

バリオンとCDMの相対速度が 初期構造形成に及ぼす影響

2016.10.21 修士2年 佐々木さゆり

- ✓ Introduction
- ✓ Method
- ✓ Test
- ✓ Cosmological な Initial condition
- ✓ Result
- ✓ Summary & Prospect

✓ Introduction

- 宇宙の階層構造：小さな構造を元に大きな構造が階層的にできる
宇宙の進化を説明できるモデル  Λ CDMモデル
(バリオン・CDM・宇宙項 Λ)

しかし

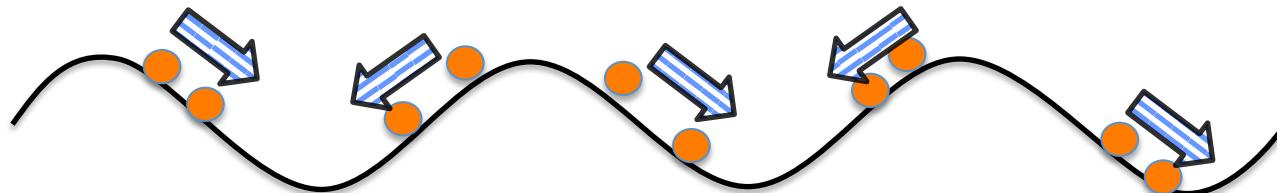
 初代星の形成過程、宇宙の再電離 等は明らかになっていない
- CDM-バリオン間の相対速度 (Tseliakhovich & Hirata (2010))
 - ☆再結合期以前 バリオンは光子とトムソン散乱によって強く結合
CDMは揺らぎの成長を始める
 - ☆再結合期後 バリオンは光子から独立
再結合期以前の運動の違いからバリオンはCDMに対し相対速度を持つ

✓ Introduction (Tseliakhovich & Hirata (2010))

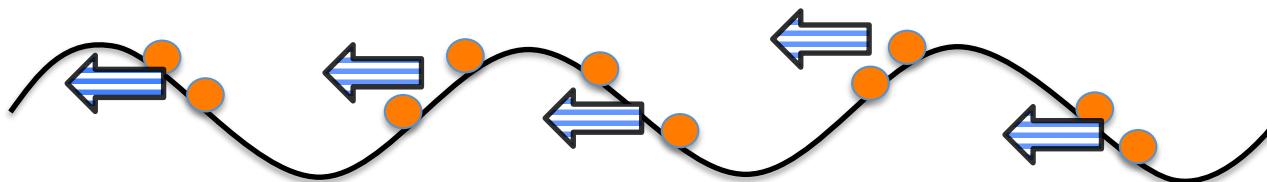
- 相対速度があると…

バリオンはCDMのポテンシャルに落ち込みにくくなる
ゆらぎの成長が抑制される

相対速度なし



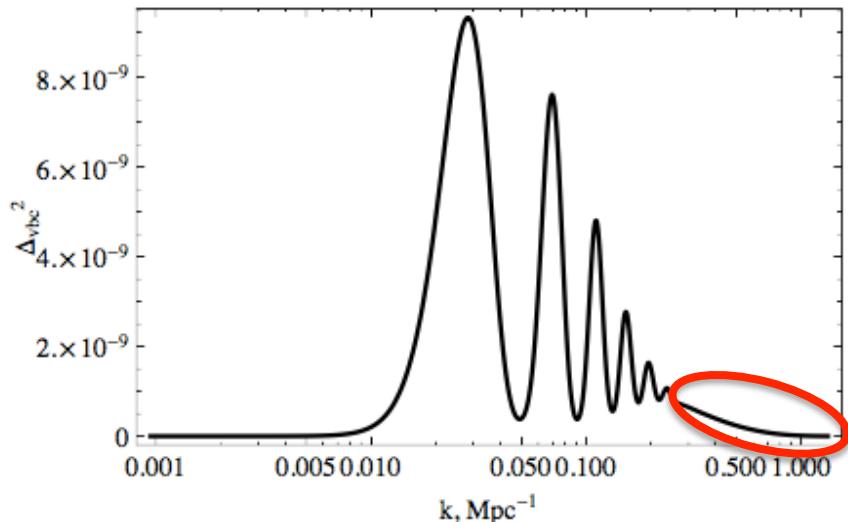
相対速度あり



→ 初期の構造形成に影響を与える

✓ Introduction (Tseliakhovich & Hirata (2010))

相対速度のパワースペクトル



$k < 0.5 [\text{Mpc}^{-1}]$ でパワースペクトルが減少
→ 数 [Mpc] 以下で相対速度が一様とみなせる

初期小スケール ($\sim 10 [\text{kpc}]$) で、
バリオンとダークマターの間に
一定の相対速度があるような構造の
成長を考える必要がある

$$\frac{\partial \varrho}{\partial t} + 3 \frac{\dot{a}}{a} \varrho + \frac{\dot{a}}{a} \nabla \cdot (\varrho \mathbf{v}) = 0$$

連続の式

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \frac{\dot{a}}{a} \mathbf{v} + \frac{1}{a} (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{a} \nabla \Phi - \frac{1}{a \varrho} \nabla p$$

Euler方程式

線形理論では速度場の項は
非線形項として無視されている
しかし、上のような理由から無視できなくなってくる。

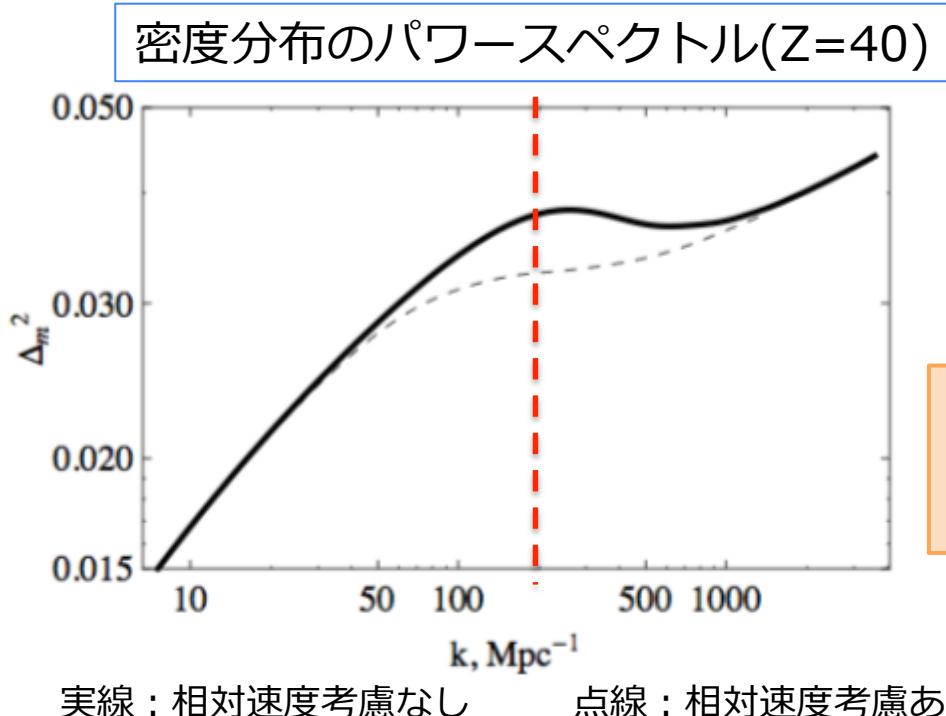


$$\frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} + 2 \frac{\dot{a}}{a} \frac{\partial \delta}{\partial t} - \frac{\Delta(\delta p)}{a^2 \bar{\varrho}} = \frac{4\pi G}{c^2} (\bar{\rho}_{tot} \delta_{tot} + 3 \delta p_{tot})$$

