

# 多次元 輻射輸送・輻射流体力学シミュレーション

中本泰史 (筑波大学)

1. 輻射とは
2. 輻射輸送
3. 輻射流体力学
4. 最近の計算例
5. 今後

「多次元」輻射輸送・輻射流体力学は  
未熟・未発達！  
始まったばかり・黎明期にある！

参考書: 「Foundations of Radiation Hydrodynamics」 --- RHD , continuum  
Mihalas & Mihalas, 1999, Dover  
「Radiative Transfer in Moving Media」 --- 1D球対称 , line  
Sen & Wilson, 1998, Springer

# 1. 輻射とは

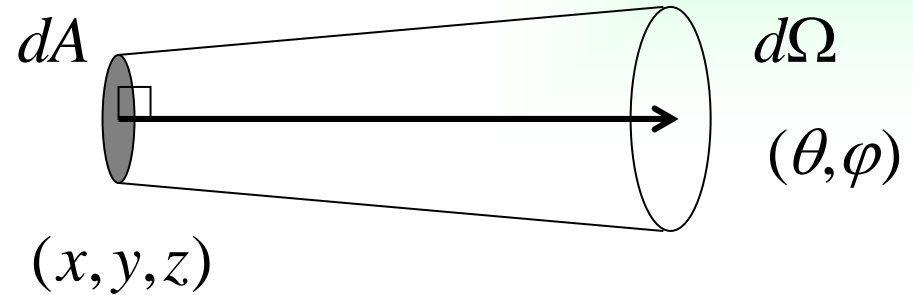
## 宇宙物理学における「輻射」の役割

1. 観測手段
2. 力(輻射圧, 輻射粘性)
3. エネルギー輸送(加熱・冷却, 電離・解離, 化学反応)

# 「輻射」の記述

輻射強度 (Intensity)  $I(x, y, z, \theta, \varphi, \nu; t)$

$$dE = I dt dA d\Omega d\nu$$



「光子」の分布関数との関係

6次元位相空間上の関数

$$I(\mathbf{x}, \mathbf{n}, \nu; t) = ch\nu \cdot \frac{h^3 \nu^2}{c^3} f(\mathbf{x}, \mathbf{n}, \nu; t)$$

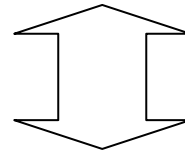
注:  $\mathbf{n}$  は, 光子の運動量  $\mathbf{p}$   
の極座標表示に対応する.

# 輻射輸送方程式の導出 (1)

## Boltzmann 輸送方程式

$$\frac{df}{dt} + \mathbf{v} \cdot \frac{df}{d\mathbf{x}} + \mathbf{F} \cdot \frac{df}{d\mathbf{p}} = \left( \frac{df}{dt} \right)_{\text{coll}}$$

## 輻射輸送方程式

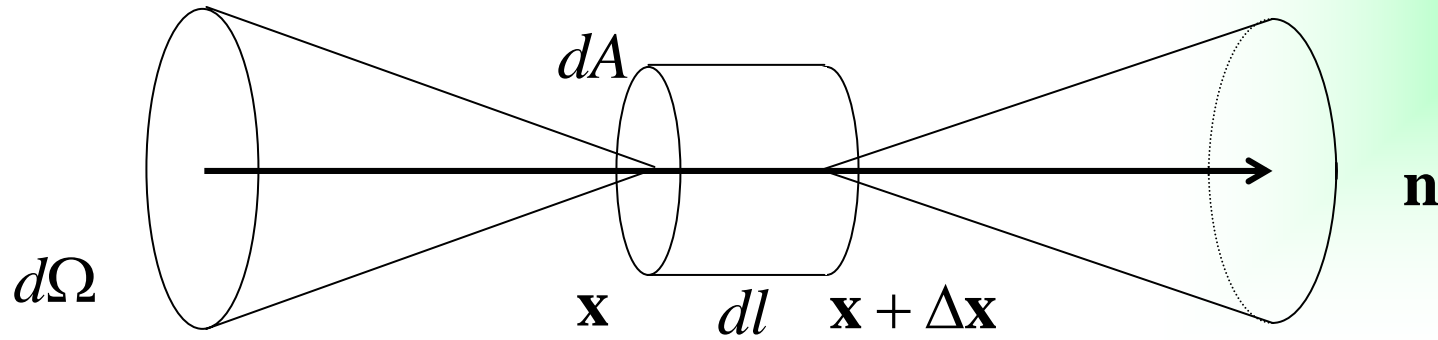


$$\frac{1}{c} \frac{\partial I}{\partial t} + \mathbf{n} \cdot \nabla I = \eta - \chi I$$

$\eta(\mathbf{x}, \mathbf{n}, \nu; t)$  : emissivity

$\chi(\mathbf{x}, \mathbf{n}, \nu; t)$  : opacity (単位長さあたり)

# 輻射輸送方程式の導出 (2)



$$[I(\mathbf{x} + \Delta\mathbf{x}, \mathbf{n}, \nu; t + \Delta t) - I(\mathbf{x}, \mathbf{n}, \nu; t)] dA dt d\Omega d\nu$$

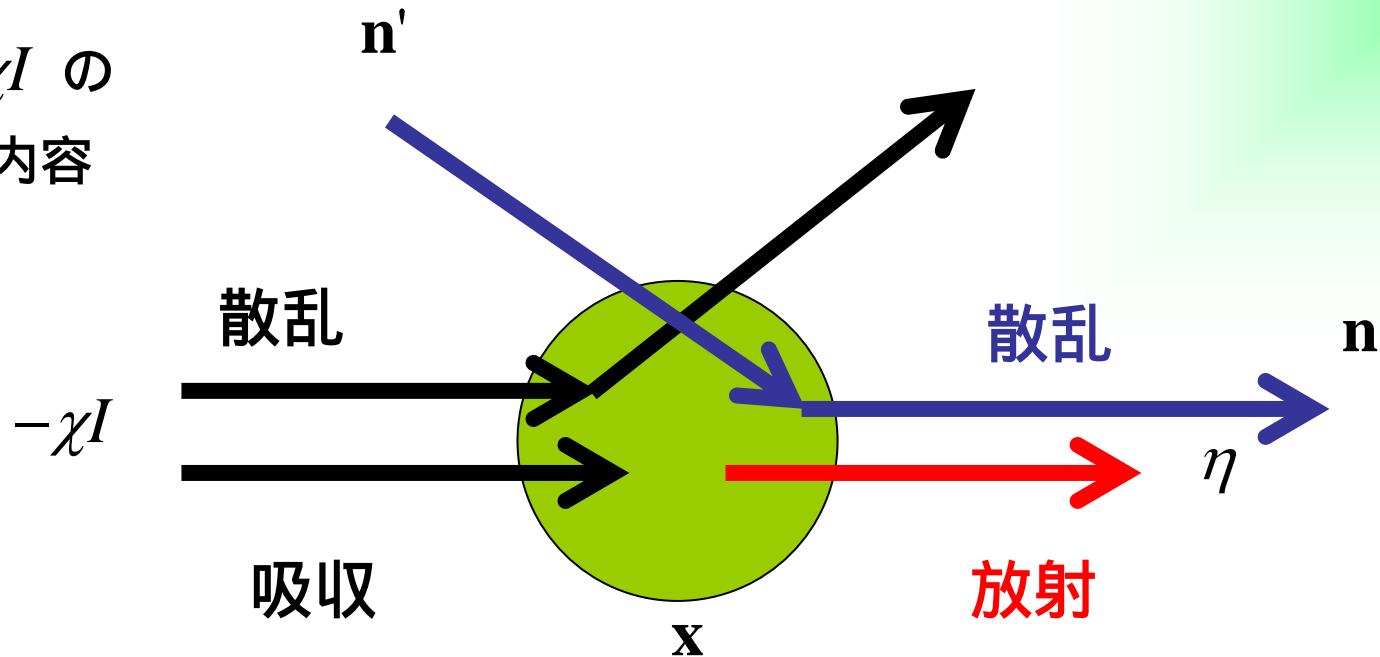
$$= \left[ \frac{1}{c} \frac{\partial I(\mathbf{x}, \mathbf{n}, \nu; t)}{\partial t} + \frac{\partial I(\mathbf{x}, \mathbf{n}, \nu; t)}{\partial t} \right] dl dA dt d\Omega d\nu$$

$$= [\eta(\mathbf{x}, \mathbf{n}, \nu; t) - \chi(\mathbf{x}, \mathbf{n}, \nu; t) I(\mathbf{x}, \mathbf{n}, \nu; t)] dl dA dt d\Omega d\nu$$

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I(\mathbf{x}, \mathbf{n}, \nu; t)}{\partial t} + \frac{\partial I(\mathbf{x}, \mathbf{n}, \nu; t)}{\partial t} = \eta(\mathbf{x}, \mathbf{n}, \nu; t) - \chi(\mathbf{x}, \mathbf{n}, \nu; t) I(\mathbf{x}, \mathbf{n}, \nu; t)$$

# 輻射輸送方程式の導出 (3)

$\eta$  と  $-\chi I$  の  
具体的な内容

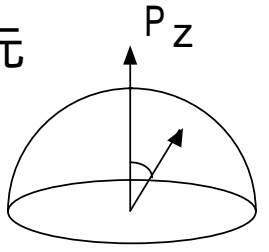


$$\frac{1}{c} \frac{\partial I}{\partial t} + \mathbf{n} \cdot \nabla I = \left[ \chi_{\text{abs}} B + \chi_{\text{sca}} \int I(\mathbf{n}') \phi(\mathbf{n}, \mathbf{n}') d\Omega \right] - (\chi_{\text{abs}} + \chi_{\text{sca}}) I$$

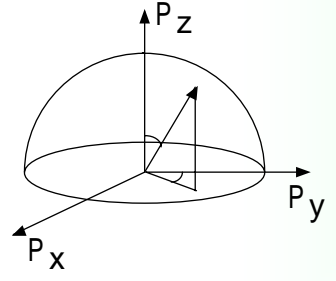
$$\frac{1}{c} \frac{\partial I}{\partial t} + \mathbf{n} \cdot \nabla I = \eta - \chi I$$

# 物質分布の対称性と位相空間の次元

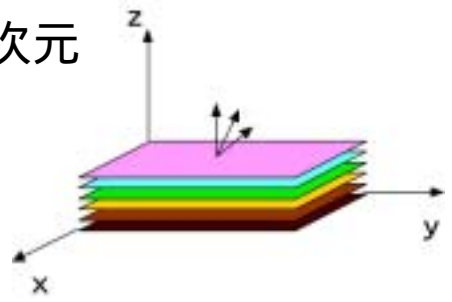
方向1次元



方向2次元



空間1次元

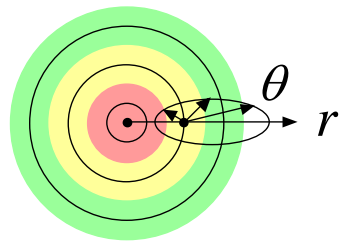


$$I(z, \theta, \nu)$$

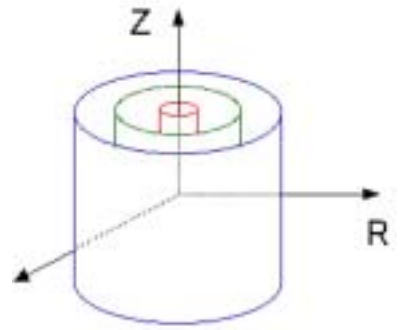
空間2次元



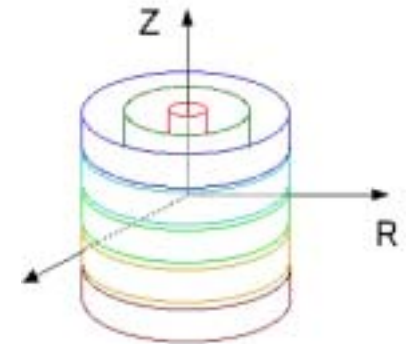
$$I(y, z, \theta, \phi, \nu)$$



$$I(r, \theta, \nu)$$



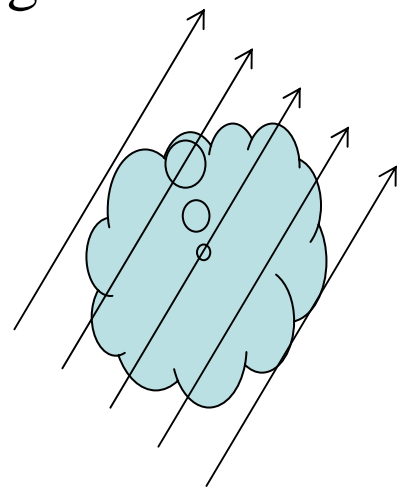
$$I(R, \theta, \phi, \nu)$$



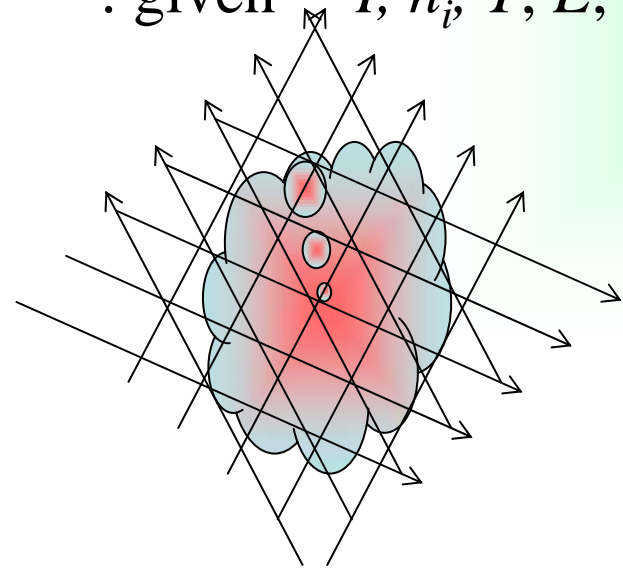
$$I(R, Z, \theta, \phi, \nu)$$

# 「輻射」が関与する問題の類型化: 「何」が知りたいのか

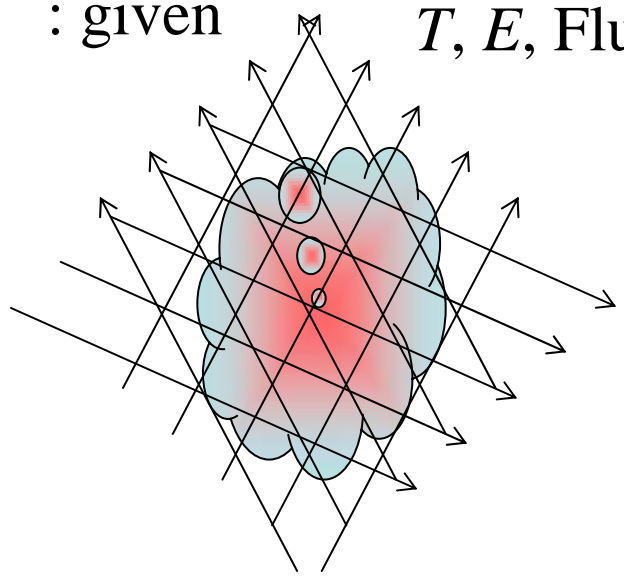
,  $T$ : given Flux



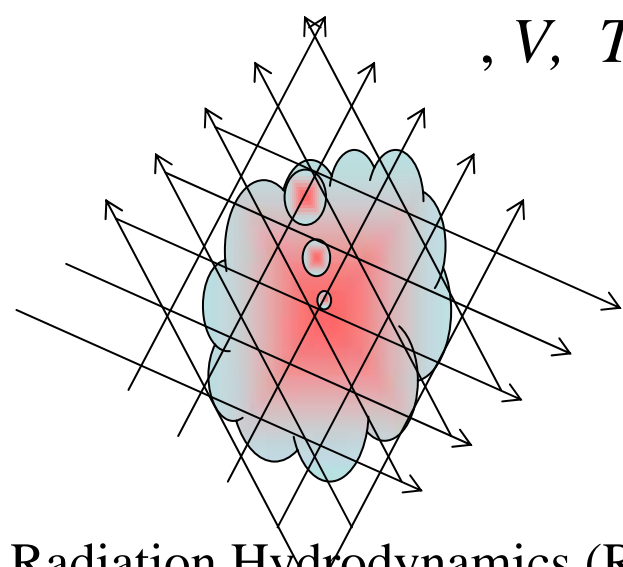
: given  $I, n_i, T, E, Flux$



: given  $T, E, Flux$



,  $V, T, E, Flux$



## Radiation Hydrodynamics (RHD)



## 2. 輻射輸送 (定常問題)

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I}{\partial t} + \mathbf{n} \cdot \nabla I = \eta - \chi I$$

定常性:

多くの現象では,  $t_{\text{hydro}} \gg t_{\text{radiation}}$  である.

$$(V_{\text{hydro}} \ll c)$$



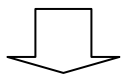
定常性を仮定して良い.

$$\mathbf{n} \cdot \nabla I = \eta - \chi I$$

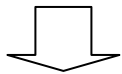
注:  
輻射流体力学計算の  
アルゴリズムでも,  
定常輻射輸送方程式を  
解くことは基本となる.

