エントロピーコアが出来る
 - コアのサイズはメッシュ法より小さく、AREPO/GIZMO とよく一致
- Cooling/heating, SF, FB を考慮した銀河形成シミュレーションでも、DISPH/SSPH で構造に大きな違い
 - SSPH の非物理的表面張力はここでも大きな問題
 - 今後もDISPHで