揺らぎの発展方程式

✓ Introduction (Tseliakhovich & Hirata (2010))

○どれほどのスケールでどんな影響が出てくるのか？



- ◆ $k > 40 \text{ Mpc}^{-1}$
“相対速度あり” の密度分布が減少
- ◆ $k \sim 200 \text{ Mpc}^{-1}$
最も差が大きく、約15%の減少

相対速度の影響
小スケール(10~40kpc程)で
密度分布のパワースペクトルが減少する

$10^6 \sim 10^7 M_{\odot}$ 程度で影響が出る

✓ Method

重力(N体) + 流体力学の計算

○重力(N体)計算

PM-Tree法

○流体力学の計算

SPH(Smoothing Particle Hydrodynamics)法

✓ Method

○重力(N体)計算

PM法：領域を細かくメッシュに分け、
そのメッシュ上の重力ポテンシャルを
計算する方法。

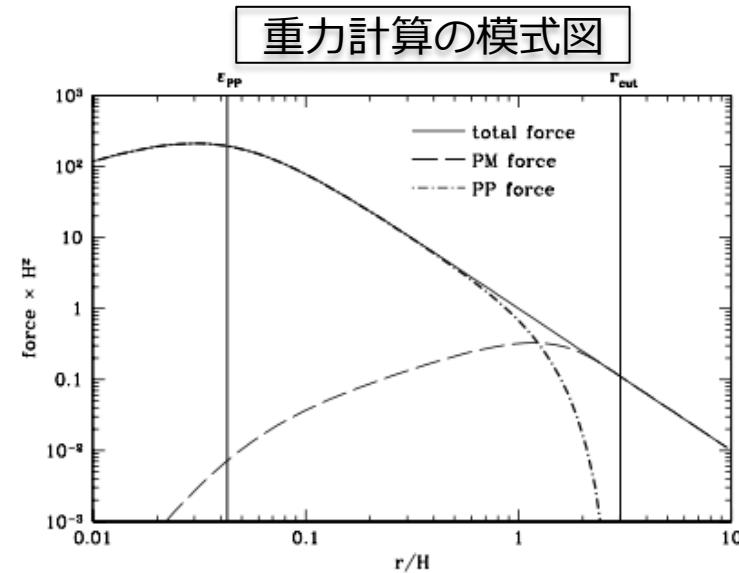
Tree法：ある程度遠くの粒子からの相互
作用をまとめて計算する方法。

PM-Tree法：PM法・Tree法を組み合わせたもの。

遠距離の相互作用をPM法、近距離の相互作用をTree法を用いる

PM法のみではメッシュ間隔より短い距離で重力がなまってしまうため、

Tree法で求めた近距離の重力を足し上げ、解像度を上げる。



✓ Method

○ SPH法について

粒子の周りにkernelと呼ばれる幅をもたせる

→近傍粒子との重ね合わせにより流体を表す

利点：粒子法による流体力学計算なため

同じ粒子を扱うN体計算と合わせやすい

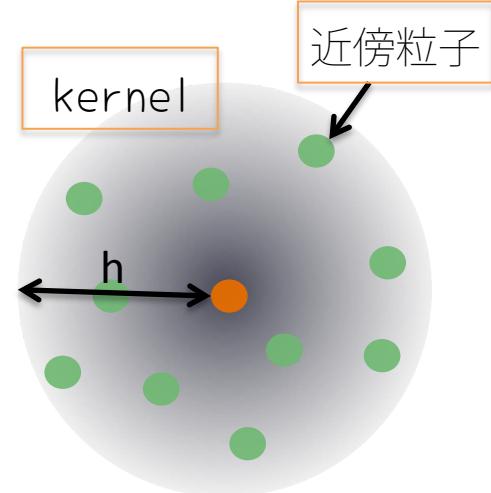
kernel関数：wendland kernel

$$W(r; h) = \begin{cases} \frac{1365}{64\pi}(1-s)^8(1+8s+25s^2+32s^3) & (s < 1.0) \\ 0 & otherwise \end{cases}$$
$$s = \frac{r}{h}$$

物理量 f のkernel内での平均値は

離散化させると

$$\langle f(\vec{r}) \rangle = \int f(\vec{r}') W(\vec{r} - \vec{r}'; h) d\vec{r}'$$
$$f_i = \sum_j f_j W(r_{ij}; h_i) \Delta V'_j$$

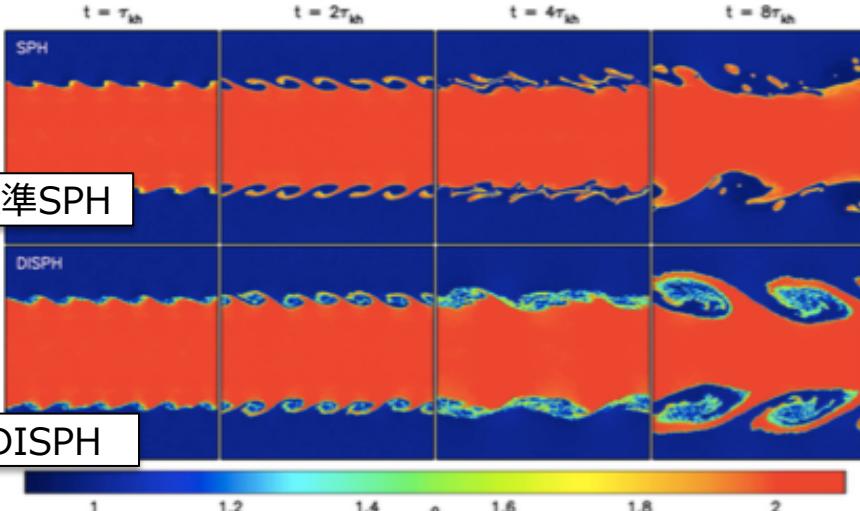


✓ Method

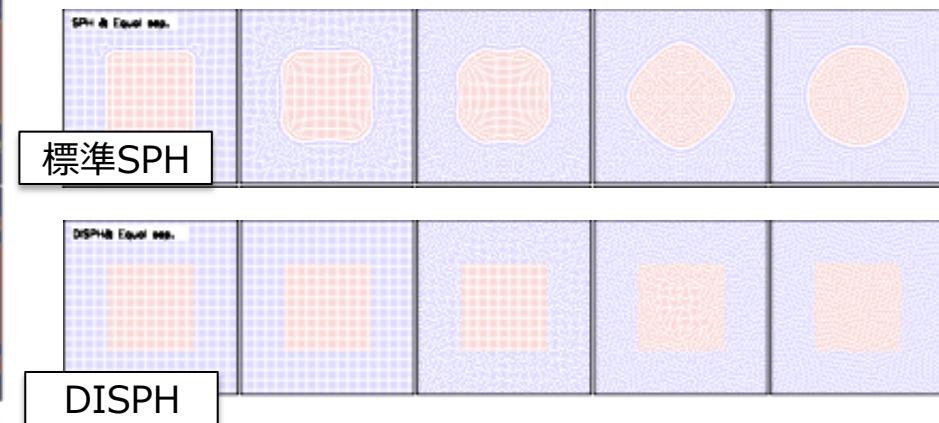
○ SPH法 → DISPH法

なぜ 標準SPH法は密度を陽に用いるため、密度に飛びがある場合うまく解けない
→ 密度に陽に依存しない方法
→ Density Independent SPH(Saitoh & Makino (2013))