# 輻射輸送方程式の形式解 (積分型)

$$\frac{dI}{dl} = \eta - \chi I$$



$$\frac{1}{\chi} \frac{dI}{dl} = -I + \frac{\eta}{\chi}$$



$$\frac{dI}{d\tau} = -I + \underline{S}$$

Source Function

( $\mathbf{n}, \nu$ : fix)



$$I(x) = I(0)e^{-\tau} + \int_0^{\tau} S(t)e^{-(\tau-t)} dt$$

$$\tau = \int_0^x \chi dl$$

光学的厚さ (深さ):

空間距離  $x$  を光子の平均自由行程  $\frac{1}{\chi}$  を単位にして測った距離

$\tau > 1$  光学的に厚い, 不透明

$\tau < 1$  光学的に薄い, 透明

# 数值解法

反復解法が必要

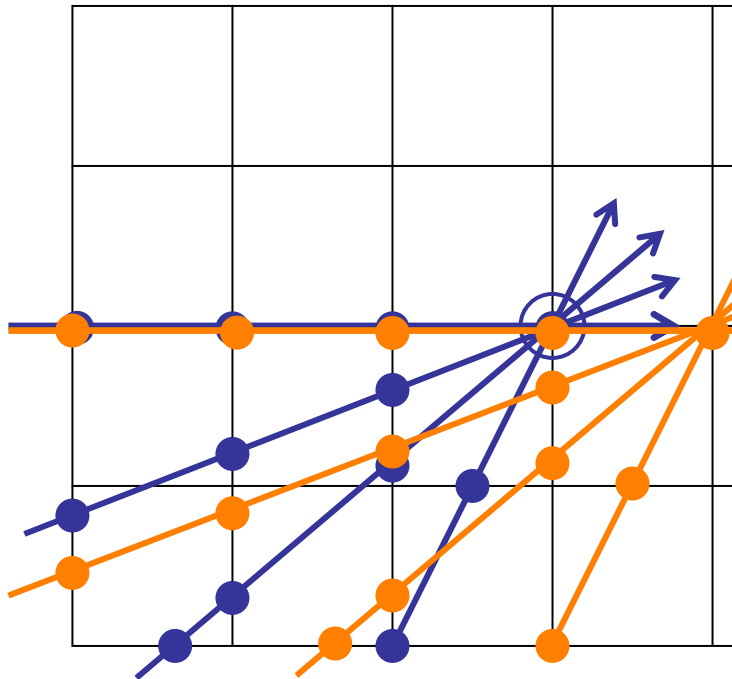
$$\mathbf{n} \cdot \nabla I = \chi(S - I) = \left[ \chi_{\text{abs}} \underline{B(T)} + \chi_{\text{sca}} \int \underline{I(\mathbf{n}')} \phi(\mathbf{n}, \mathbf{n}') d\Omega \right] - (\chi_{\text{abs}} + \chi_{\text{sca}}) I$$

- -iteration
- ALI (Accelerated Lambda Iteration)
- Variable Eddington Factor 法
- Feautrier法
- Rybicki法
- Complete Linearization 法
- ...
  
- Monte Carlo法

# 差分化(一例)

$$I_X = I_0 e^{-\tau} + S_0 \frac{1 - e^{-\tau} - \tau e^{-\tau}}{\tau} + S_X \frac{\tau - 1 + e^{-\tau}}{\tau}$$

$$\tau = \frac{\chi_0 + \chi_X}{2}$$



-iteration

- (1)  $S_0$  を既知とする
- (2)  $I$  を更新
- (3)  $S_X$  を更新
- (4) (1)に戻る

# 数学的構造

$$I(x) = I(0)e^{-\tau} + \frac{1}{\chi_{\text{abs}} + \chi_{\text{sca}}} \int_0^{\tau} \left( \chi_{\text{abs}} B(T) + \chi_{\text{sca}} \int I(\mathbf{n}') \phi(\mathbf{n}, \mathbf{n}') d\Omega' \right) e^{-(\tau-t)} dt$$

$$(\mathbf{E} - \Lambda) \mathbf{I}^n = \mathbf{b}^{n-1}$$

Feautrier 法

(Rybicki法, Complete Linearization法, ...)

$$\mathbf{I}^n = \Lambda \mathbf{I}^{n-1} + \mathbf{b}^{n-1}$$

-iteration法

$$(\mathbf{E} - \Lambda_*) \mathbf{I}^n = (\Lambda - \Lambda_*) \mathbf{I}^{n-1} + \mathbf{b}^{n-1}$$

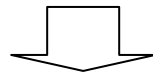
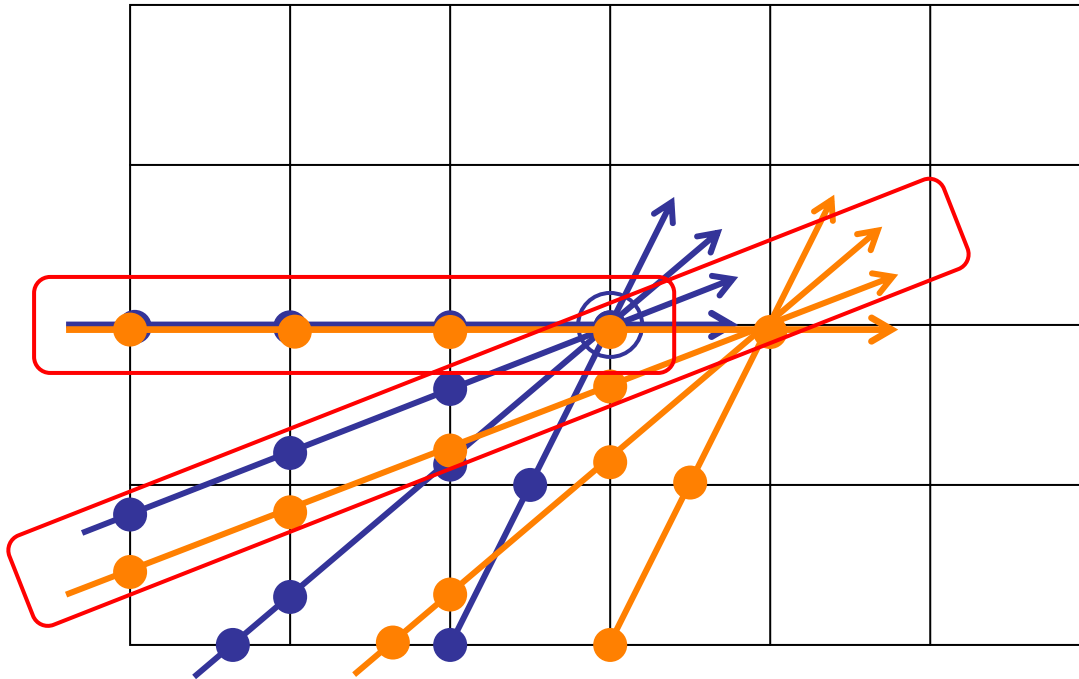
Accelerated Lambda Iteration (ALI)

(Operator Perturbation Method)

$$\mathbf{I} = \Lambda \mathbf{I} + \mathbf{b}$$

# 計算量を減らす工夫

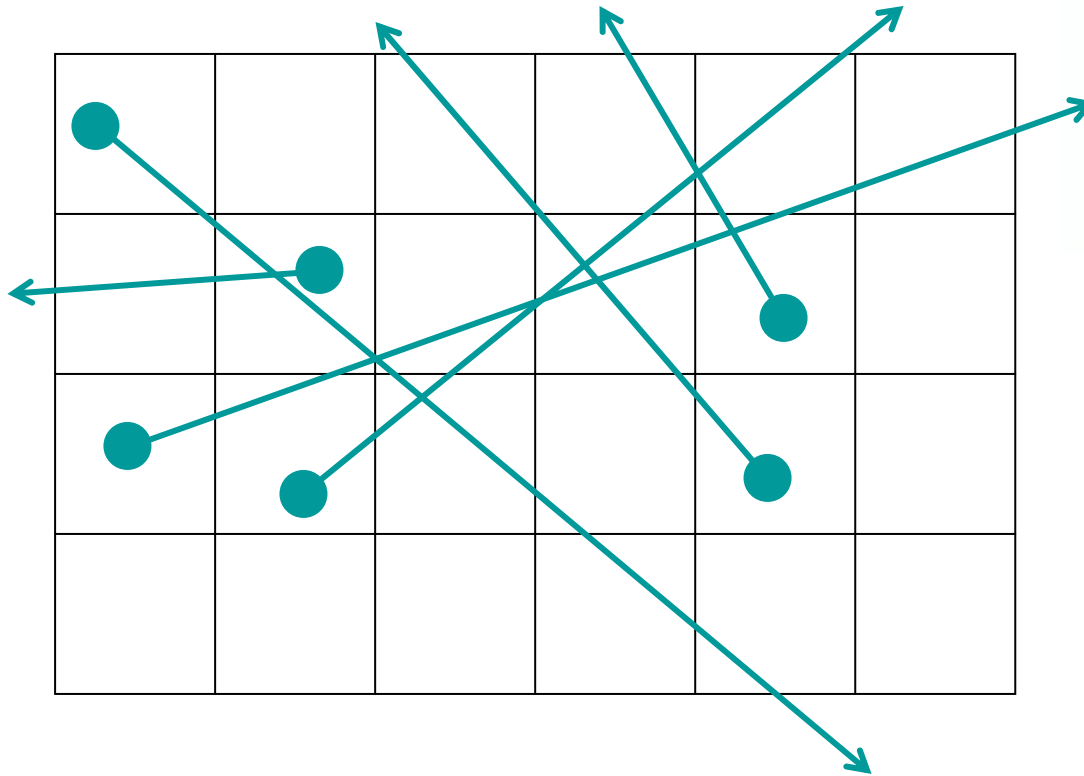
$$\text{計算量} \sim N_{\text{iter}} \times N \times N_X N_Y N_Z \times N_\theta N_\phi N_\nu$$



$$\sim N_{\text{iter}} \times N_X N_Y N_Z \times N_\theta N_\phi N_\nu$$

- ・ Short Characteristics法
- ・ Accelerated Ray Tracing法

# Monte Carlo法について



- ・ -iteration と同等
- ・位置・方向・振動数をランダムに振る
- ・点光源は扱いにくい

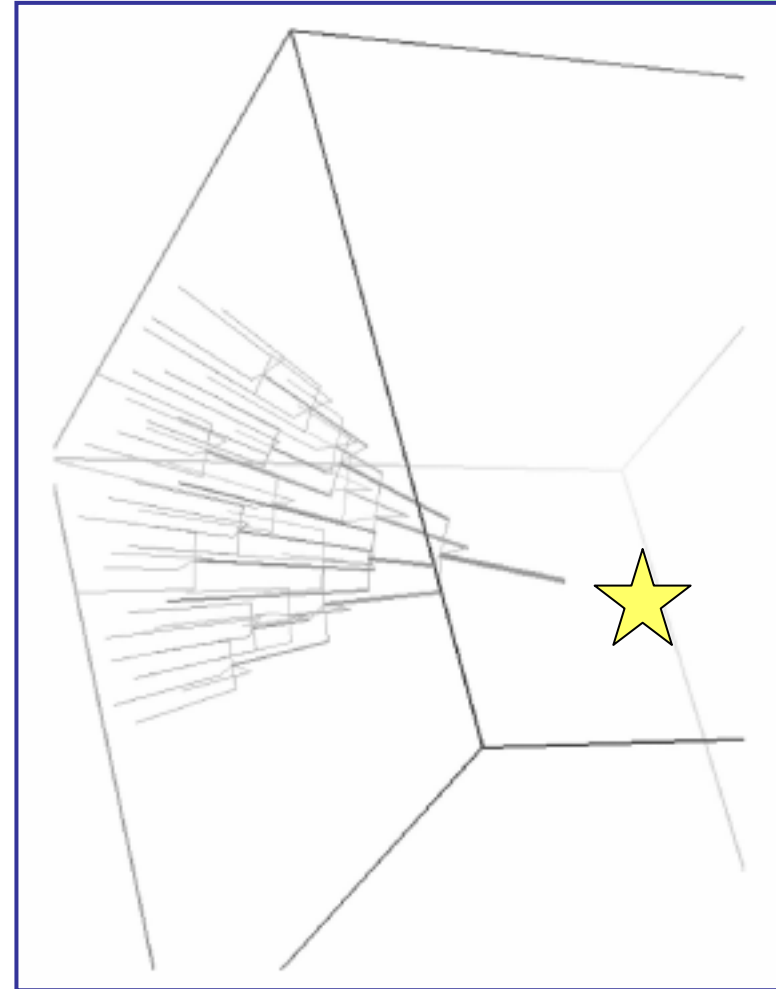
$$\text{計算量} \sim N_{\text{iter}} \times N_X N_Y N_Z \times N_\theta N_\phi N_\nu$$

# Adaptive Ray Tracing

(Abel & Wandelt 2002)