KH不安定性 Test



Hydrostatic Equilibrium Test



✓ Method

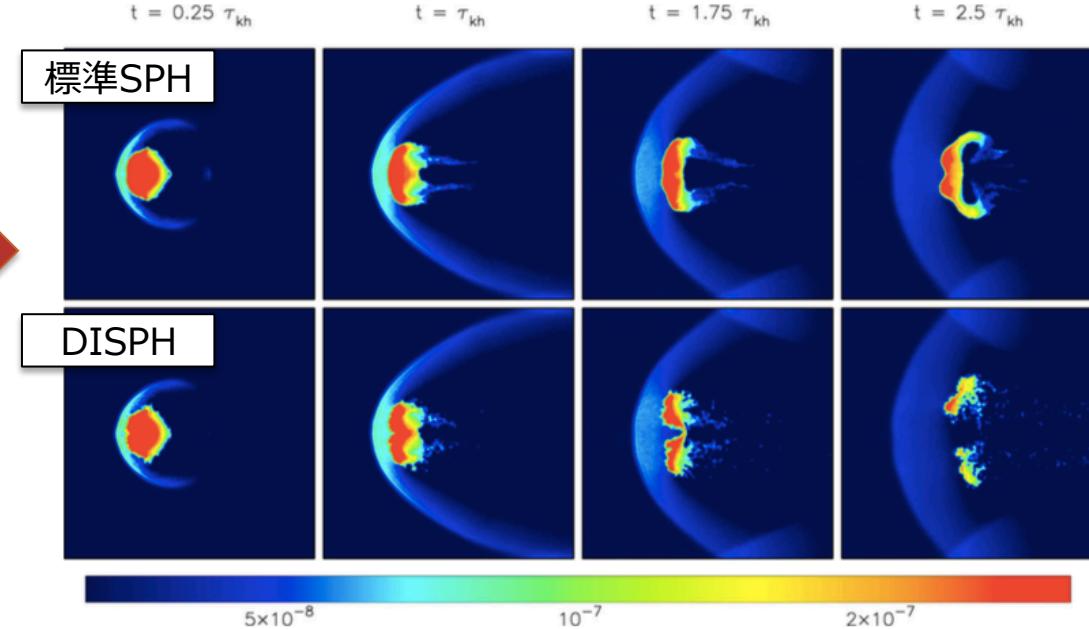
○ SPH法 → DISPH法

標準SPH：最後までCloudの形が残る

DISPH：不安定性の成長により
境界面から分解される

Euler codesによって得られる
結果と類似している

Blob Test (Saitoh & Makino (2013))



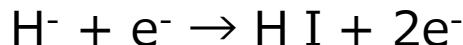
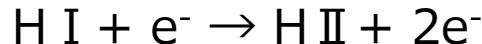
本研究：DMハロー中のバリオンと周囲のバリオンの間でのstrippingを正確に解きたい

✓ Method

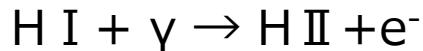
○ Chemical reaction

Hydrogen(atomic)

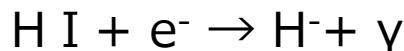
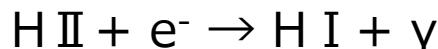
✧ Collisional ionization



✧ Photon ionization

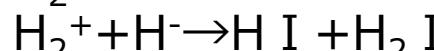
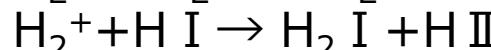
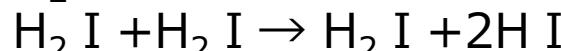
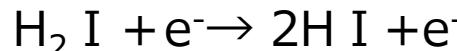
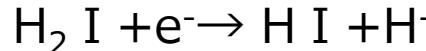
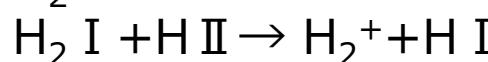
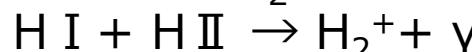
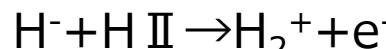
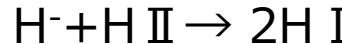
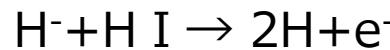
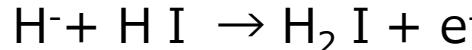


✧ Radiative recombination



Hydrogen (molecule)

✧ Collision



✓Test (標準SPHとDISPHの比較)

○Hydrostatic Equilibrium

圧力P=一定

速度を持たなければ密度が異なっても安定

Setup : 粒子数 64^3

(高密度領域と低密度領域とで

1粒子あたりの質量が異なる)

$$\rho = 1.0 \ P = 2.5$$

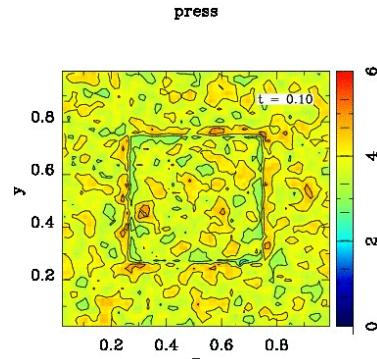
$$\rho = 2.0$$

$$P = 2.5$$

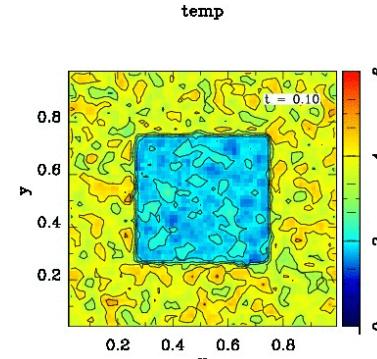
✓Test (標準SPHとDISPHの比較)