角分解能を維持するため、  
適宜 ray を分割

点光源から周囲への  
輻射輸送の際(のみ)に有効

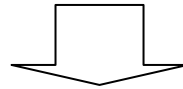




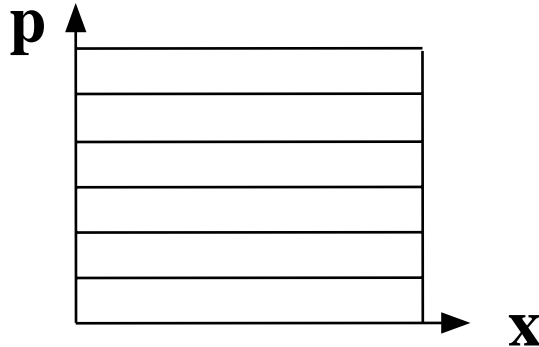
# 並列化

$$\mathbf{n} \cdot \nabla I = \eta - \chi I$$

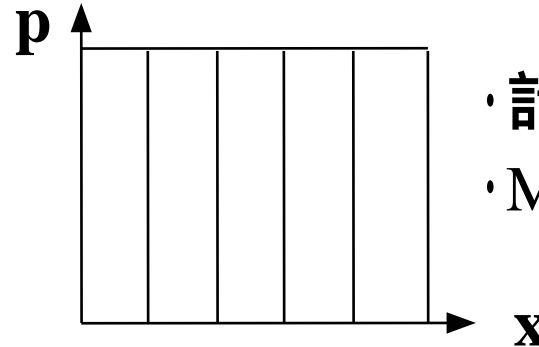
右辺を既知とみなす反復解法では、  
輻射強度は方向・振動数毎に独立



並列化は容易



方向・振動数分割



配位空間分割

- ・計算順序に注意
- ・MWF法で解決

### 3. 輻射流体力学

## 一般的な基礎方程式

$$(M^{\alpha\beta} + R^{\alpha\beta})_{;\beta} = F^{\alpha} \qquad \frac{1}{c} \frac{\partial I}{\partial t} + \mathbf{n} \cdot \nabla I = \eta - \chi I$$

$$M_0 = \begin{pmatrix} \rho(1 + e/c^2) & & 0 \\ & p & \\ 0 & & p \\ & & & p \end{pmatrix}$$

$$R_0 = \begin{pmatrix} E_0 & c^{-1} \mathbf{F}_0 \\ c^{-1} \mathbf{F}_0 & \mathbf{P}_0 \end{pmatrix}$$

輻射エネルギー密度

$$E(\mathbf{x}, \nu, t) = \frac{1}{c} \int I(\mathbf{x}, \mathbf{n}, \nu; t) d\Omega$$

輻射エネルギーフラックス

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}, \nu, t) = \int \mathbf{n} I(\mathbf{x}, \mathbf{n}, \nu; t) d\Omega$$

輻射圧テンソル

$$\mathbf{P}(\mathbf{x}, \nu, t) = \frac{1}{c} \int \mathbf{nn} I(\mathbf{x}, \mathbf{n}, \nu; t) d\Omega$$

# 仮定

注: 「輻射流体力学」の基礎方程式は扱う問題に応じていろいろあり得るが、以下ではその一例を紹介する。

- ・非相対論的  $O(1)$  --- ( $v/c$  の 0次まで)
- ・任意の光学的厚さで成り立つ
- ・散乱を無視 (  $\mu_0$  は等方的)
- ・主にcontinuumを扱う

注: 以下に述べる方法でも、 $v=0$  ならば非等方散乱も扱うことが出来る。

	$V \ll c_*$	$V \geq c_*$
$\tau \gg 1$	○ static diffusion	○ dynamic diffusion
$\tau \ll 1$	○ free streaming	× relativistic flow

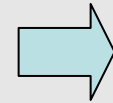
$$c_* = c / \max(1, \tau)$$

Comoving Frame

 $O(v/c)$  $z$   
↑ $O(1)$  の式を得る

	$V \ll c_*$	$V \geq c_*$	$c_* = c / \max(1, \tau)$
$\tau \gg 1$	○ static diffusion	○ dynamic diffusion	
$\tau \ll 1$	○ free streaming	× relativistic flow	

すべての場合で無視できるもの以外は残す



$$\frac{DE_0}{Dt} + \frac{\partial F_0}{\partial z} + \frac{\partial \mathcal{N}}{\partial z} (E_0 + P_0) + \frac{2a}{c^2} F_0 = \int_0^\infty [4\pi\eta_0(v_0) - c\chi_0(v_0)E_0(v_0)] dv_0$$

$$\frac{1}{c^2} \frac{DF_0}{Dt} + \frac{\partial P_0}{\partial z} + \frac{2}{c^2} \frac{\partial \mathcal{N}}{\partial z} F_0 + \frac{a}{c^2} (E_0 + P_0) = -\frac{1}{c} \int_0^\infty \chi_0(v_0) F_0(v_0) dv_0$$

# 輻射流体力学 基礎方程式: $O(1)$

注:  $O(v/c)$  の項を一旦は残した上で  $O(1)$  の式を作らないと, エネルギー保存則や作用・反作用が満たされない式が出来てしまう. 見かけ上  $v/c$  の項が残っているのは重要な意味がある.

3次元

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p - \rho \nabla \Phi + \frac{1}{c} \chi_F \mathbf{F}$$

$$\rho \frac{D}{Dt} \left( \frac{e_{\text{gas}}}{\rho} \right) = -p \nabla \cdot \mathbf{v} - [4\pi\eta - c\chi_E E]$$

$$\rho \frac{D}{Dt} \left( \frac{E}{\rho} \right) = -\nabla \cdot \mathbf{F} - \nabla \mathbf{v} : \mathbf{P} + [4\pi\eta - c\chi_E E]$$

$$\rho \frac{D}{Dt} \left( \frac{\mathbf{F}}{\rho} \right) = -\nabla \cdot \mathbf{P} - \frac{1}{c} \chi_F \mathbf{F}$$

6次元

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I}{\partial t} + \mathbf{n} \cdot \nabla I = \eta - \chi I$$

## 解法

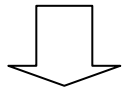
1. Flux Limited Diffusion (FLD) 法
2. Simple Method
3. Variable Eddington Factor (VEF) 法

# 1. Flux Limited Diffusion (FLD) 法

## Diffusion 近似

$$\tau \gg 1$$

$$\lambda/c \ll L/V$$



$$E = aT^4$$

$$\mathbf{P} = \frac{1}{3} E \begin{pmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & 1 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{F} = -\frac{c}{3\chi} \nabla E$$

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p - \rho \nabla \Phi - \frac{1}{3} \nabla E$$

$$\rho \frac{D}{Dt} \left( e_{\text{gas}} + \frac{E}{\rho} \right) = -p \nabla \cdot \mathbf{v} - \frac{E}{3} \nabla \cdot \mathbf{v} + \nabla \cdot \left( \frac{c}{3\chi} \nabla E \right)$$

## Flux Limiter:

$$\mathbf{F} = -\lambda \frac{c}{3\chi} \nabla E$$

$$\lambda(R) = \frac{6 + 3R}{6 + 3R + R^2}$$

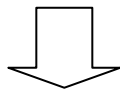
$$R = \left| \frac{\nabla E}{\chi E} \right|$$

## FLD

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p - \rho \nabla \Phi - \frac{1}{3} \lambda \nabla E$$

$$\rho \frac{D}{Dt} \left( e_{\text{gas}} + \frac{E}{\rho} \right) = -p \nabla \cdot \mathbf{v} - \frac{E}{3} \nabla \cdot \mathbf{v} + \nabla \cdot \left( \lambda \frac{c}{3\chi} \nabla E \right)$$



$$\mathbf{F} = -\lambda \frac{c}{3\chi} \nabla E \rightarrow \begin{cases} -\frac{c}{3\chi} \nabla E & (R \rightarrow 0) \\ -cE \frac{\nabla E}{|\nabla E|} & (R \rightarrow \infty) \end{cases}$$

- ・ 3次元空間の計算
- ・ エネルギー式は implicit 積分
- ・  $\mathbf{F} \parallel E$  の制約がある



## 2. Simple Method

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \\ \rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p - \rho \nabla \Phi + \frac{1}{c} \chi_F \mathbf{F} \\ \rho \frac{D}{Dt} \left( \frac{e_{\text{gas}}}{\rho} \right) = -p \nabla \cdot \mathbf{v} - [4\pi\eta - c\chi_E E] \end{array} \right.$$

$\mathbf{n} \cdot \nabla I = \eta - \chi I$

$$\left\{ \begin{array}{l} E = \frac{1}{c} \int I d\Omega \\ \mathbf{F} = \int \mathbf{n} I d\Omega \end{array} \right.$$

・ 3次元空間 +  
6次元位相空間

・ 流体は explicit ,  
エネルギー式は ,  
implicit積分

・ 輻射場と反復計算  
(整合性をとるため)

・ アルゴリズムは  
比較的簡単

### 3. Variable Eddington Factor (VEF) 法

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p - \rho \nabla \Phi + \frac{1}{c} \chi_F \mathbf{F}$$

$$\rho \frac{D}{Dt} \left( \frac{e_{\text{gas}}}{\rho} \right) = -p \nabla \cdot \mathbf{v} - [4\pi\eta - c\chi_E E]$$

$$\rho \frac{D}{Dt} \left( \frac{E}{\rho} \right) = -\nabla \cdot \mathbf{F} - \nabla \mathbf{v} : \mathbf{P} + [4\pi\eta - c\chi_E E]$$

$$\rho \frac{D}{Dt} \left( \frac{\mathbf{F}}{\rho} \right) = -\nabla \cdot \mathbf{P} - \frac{1}{c} \chi_F \mathbf{F}$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{f}E$$

$$\mathbf{n} \cdot \nabla I = \eta - \chi I$$

$$\mathbf{f} = \frac{\int \mathbf{nn} I d\Omega}{\int I d\Omega} \quad \text{Eddington Factor}$$

$$\left( \begin{array}{l} \mathbf{P} = \frac{1}{c} \int \mathbf{nn} I d\Omega \\ E = \frac{1}{c} \int I d\Omega \end{array} \right)$$

## Variable Eddington Factor 法の特徴

- ・空間3次元, 位相空間6次元問題
- ・流体は explicit, エネルギー式は implicit 積分
- ・エネルギー式の積分は, やや複雑
- ・Eddington Factor  $f$  は, 輻射場の等方・非等方性を表している  
 $E, F$  そのものよりも, 誤差が小さい
- ・Eddington Factor  $f$  は, 時間変化は大きくない  
輻射場との反復計算は少なくてすむ

## 各計算法の比較

	HD Polytrope		FLD		RHD Simple		VEF
計算量	小	<	中	<<	大	≒	大
複雑さ	小	<	中	<<	大	<	大
精度	低	<<	中	<	高		高
応用例	多		少々			極少数	

注: FLDは空間部分だけの計算量で輻射が扱えるので、計算量が少ない割には「輻射」という「質」の良い計算が出来る。その意味でコストパフォーマンスが良い。

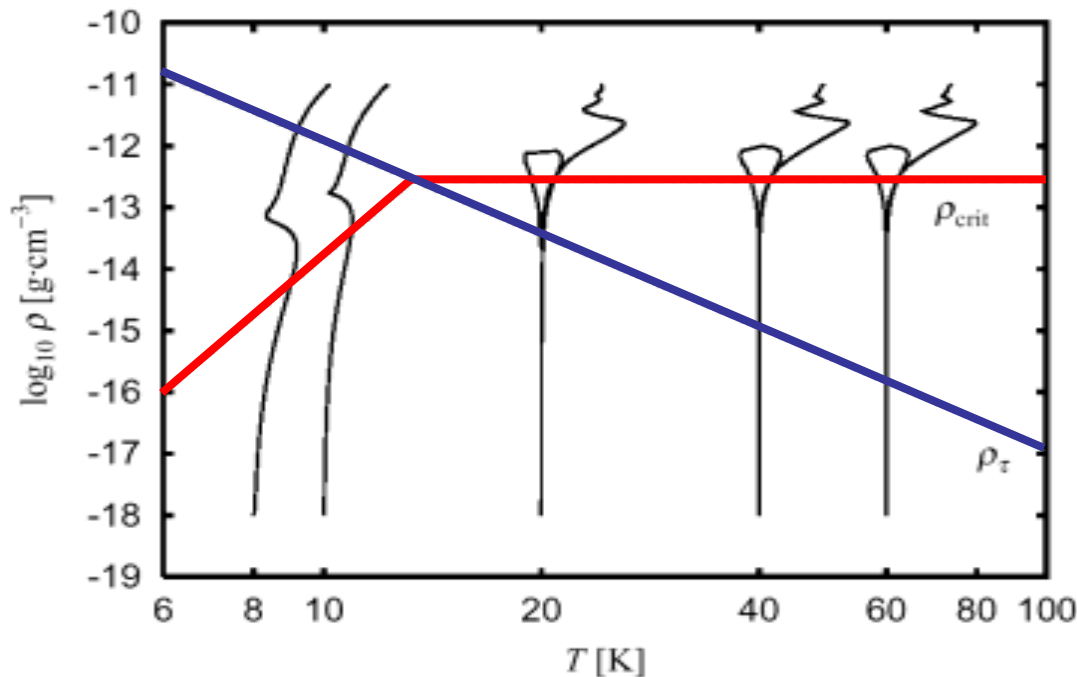
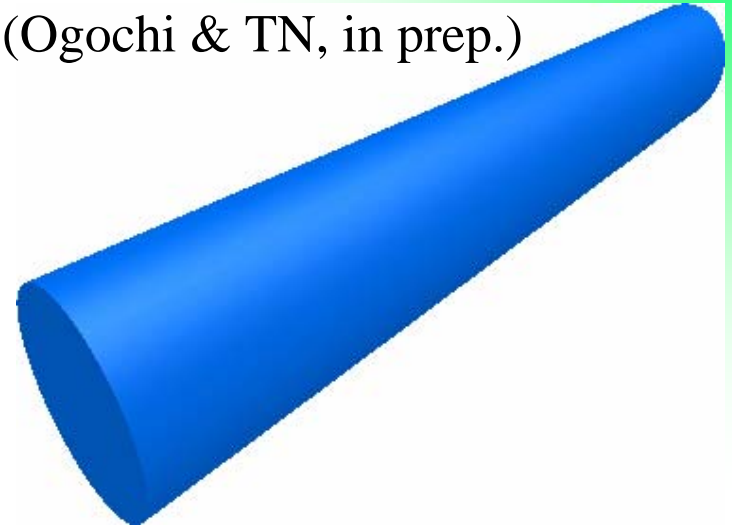
## 4. 最近の計算例

1. 1D軸対称 RHD      フィラメント状星間雲の重力収縮
2. 2D軸対称 輻射輸送      T Tauri型星・原始星の構造推定
3. 2D軸対称 RHD      大質量星形成
4. 3D 輻射輸送      宇宙の再電離過程
5. 3D RHD      銀河形成

## 1D RHD: フィラメント状星間雲の重力収縮

(Ogochi &amp; TN, in prep.)