○Hydrostatic Equilibrium

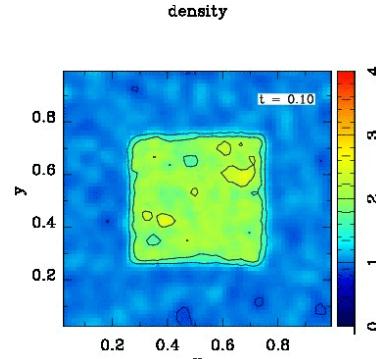
標準SPH



pressure

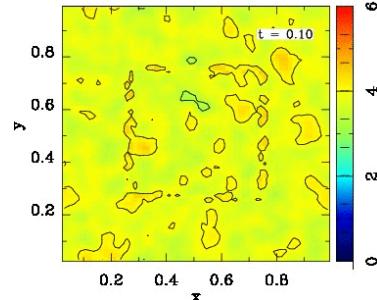


temperature

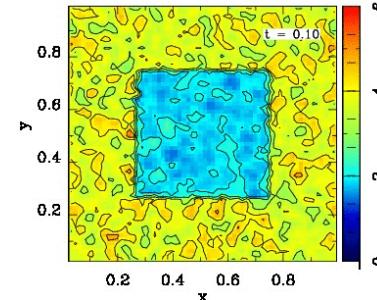


density

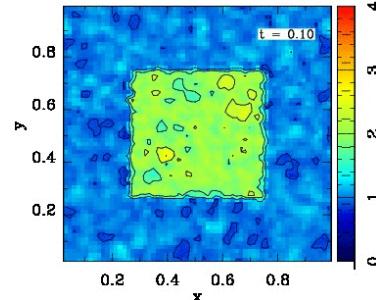
DISPH



pressure



temperature



density

✓Test (標準SPHとDISPHの比較)

○ Kelvin–Helmholtz Instability

密度の異なる流体が

相対速度を持ち水平移動しながら

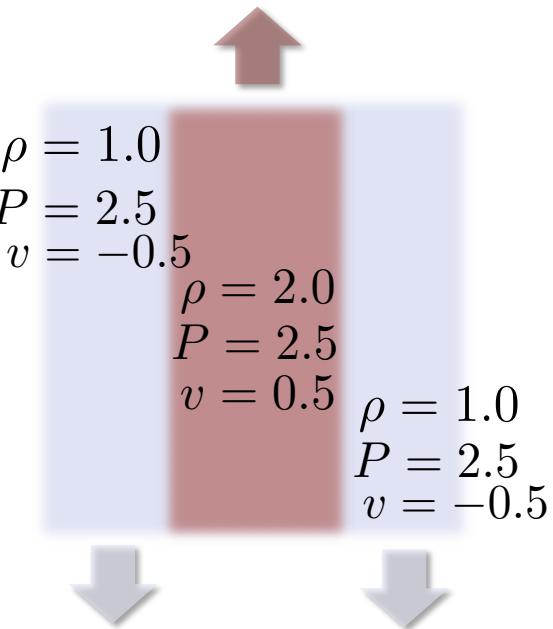
接しているときに起こる不安定性

Setup : 粒子数 64^3

(高密度領域と低密度領域とで1粒子あたりの質量が異なる)

領域の境界付近で速度のperturbation

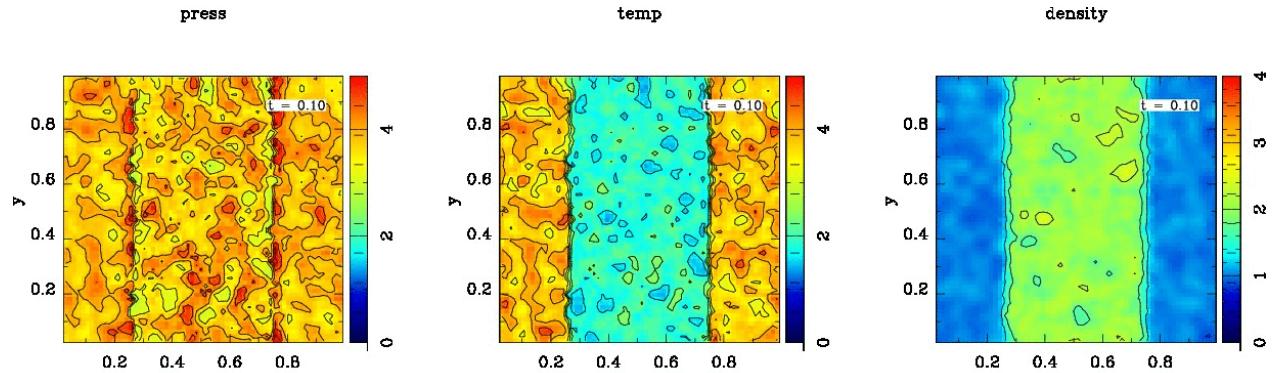
$$\Delta v_x = 0.1 \sin(4\pi y) \text{ を与えている}$$



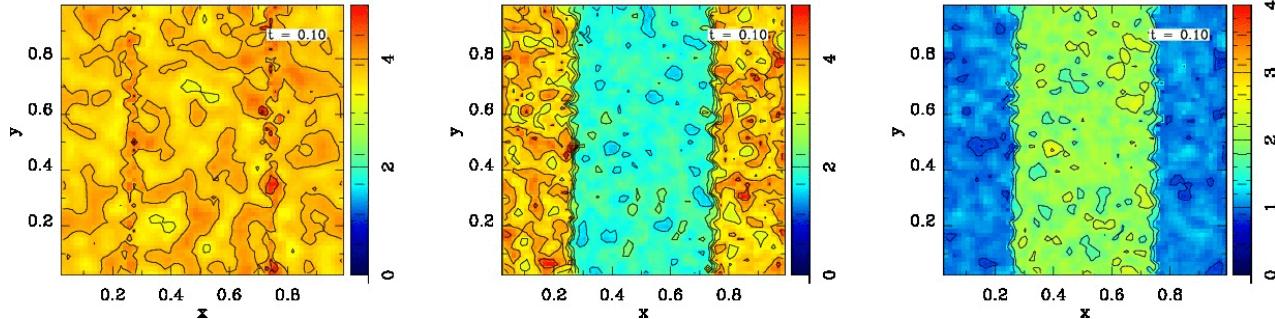
✓Test (標準SPHとDISPHの比較)

○Kelvin-Helmholtz Instability

標準SPH



DISPH

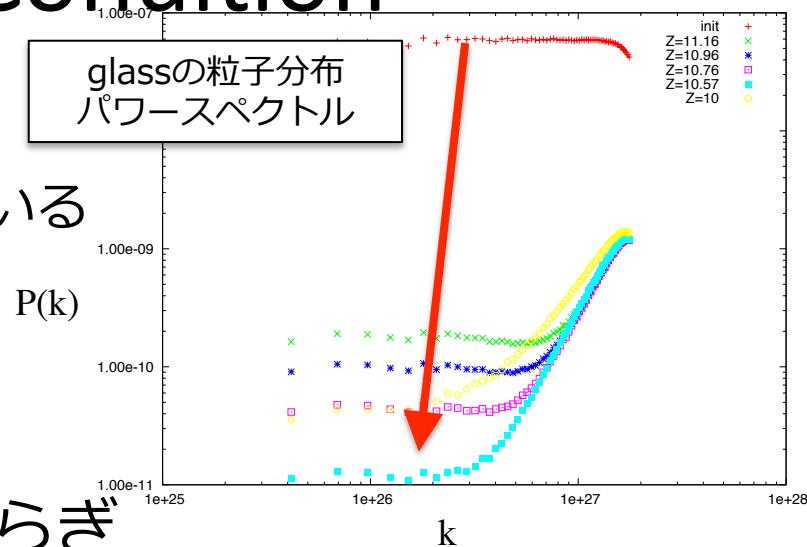
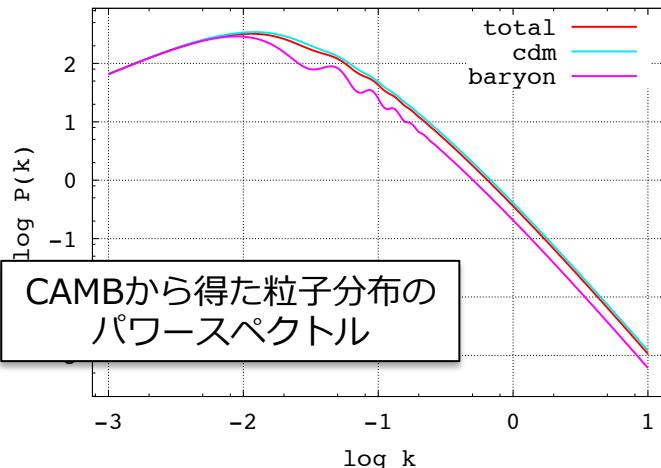


✓ CosmologicalなInitial Condition

○Glass

shot noiseが小さい一様な粒子分布を用いる

- ✧ Box内に粒子を一様にばらまく
- ✧ 重力を斥力として宇宙論的なN体計算



○初期密度ゆらぎ

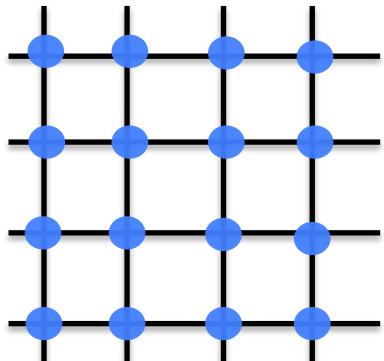
- ✧ CAMB*により CDM・バリオンのパワースペクトルを求める
- ✧ 求めたパワースペクトルを再現する密度場・速度場を grafic を用いて計算する
- ✧ 速度場を用いて glass 分布の粒子位置を Shift する

* CAMB : Code for Anisotropies in the Microwave Background

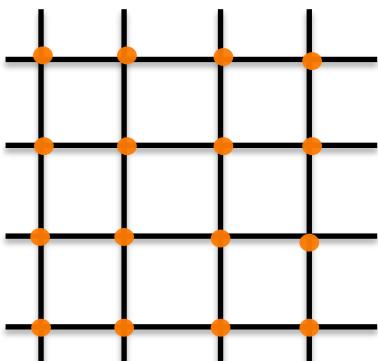
✓ CosmologicalなInitial Condition

○なぜglass分布から初期条件を作ったか？

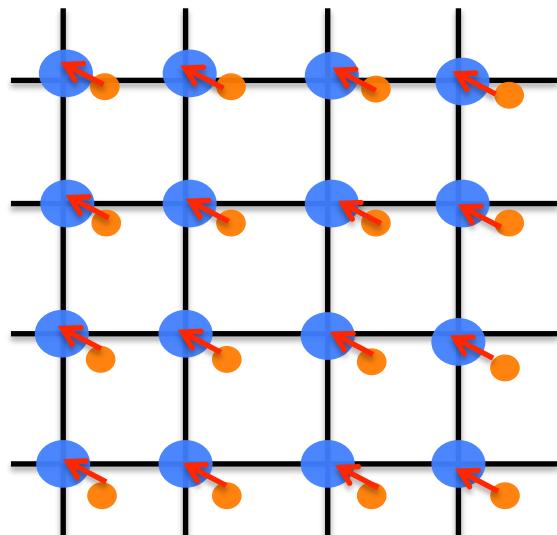
(1)もしメッシュ状に粒子を分布していたら…



CDMの粒子分布



バリオンの粒子分布

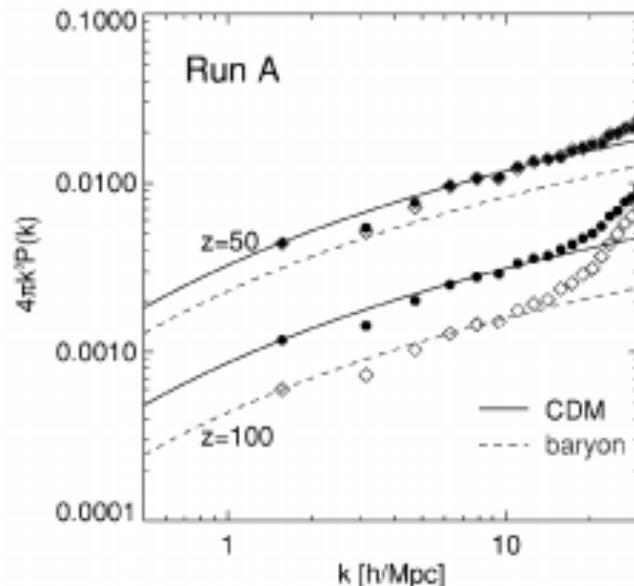


✓ CosmologicalなInitial Condition

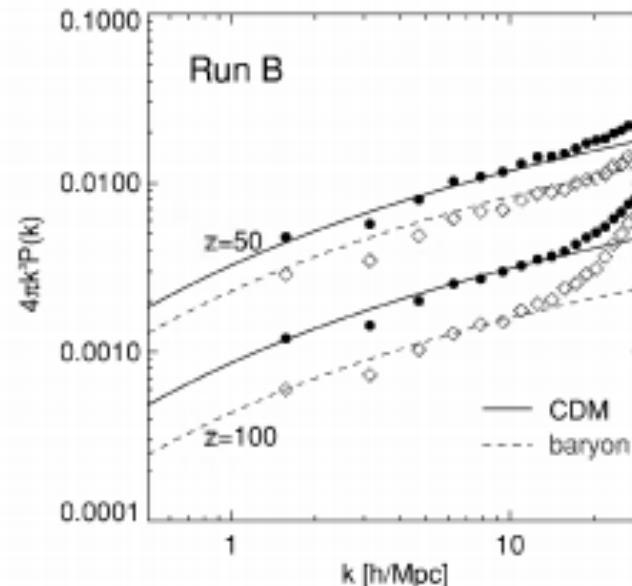
○なぜglass分布から初期条件を作ったか？

(2) CDMとバリオンで同じglassを用いたら？

Yoshida, N. et 2003



同じglassから初期条件を作った場合



別々のglassから初期条件を作った場合

✓ CosmologicalなInitial Condition

○宇宙論パラメータ

Planck衛星が観測したCMBの温度ゆらぎから求めた宇宙論パラメータ

$$h = 0.678 \quad \Omega_m = 0.308 \quad \Omega_\Lambda = 0.692 \quad \Omega_b = 0.0484$$

○Setup

粒子数 : 2×128^3 (現在)

L_{box} : $500 h^{-1}$ (kpc)