- ・フィラメント状分子雲 = 無限に長いシリンダー
- ・磁場, 回転, 乱流, 化学反応は無い
- ・星間輻射による加熱(境界条件)
- ・1D 軸対称 RHD (VEF)



加熱 = 冷却

 $\tau = 1$

# 2D RHD: 大質量形成

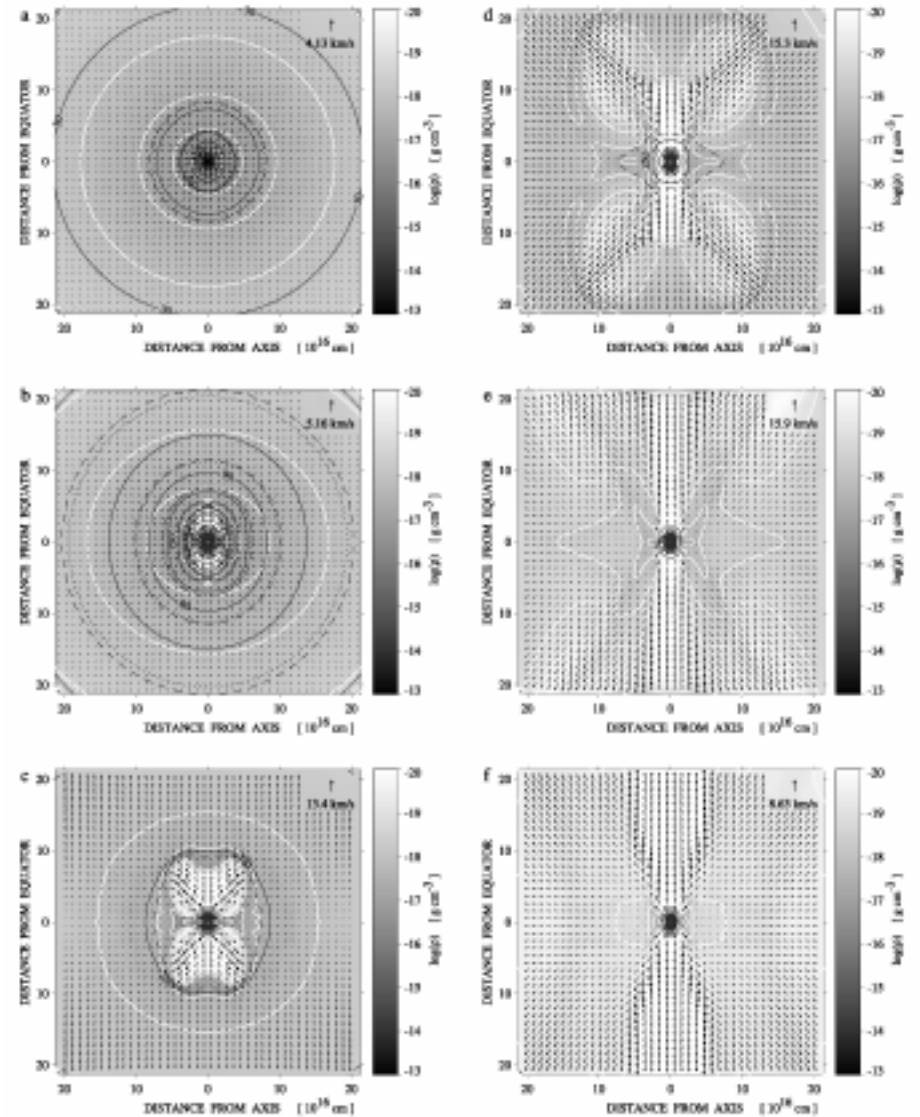
(Yorke & Sonnhalter 2002)

- 30, 60, 120  $M_{\text{sun}}$  の分子雲
- 2D RHD (FLD) で重力収縮計算
- Nested Grid (64x64, 3階層)
- FLDは波長依存性を考慮

輻射圧のために  
降着が抑止される

形成された星の質量

初期	波長依存	灰色
30	31.6	19.1
60	33.6	20.1
120	42.9	22.9



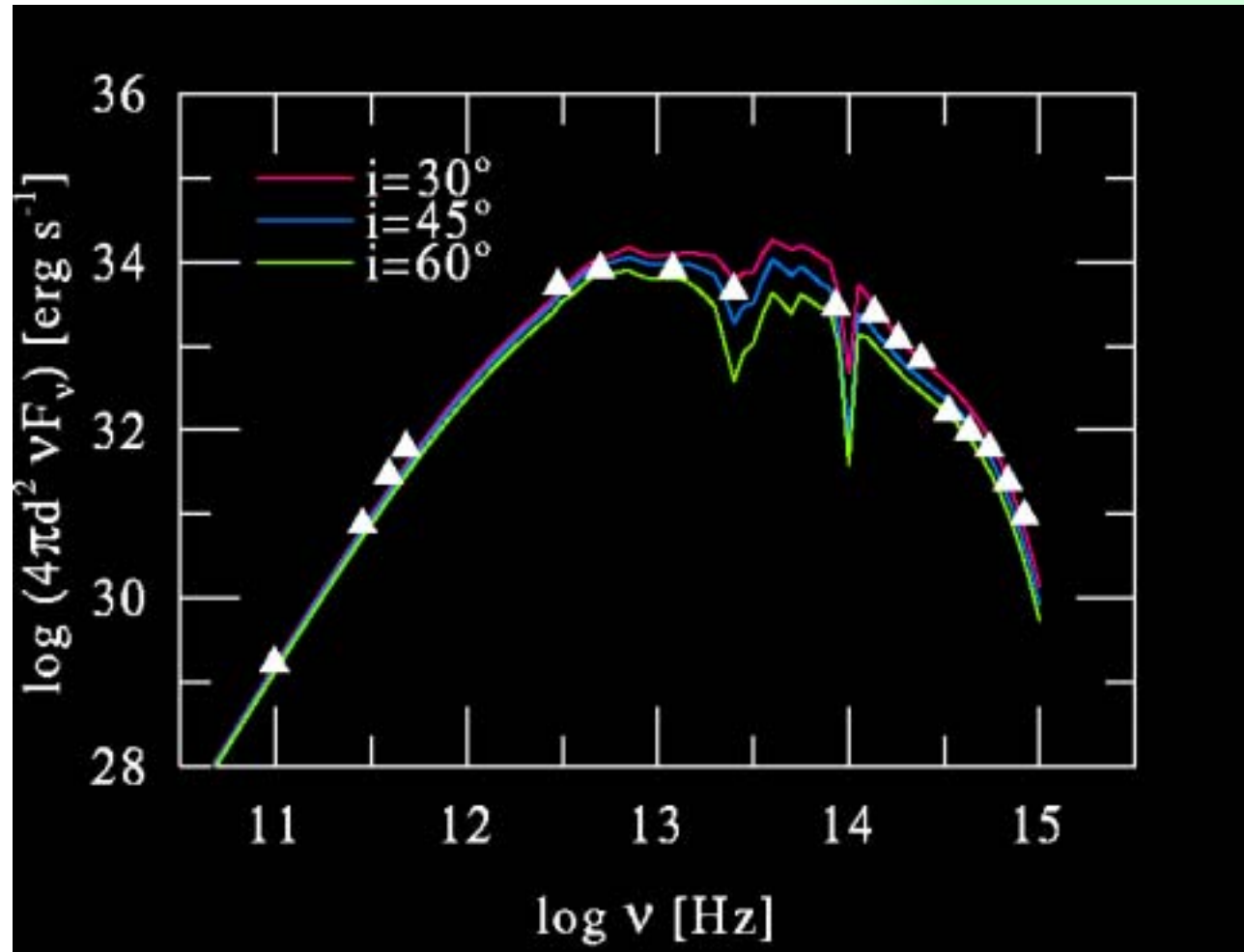
初期 60  $M_{\text{sun}}$  Clump

## 2D 輻射平衡計算

T Tauri型星 (Kikuchi, TN, &amp; Ogochi 2002)

T Tauri型星 HL Tau

- ・2次元 軸対称
- ・輻射平衡, VEF

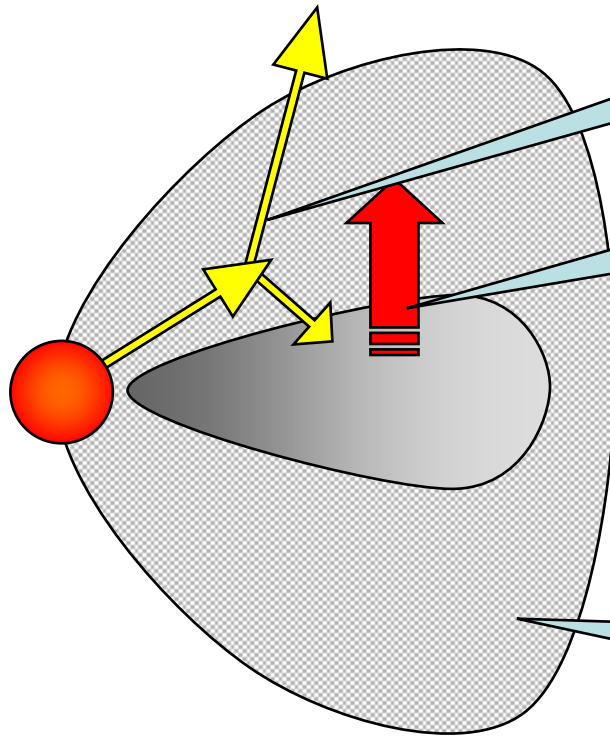


Kikuchi, TN, &amp; Ogochi 2002



# ディスク・ハロー モデル

ハロー: エンベロープの  
内側100 AU程度の領域



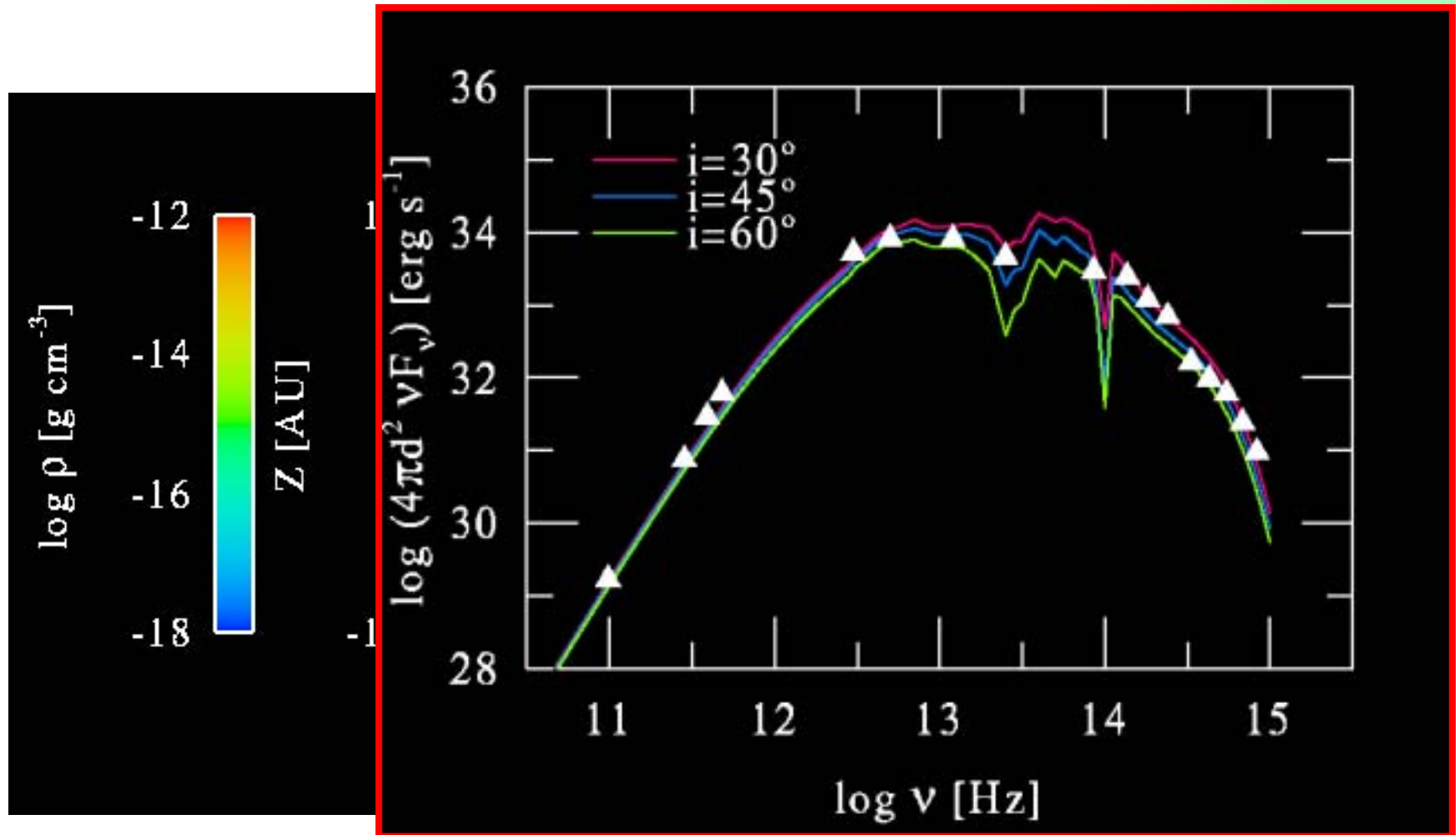
中心星の放射を  
エンベロープが散乱

加熱されたディスク  
からの赤外放射

中心星からの放射を直接吸収  
するよりも得をする

エンベロープはディスクからの  
赤外放射に対して光学的薄

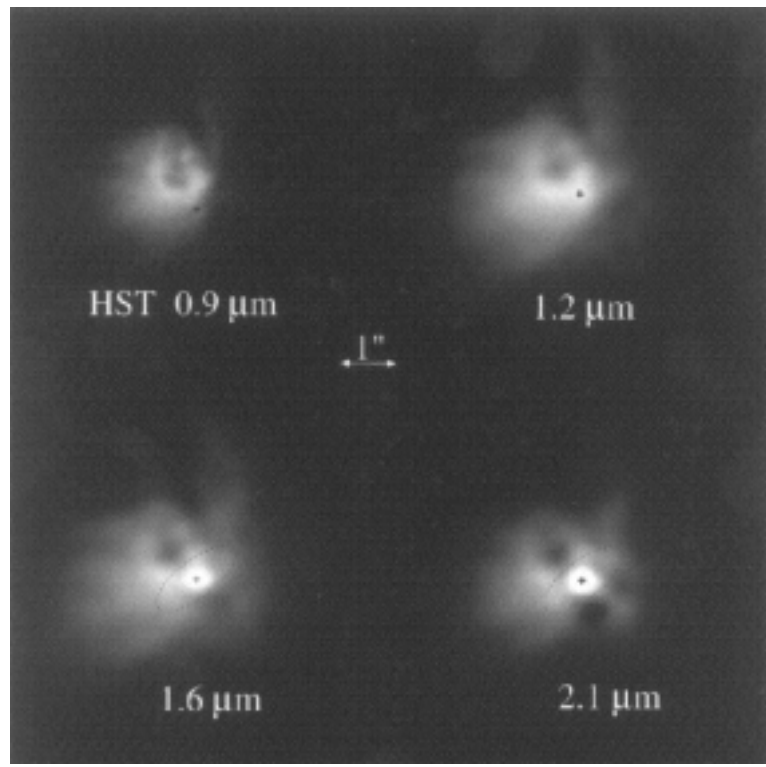
# 密度・温度分布



Kikuchi, TN, & Ogochi 2002

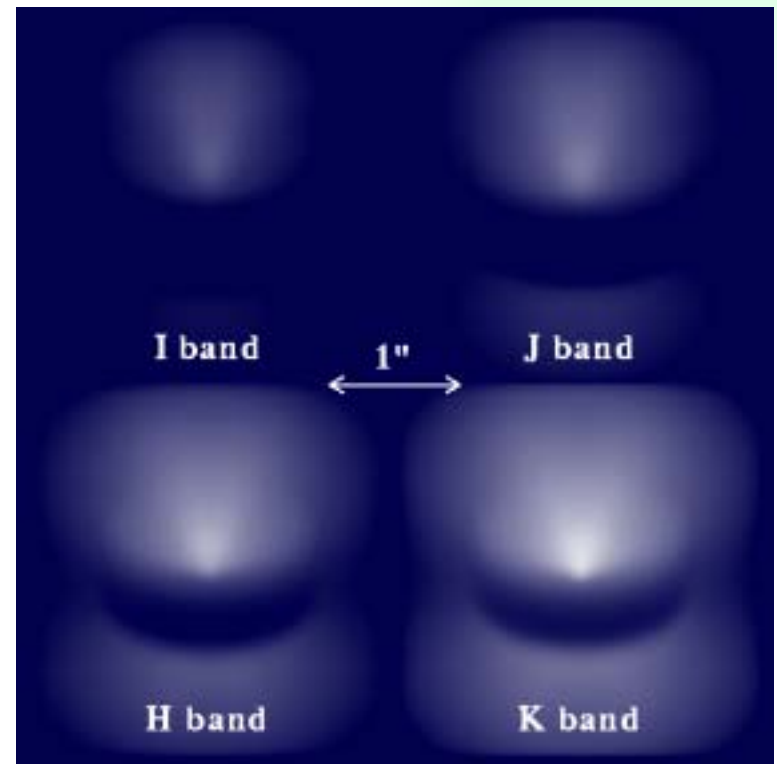
# 近赤外散乱光イメージ

## 観測 (HL Tau)



Close et al. (1997)

## モデル計算 ( $i = 60^\circ$ )



Kikuchi (in prep.)