Redshift z : 100

σ_8 : 8.23

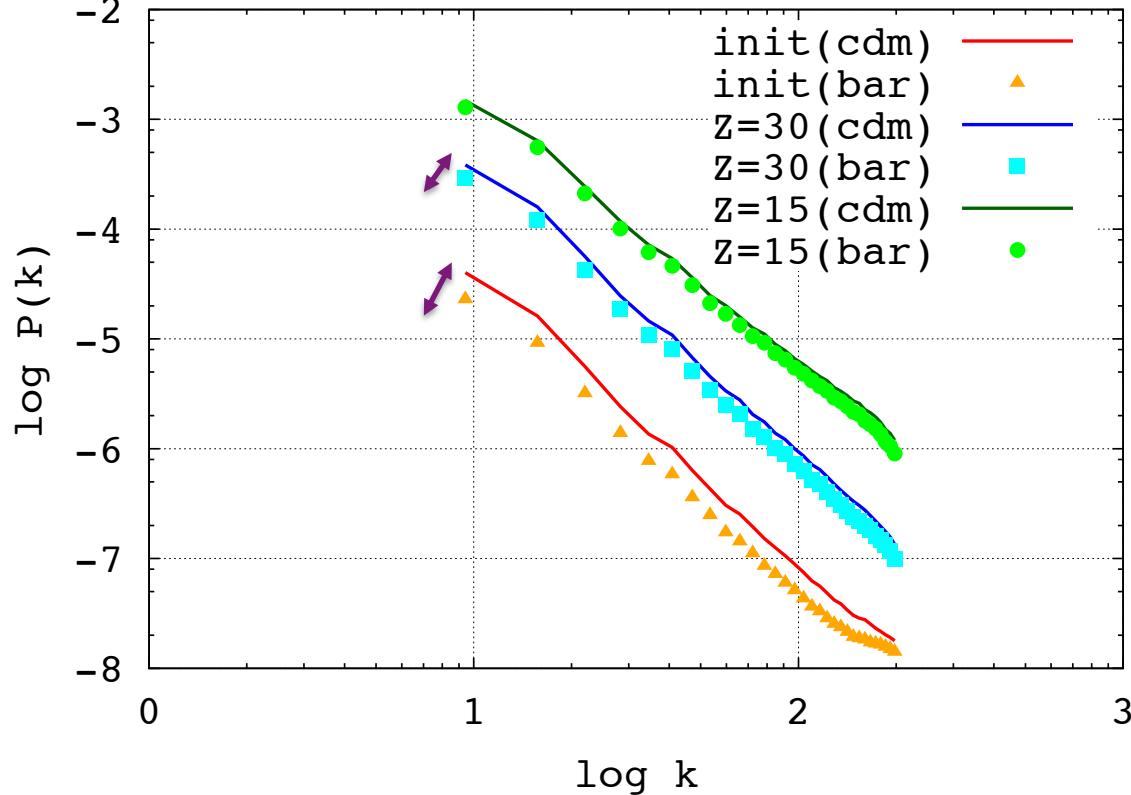
1 粒子あたりの質量(バリオン) : $1.04 \times 10^3 M_\odot$

1 粒子あたりの質量(CDM) : $6.0 \times 10^3 M_\odot$

※相対速度はまだいれていません…。

✓ Result

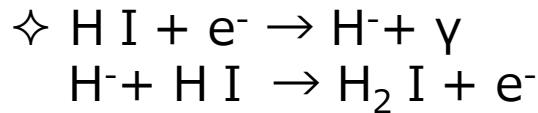
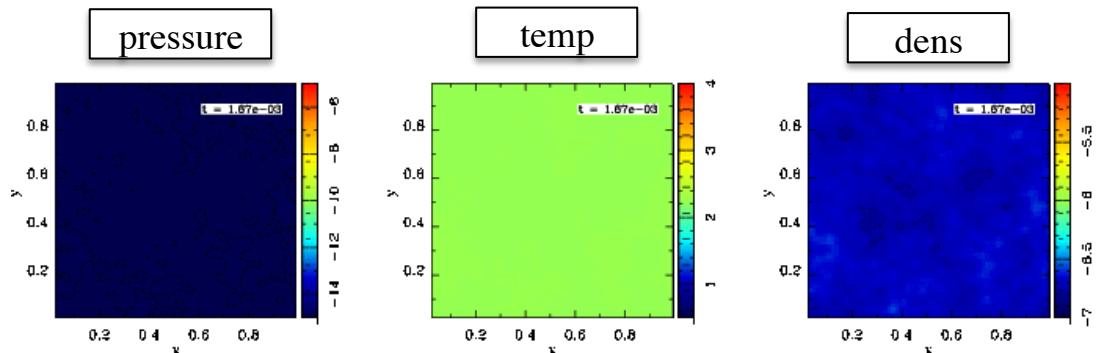
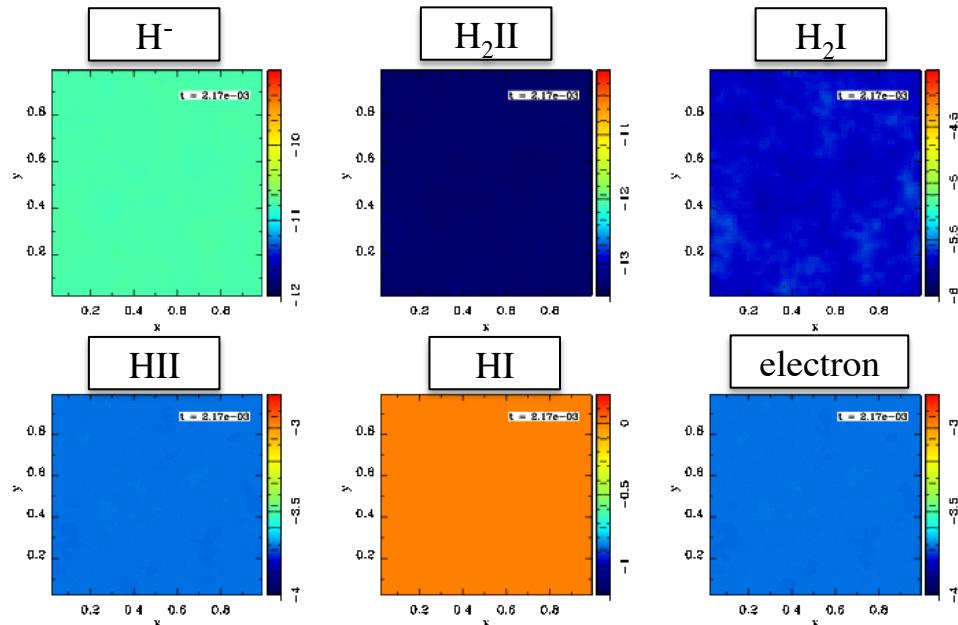
○ CDMとバリオンのパワースペクトル