# 原始星の構造推定

(Nakazato, TN, & Umemura 2003)

- 2-D axisymmetric
- three components;

- Central star:

Luminosity	$L_*$
Temperature	$T_*$
Mass	$M_*$

- Circumstellar disk:

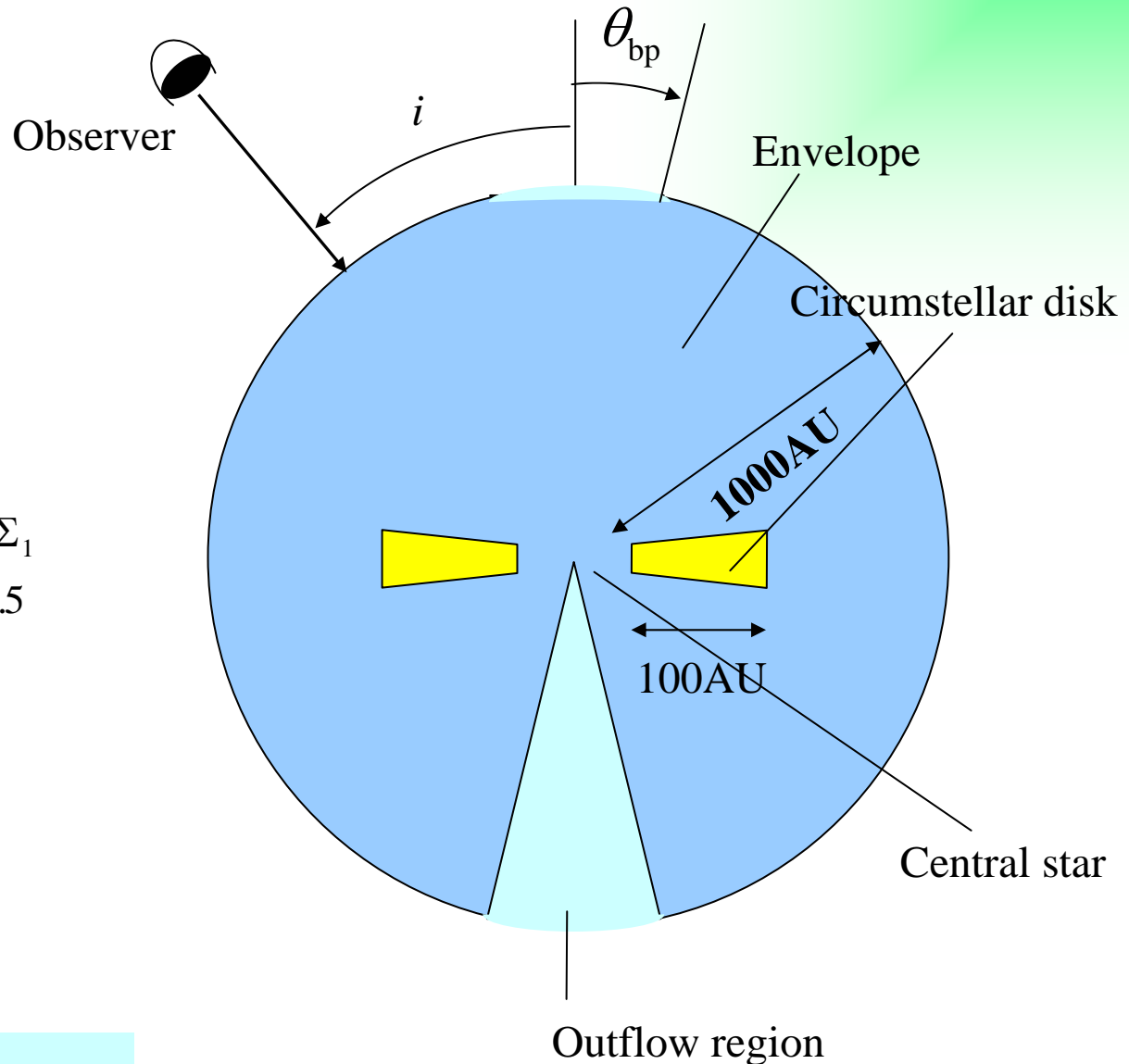
Surface density at 1AU	$\Sigma_1$
Power law index	$p = 1.5$

- Envelope:

Density at 1AU	$\rho_1$
Power law index	$q = 1.5$
Opening angle	$\theta_{bp}$

- Temperature: **Radiative equilibrium**

$$\int_0^\infty \chi_\nu^{\text{abs}} B_\nu d\nu = \int_0^\infty \chi_\nu^{\text{abs}} J_\nu d\nu$$



## Model SED

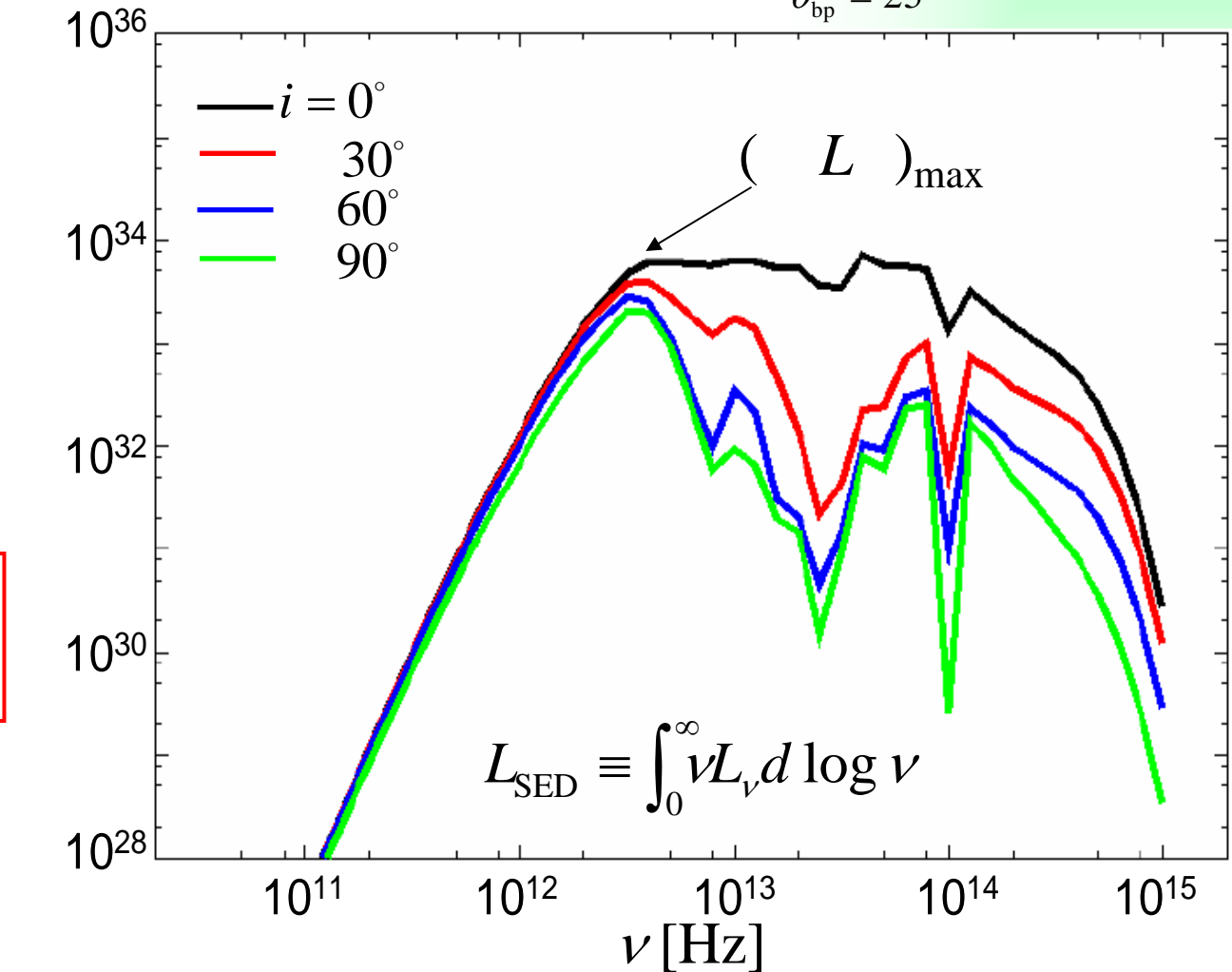
parameters

$$L_* = 1.0L_{\odot} \quad \rho_1 = 10^{-13} \text{ g cm}^{-3}$$

$$T_* = 4000\text{K} \quad \Sigma_1 = 2000 \text{ g cm}^{-2}$$

$$M_* = 0.5M_{\odot} \quad p = q = 3/2$$

$$\theta_{\text{bp}} = 25^{\circ}$$

 $L$  [erg s<sup>-1</sup>]

観測角度依存性 大



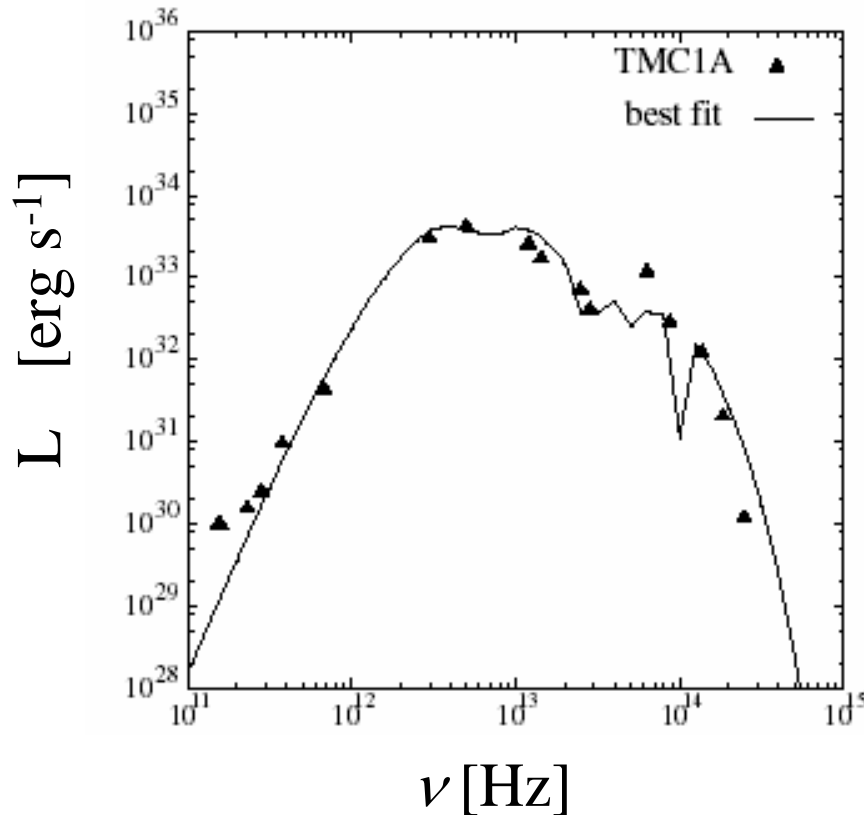
i の推定



原始星構造の推定

# ➤ IRAS04365+2535 (TMC1A)

## Class I 天体



$$L_* = 1.0L_{\odot}$$

$$\rho_1 = 10^{-12.5} \text{ g cm}^{-3}$$

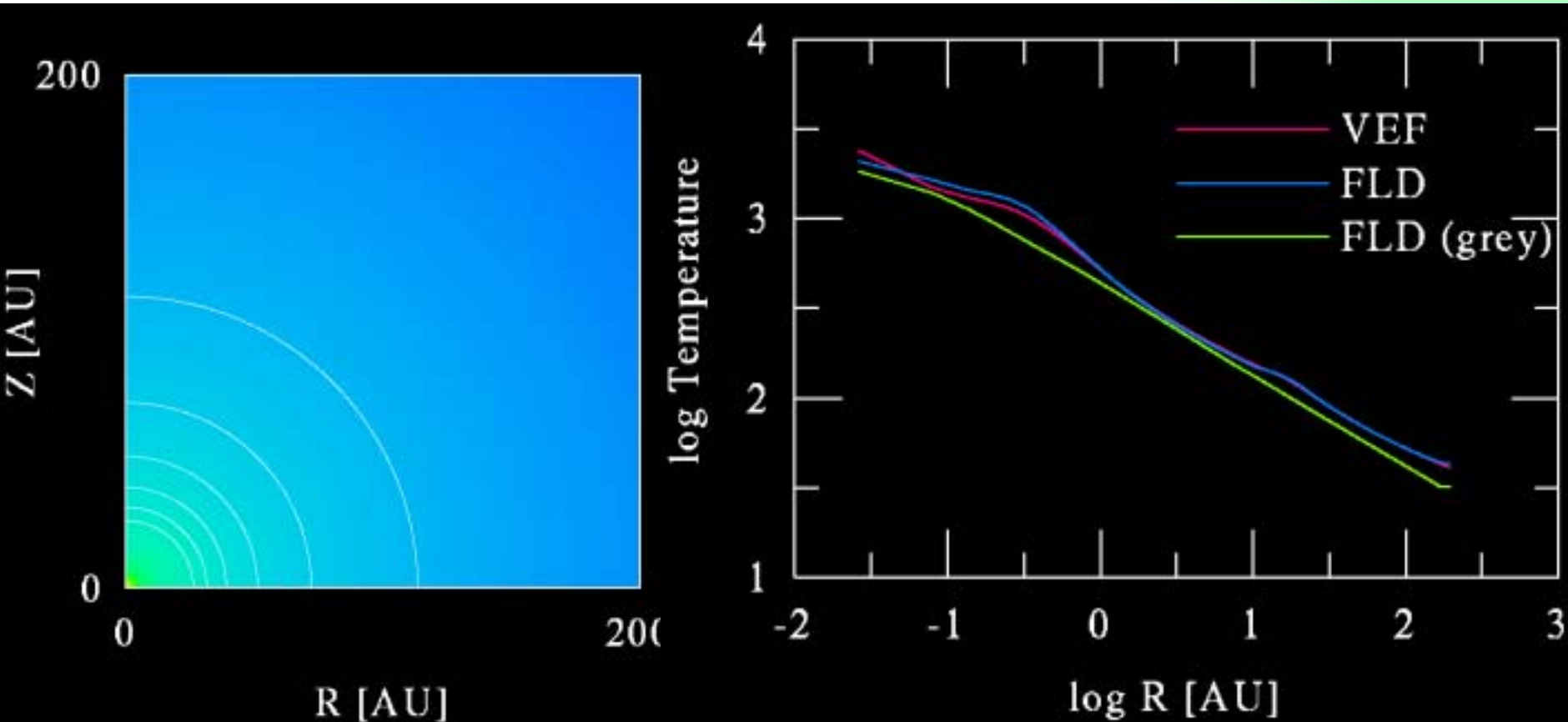
$$\Sigma_1 = 10000 \text{ g cm}^{-2}$$

$$\theta_{\text{BP}} = 20^{\circ}$$

$$i = 22^{\circ}$$

(Nakazato, TN, Umemura 2003)

## 球対称エンベロープの場合



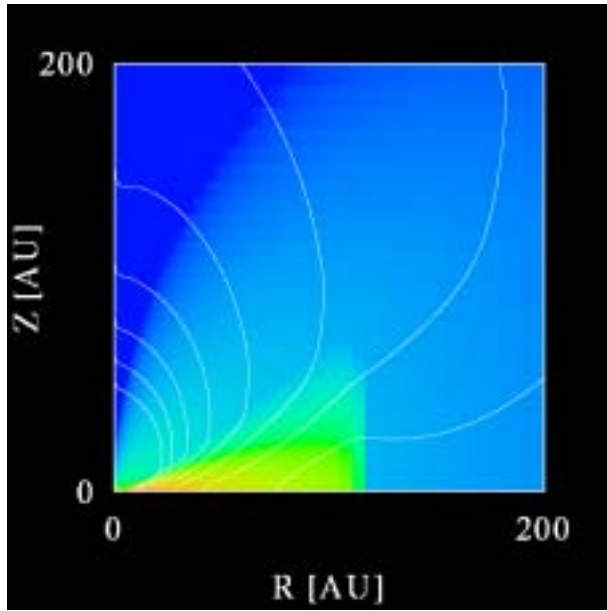
$r$ - $z$ 平面上の温度分布

VEFとFLDは良い一致を示す

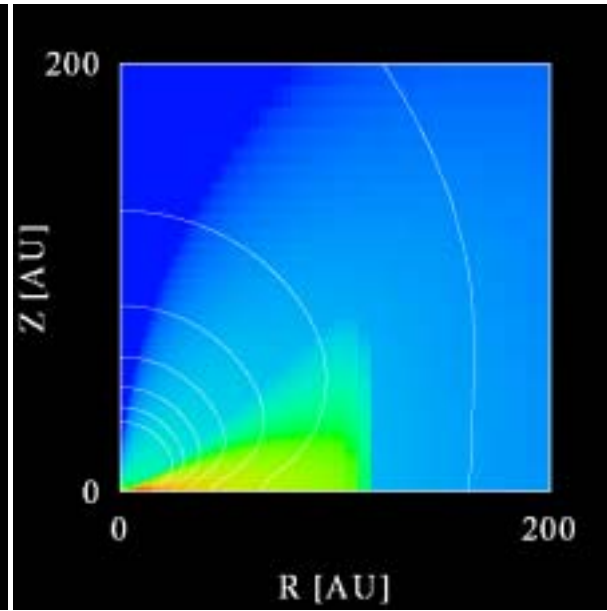
(Kikuchi, in prep)

## Diskの温度分布

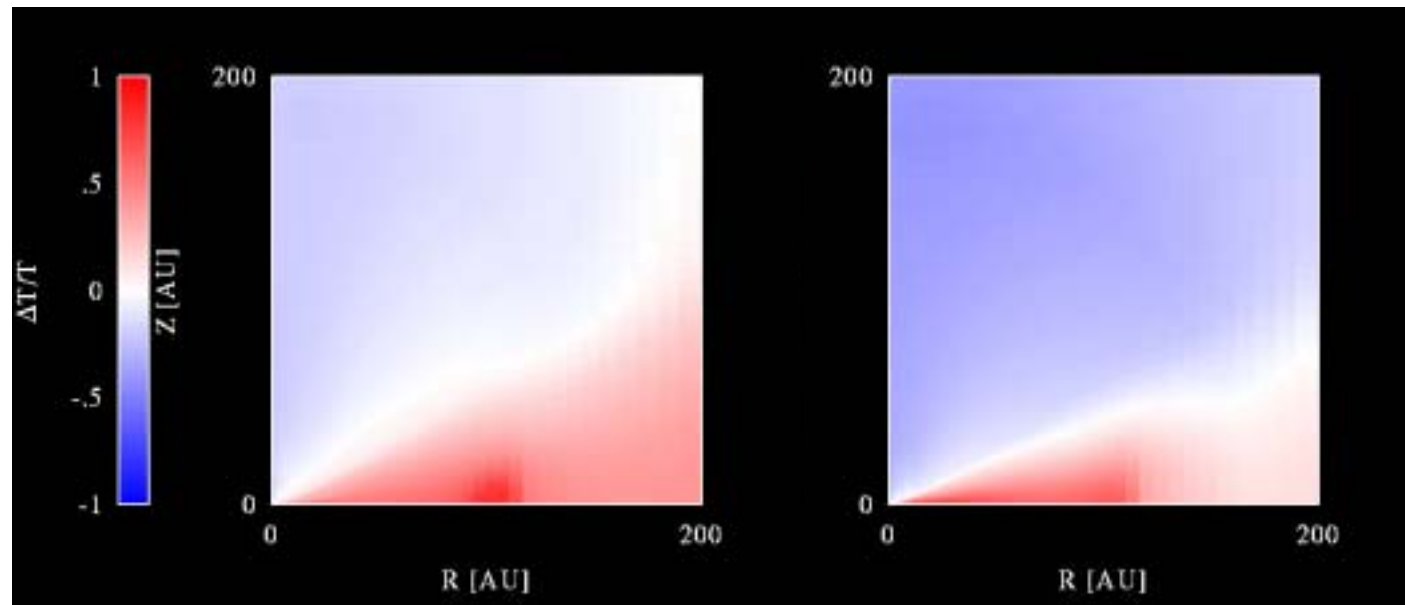
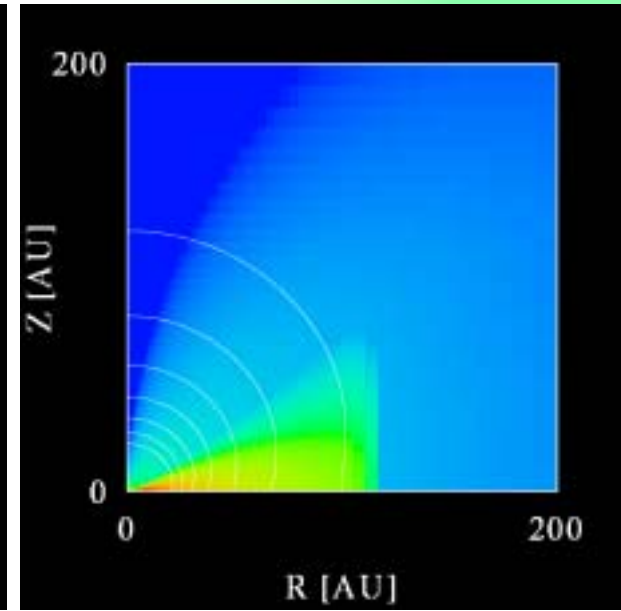
VEF



FLD (non-grey)



FLD (grey)



(Kikuchi, in prep)



# 3D 輻射輸送

(TN, Umemura, & Susa 2001)

$$N^3 = 128^3 \text{ in } (8\text{Mpc})^3, N_{\text{angle}} = 128^2$$

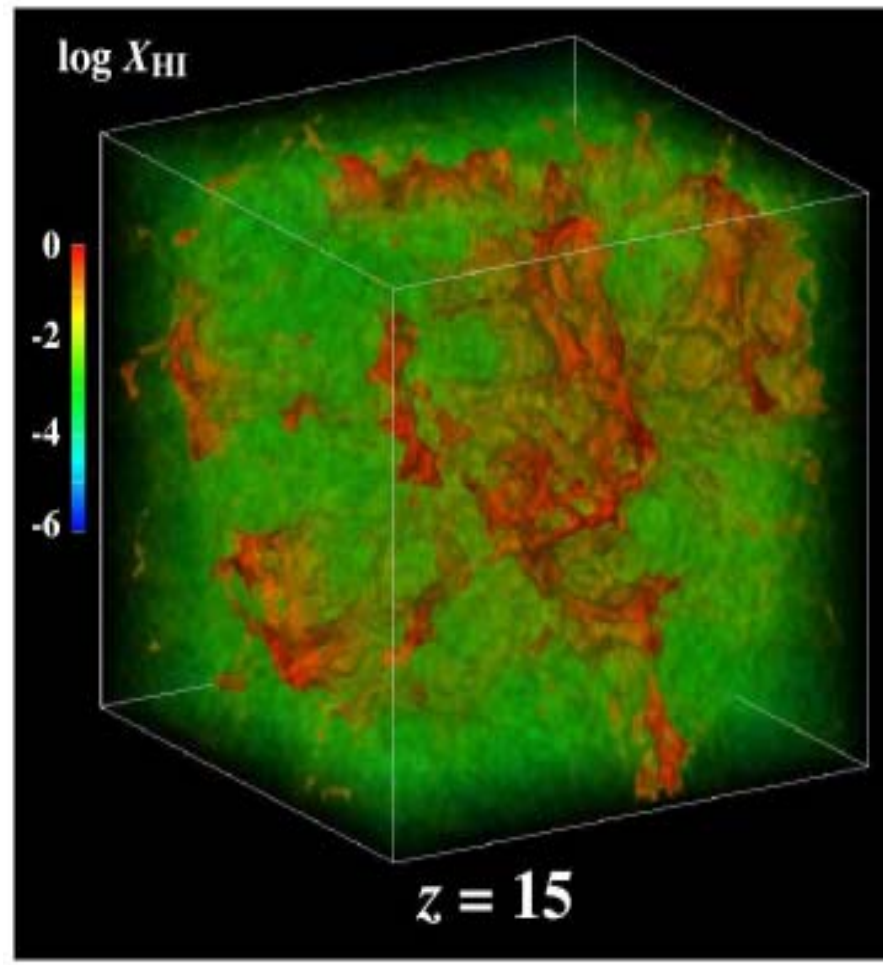
Isotropic background radiation,  $z = 15$

**Radiative Transfer**  
**Ionization Equilibrium**

**Neutral Fraction:**

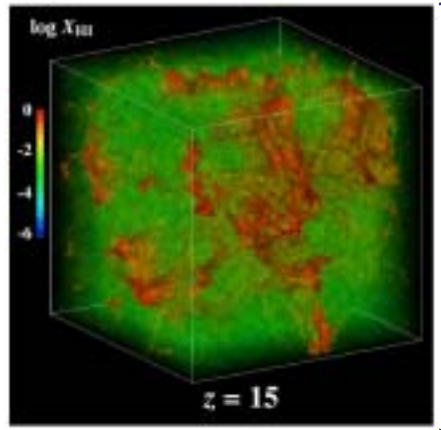
$$X_{\text{HI}} = \frac{n_{\text{HI}}}{n_{\text{H}}}$$

CP-PACS 256PU  
(理論ピーク ~80 GFlops)  
~ 100 hour



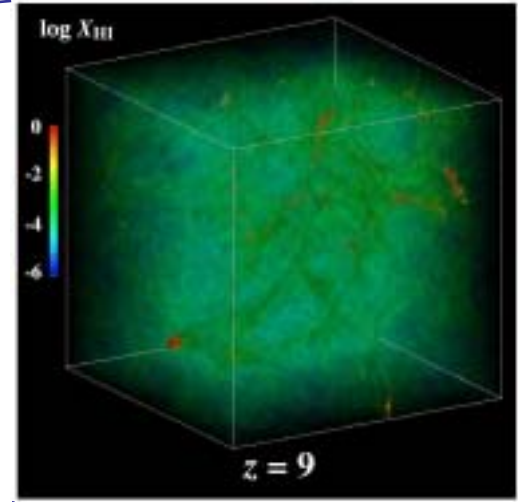
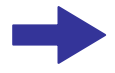
# Reionization History of an Inhomogeneous Universe