✓ Result

○Chemical reaction

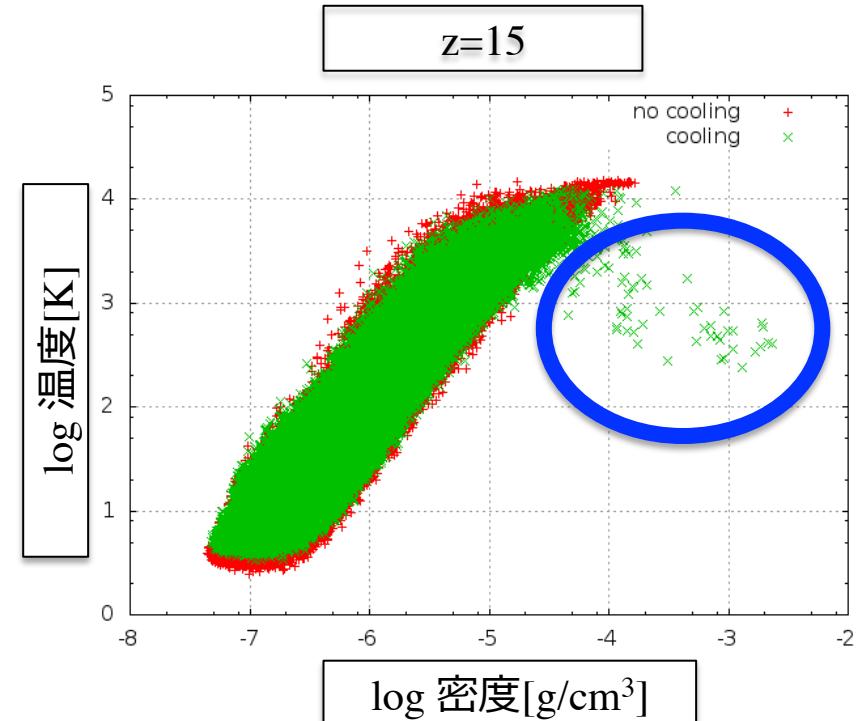
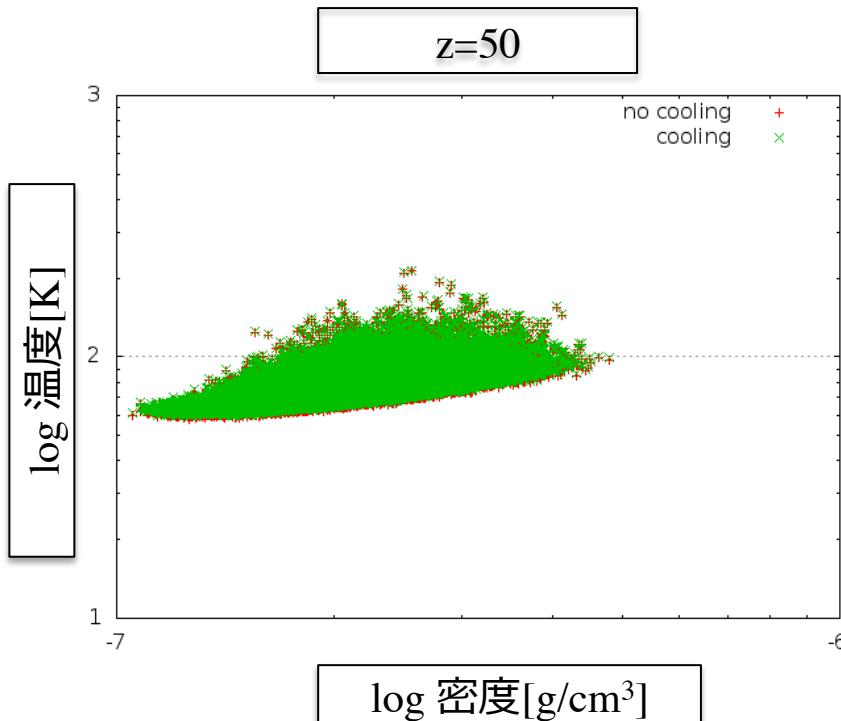
Z=100~10での変化の様子



✓ Result

○ Cooling

冷却なし
冷却あり



✓ Summary & Prospect

- SPH法・DISPH法を比較したTestにおいて密度の異なる境界面で
DISPH法がSPH法に比べて有効であることがわかった
- glassを用いて宇宙論的な初期条件を作成した
- Z:100~10でのChemical reactionの様子を確認
Coolingによりz=15あたりで温度の上昇が妨げられている部分を確認
→ バリオン粒子のChemical reaction、Coolingが導入できた
- 粒子数を 2×256^3 に増やす
- 初期条件のバリオン粒子に相対速度を与える

標準SPHの定式化

Lagrangianから運動方程式を導出する。

最小作用の原理から導くことで、エネルギー保存などが保証される。

- Kernelを用いた物理量 f の平均値(離散化)は $f_i = \sum_j^N f_j W(r_{ij}; h_i) \Delta V'_j$
 $\simeq \sum_j^N f_j W(r_{ij}; h_i) \frac{m_j}{\rho_j}$
- 系全体のLagrangianは $L(\vec{\dot{q}}, \vec{\dot{q}}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N m_i \vec{\dot{r}}_i - \sum_{i=1}^N m_i u_i$ u_i 単位質量あたりの内部エネルギー
 $\vec{q} = (\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_N, h_1, \dots, h_N)$
- Kernel内の質量が一定とう拘束条件 ϕ_i を定義すると
 $\phi_i \equiv \frac{4\pi}{3} \rho_i h_i^3 - M_{sph} = 0$ $M_{sph} = \bar{m} N_{\text{ngb}}$
- この拘束条件のもと Euler-Lagrange 方程式を求める

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \sum_{j=1}^N \lambda_j \frac{\partial \phi_j}{\partial q_i} \quad \lambda_j = \frac{3}{4\pi} \frac{m_i}{h_i^3} \frac{P_i}{\rho_i^2} [1 + \frac{3\rho_i}{h_i} (\frac{\partial \rho_i}{\partial h_i})^{-1}]^{-1}$$

標準SPHの定式化

- $\vec{q}_i = \vec{r}_i$ の場合のEuler-Lagrange方程式は $m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = \frac{\partial L}{\partial \vec{r}_i} + \sum_j \lambda_j \frac{\partial \phi_j}{\partial \vec{r}_i}$
- 第一項、第二項を変形しまとめると、運動方程式は

$$m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = - \sum_j^N m_j \frac{P_j}{\rho_j^2} [1 + \frac{h_j}{3\rho_j} (\frac{\partial \rho_j}{\partial h_j})]^{-1} \nabla_i \rho_j$$

$$\frac{d\vec{v}_i}{dt} = - \sum_j^N m_j [f_i \frac{P_i}{\rho_i^2} \nabla_i W(r_{ij}/h_i) + f_j \frac{P_j}{\rho_j^2} \nabla_j W(r_{ij}/h_j)]$$