$I_{21}=0.1$

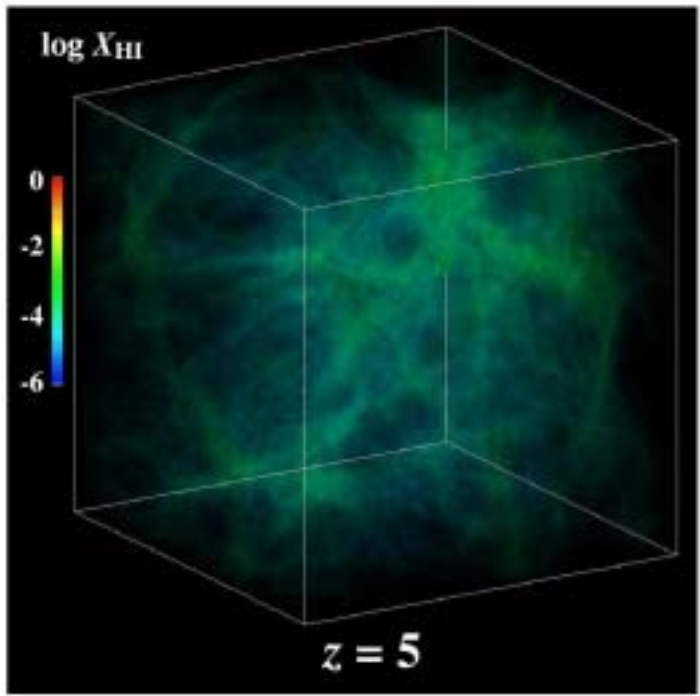


$Z=15$

$z = 15$

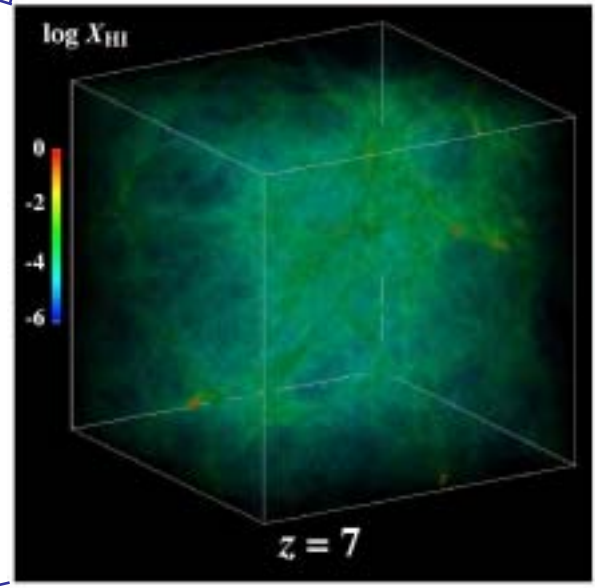


$Z=9$



$Z=5$

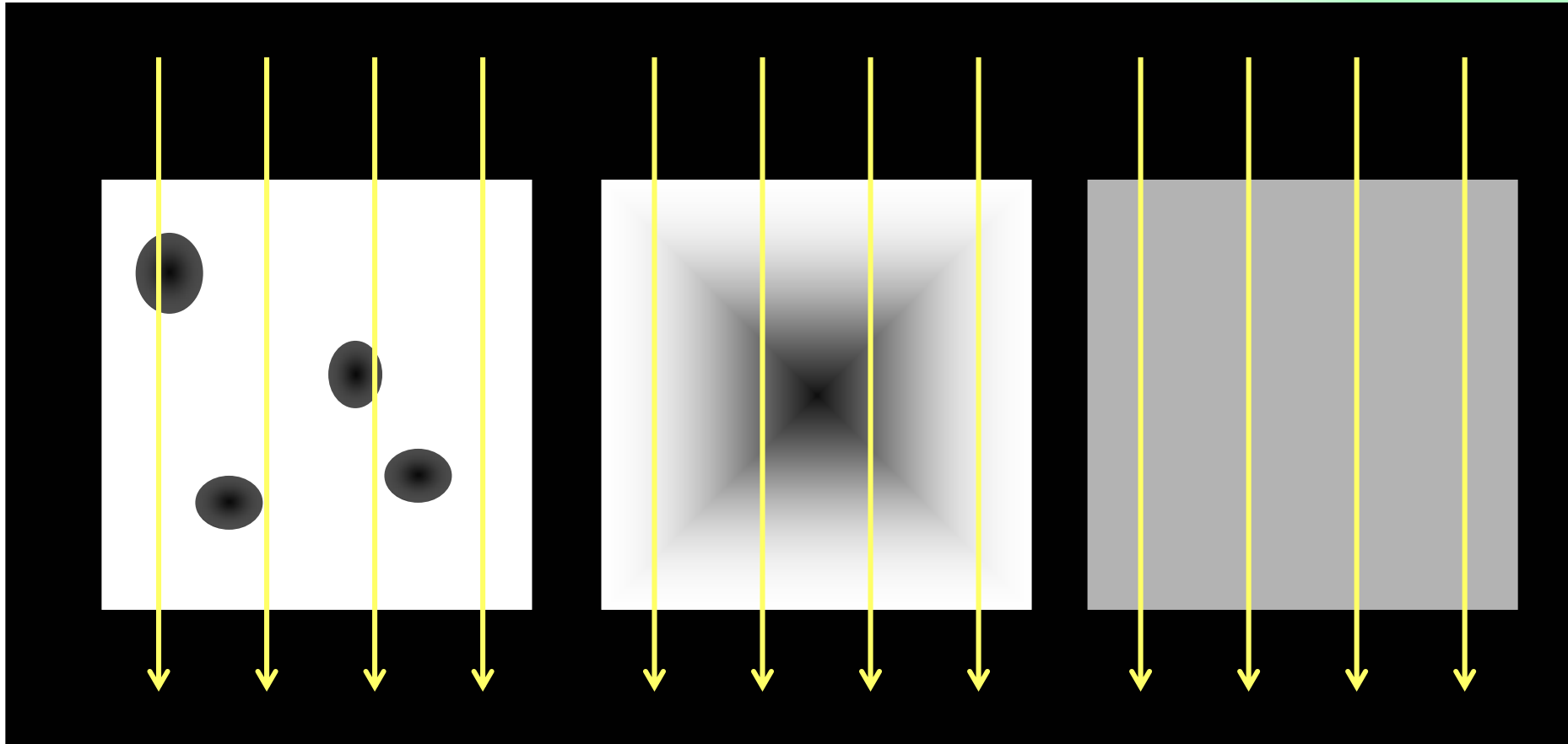
$z = 5$



$Z=7$

# Shadowing Effect

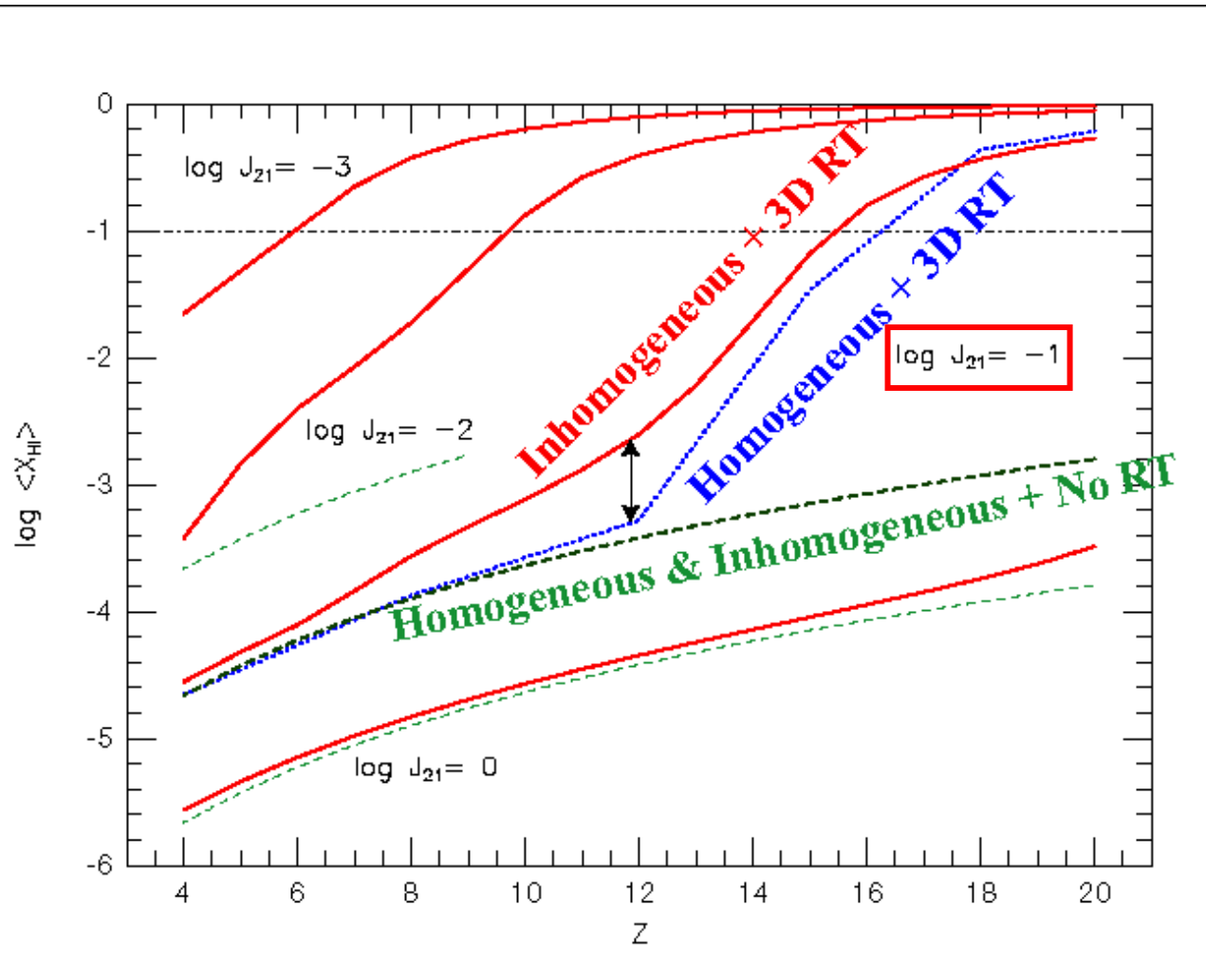
注: 同じ物質質量でも, 物質の  
分布の仕方の違いにより, 透過  
する輻射量が異なってくる



**Inhomogeneous**

**Homogeneous**

# Shadowing Effect



(1) 3D RT  
Raises Neutral Fraction  
in  
Optically Thick Region

(2) Inhomogeneity  
Raises Neutral Fraction  
in  
All Region

**Shadowing Effect  
is prominent at**

$$\langle X_{\text{HI}} \rangle \approx 10^{-3}$$

# 3D RHD: Cosmic Reionization

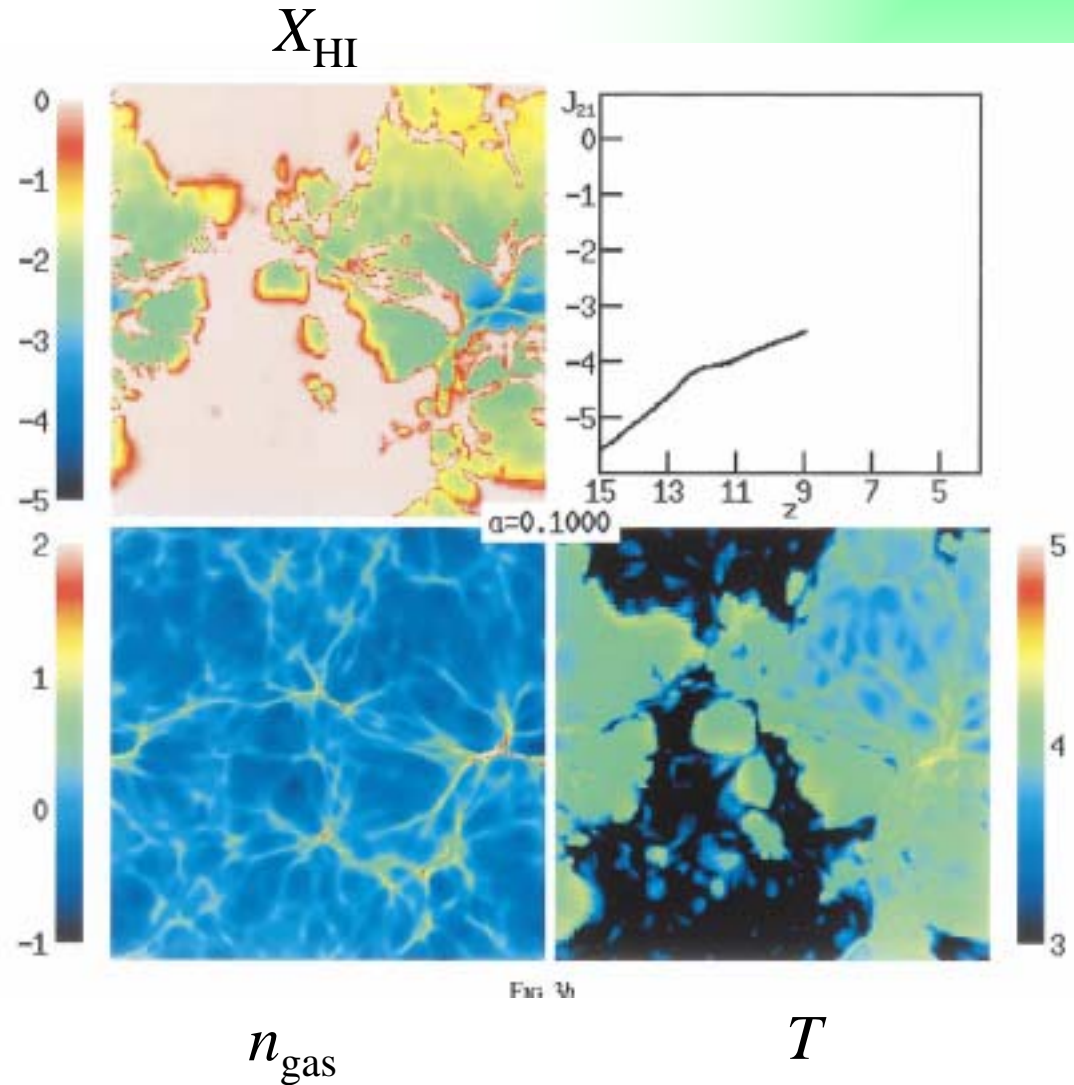
(Gnedin 2000)

 $z = 9$ Cosmological HD  $\sim 10^{10-12} M_{\text{sun}}$ 

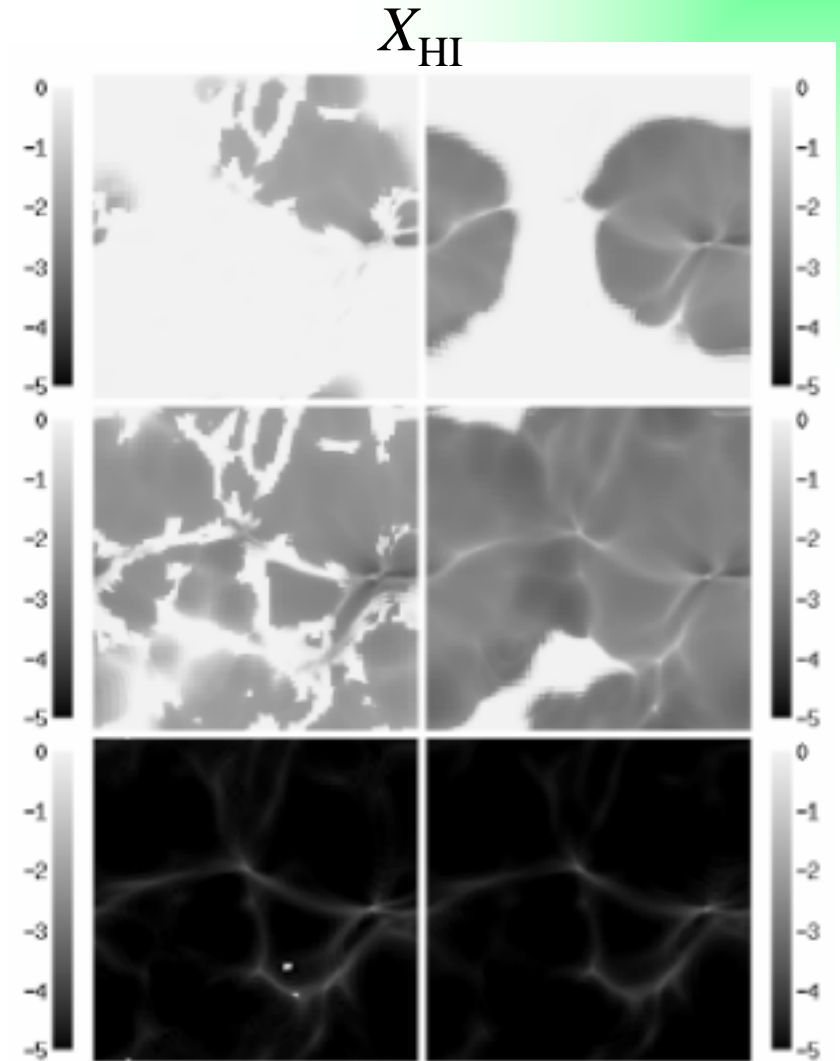
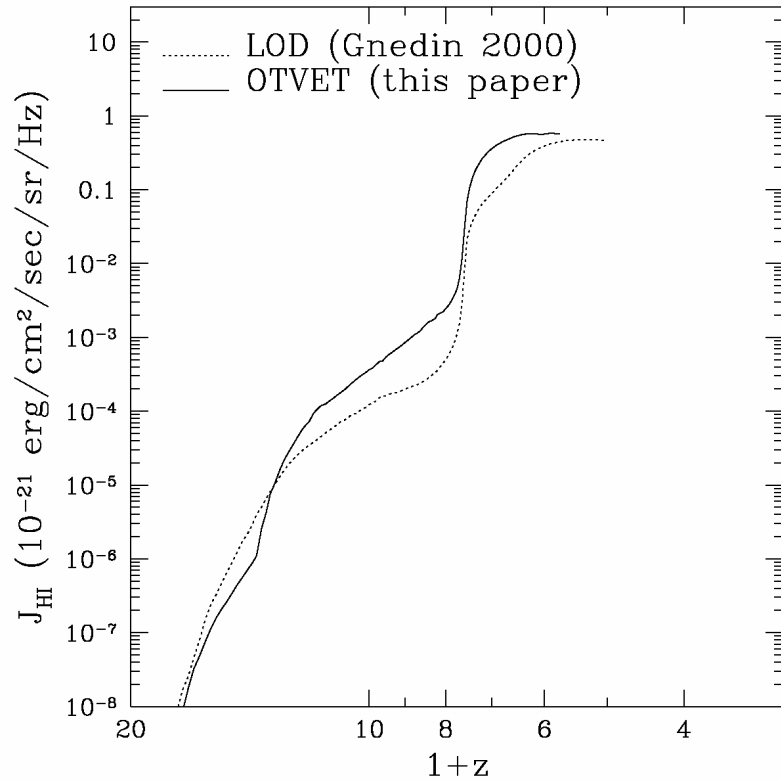
RT (Local Optical Depth 近似)