$$f_i = [1 + \frac{h_i}{3\rho_i} (\frac{\partial \rho_i}{\partial h_i})]^{-1}$$

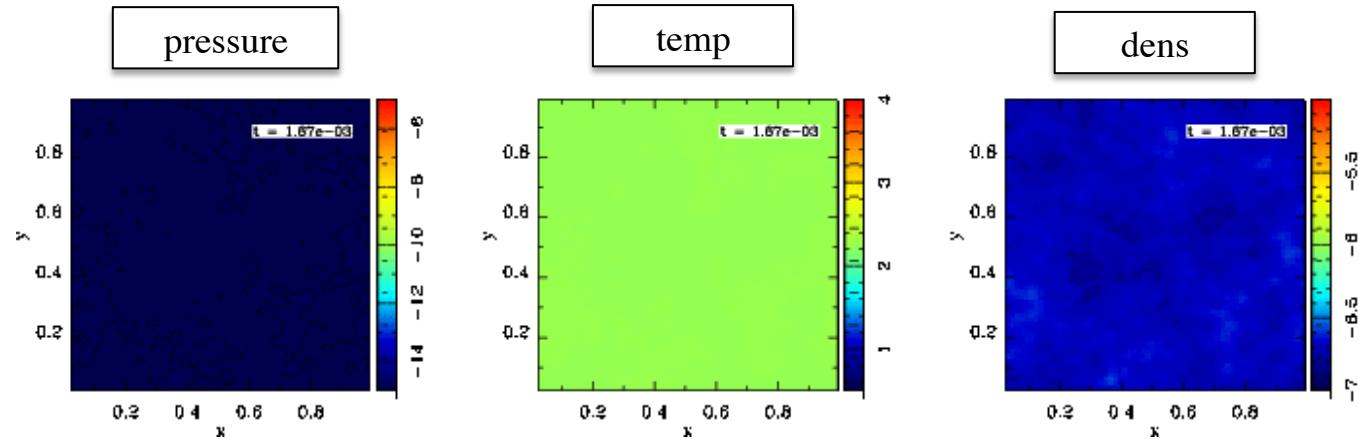
DISPHの定式化

- 標準SPHと同様に求めていくと、運動方程式は

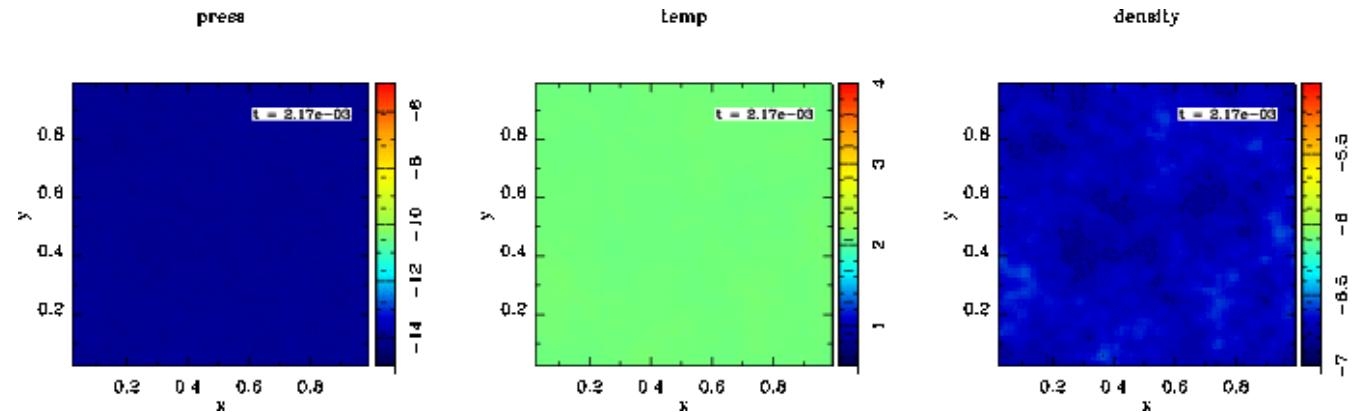
$$m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = - \sum_{j=1}^N (\gamma - 1)^2 m_j u_i u_j \left[\frac{f_{ij}}{P_i} \nabla_i W_{ij}(h_i) + \frac{f_{ij}}{P_j} \nabla_i W_{ij}(h_j) \right]$$

$$f_{ij} = 1 - \left[\frac{h_i}{3(\gamma - 1)n_i m_j u_j} \frac{\partial P_i}{\partial h_i} \right] \left(1 + \frac{h_i}{3n_i} \frac{\partial n_i}{\partial h_i} \right)^{-1}$$

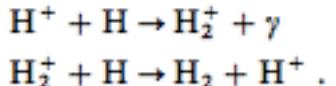
Coolingなし



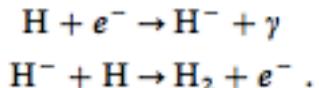
Coolingあり



Molecular hydrogen production proceeds via only two major mechanisms. In the H_2^+ channel, the proton acts as a catalyst:



In the H^- channel, the electron acts as a catalyst:



For redshifts higher than 200, CMB photons are energetic enough that the reaction $H^- + \gamma \rightarrow H + e^-$ neutralizes all H^- ions, and therefore the H^+ channel dominates for $z \gtrsim 200$. At lower redshifts, the H^- channel proceeds much more quickly than the H^+ channel and dominates H_2 production.

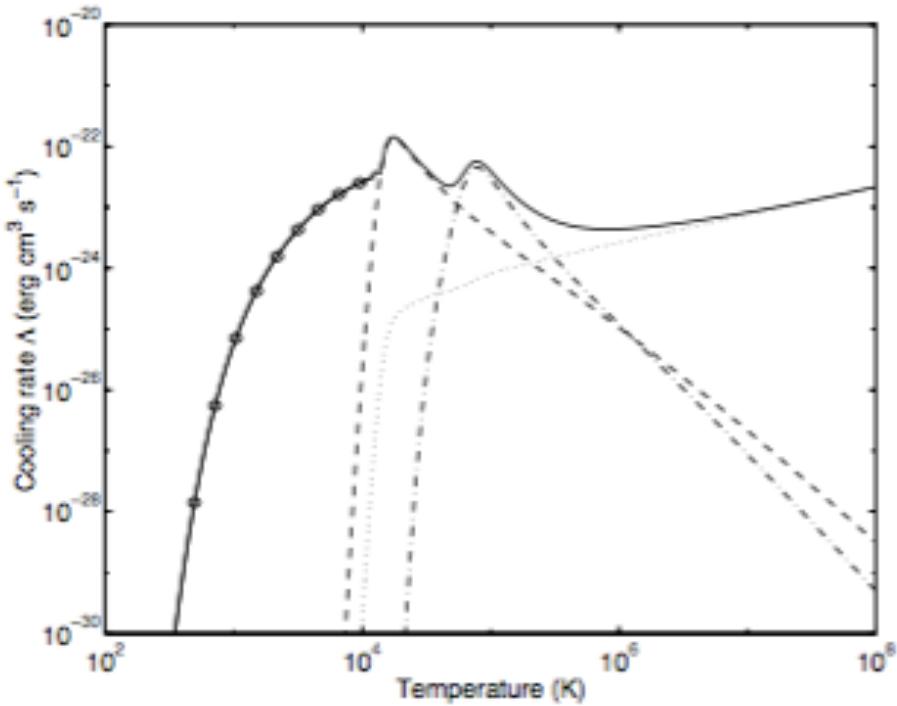


FIG. 1.—Cooling rates for Bremsstrahlung (dotted line), H (dashed line), and He (dash-dotted line) line cooling, and H_2 (circles) cooling. The e^- , H^+ , He^+ , and He^{++} abundances were computed assuming collisional equilibrium, and the H_2 fractional abundance was 3×10^{-4} , which is typical for early objects.