Star Formation

H, He

 $\text{H}_2$  form/dest

# Optically Thin Variable Eddington Tensor (Gnedin & Abel 2001)

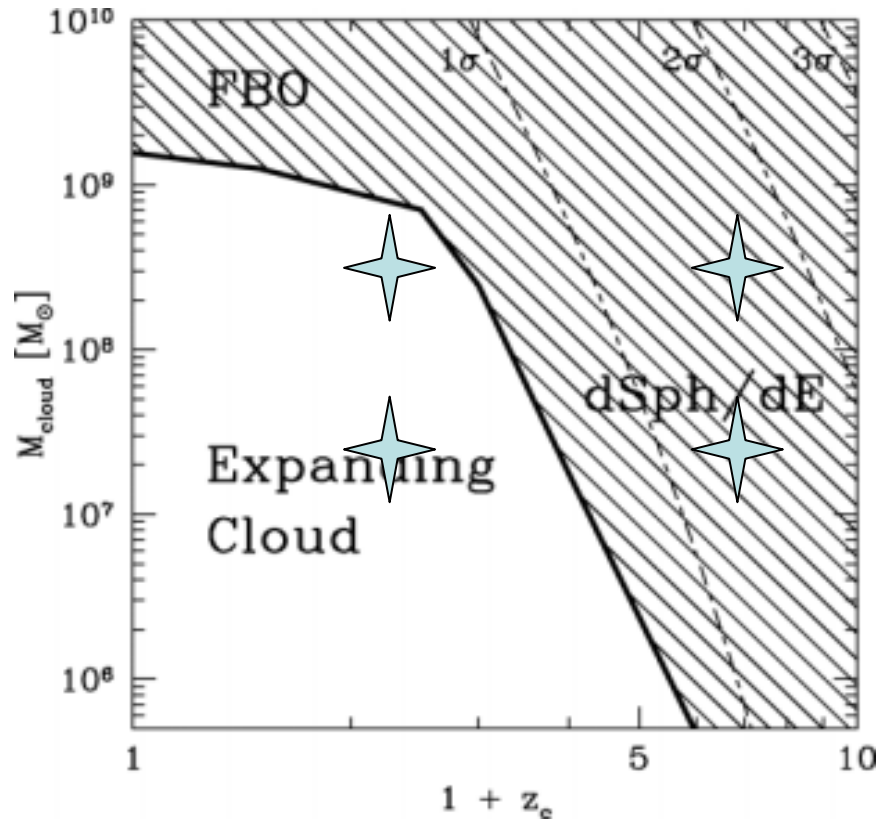


LOD

OTVET

# 3D RHD (SPH): 銀河形成

(Susa & Umemura, in prep.)



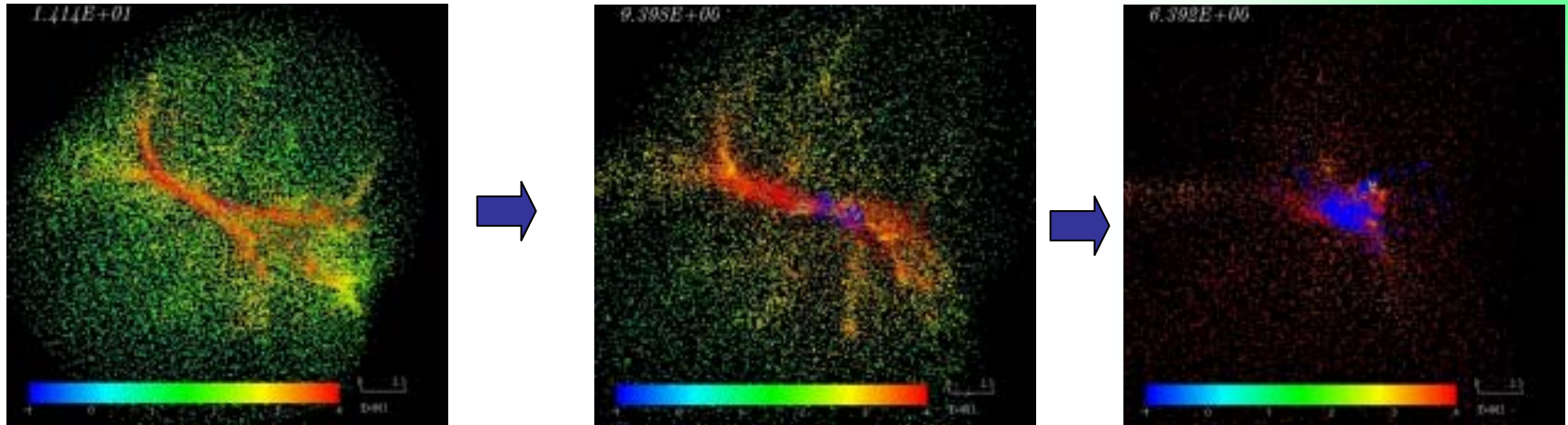
$$N_{\text{SPH}} = N_{\text{CDM}} = 2^{15}$$

$$z_c \sim 1.5, 6$$

$$M_{\text{tot}} = 2 \times 10^{8-9} M_{\odot}$$

Initial Condition by GRAFIC in  
COSMICS

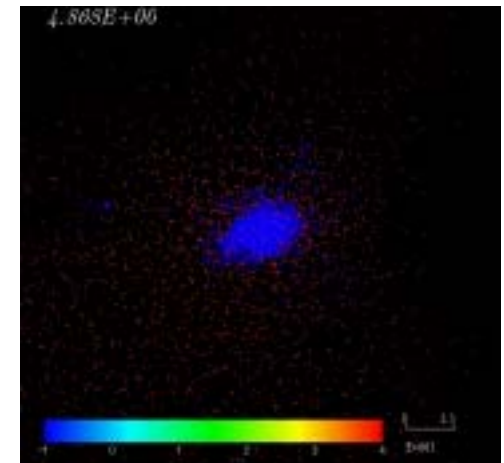
+ Rigid rotation with  $\beta = 0.05$



UVが(相対的に)弱く,  
 遮蔽効果も効いている時  
 (ガスが冷えて星が形成される)

$$z_c \sim 6$$

$$M_{\text{tot}} = 2 \times 10^9 M_{\odot}$$



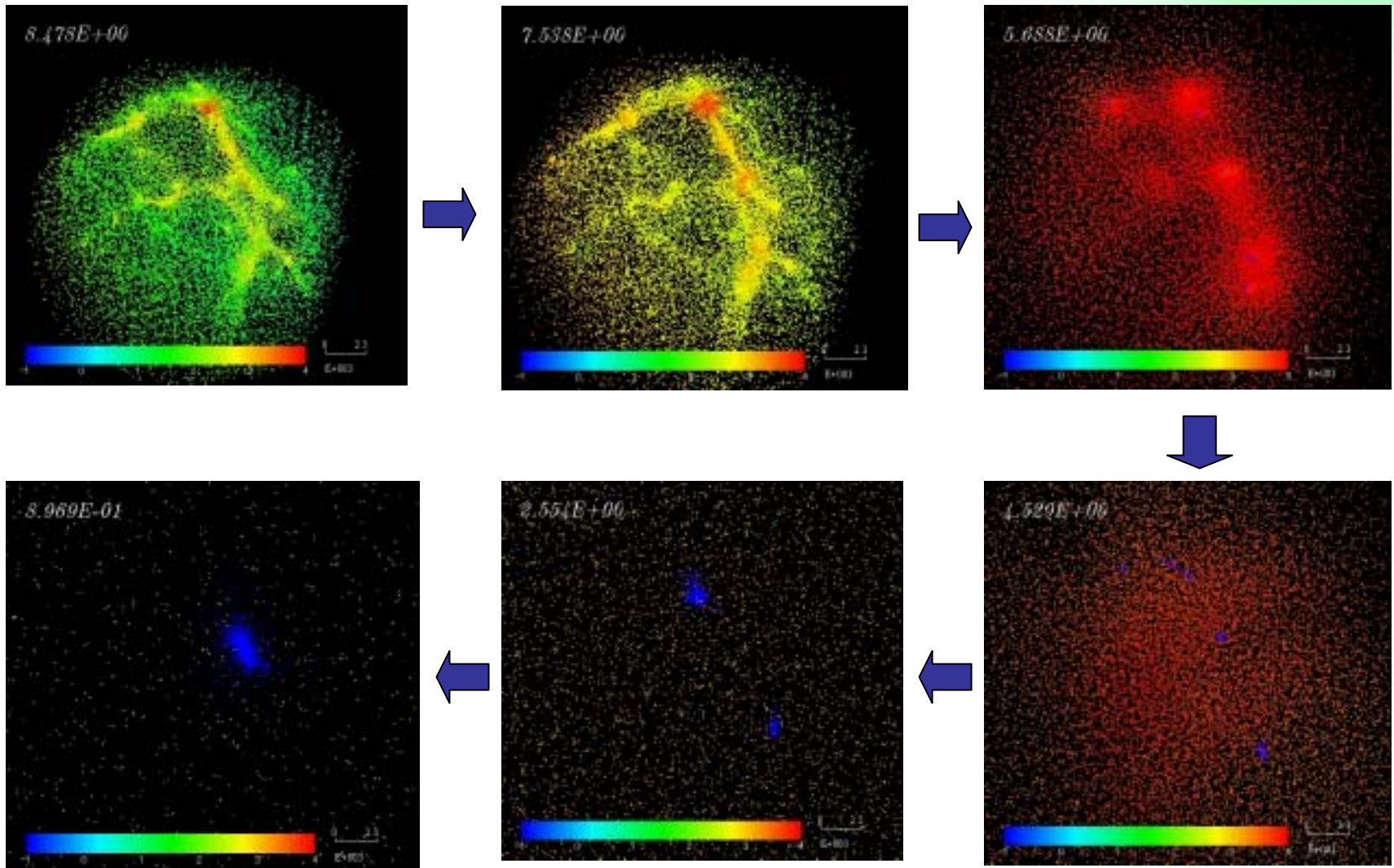
青色は星  
 その他はガス温度



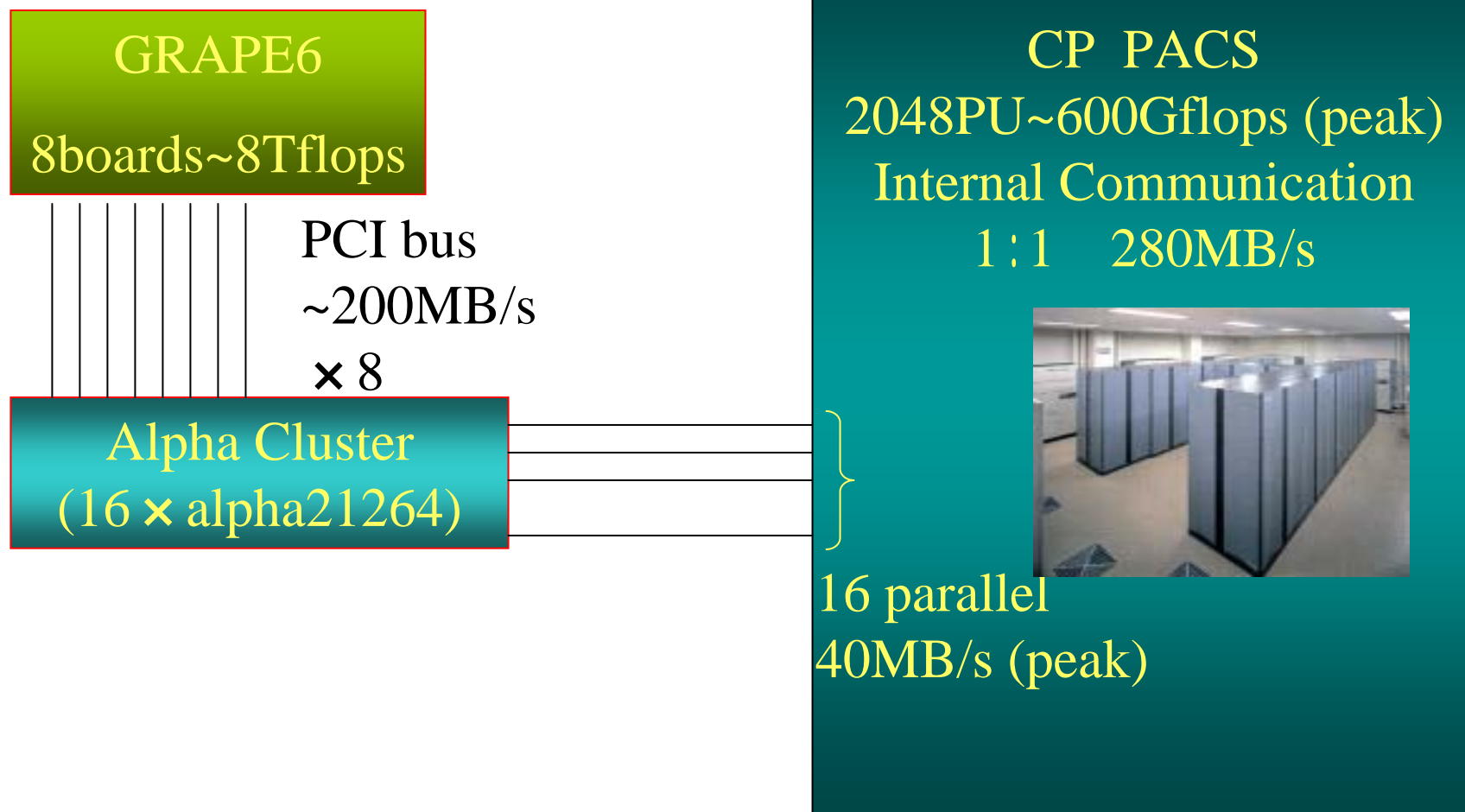
# UVが(相対的に)強く, 遮蔽効果も効いていない時 (ガスが冷えず星が形成されにくい)

青色は星  
その他はガス温度

$$z_c \sim 1.5 \quad M_{\text{tot}} = 2 \times 10^8 M_{\odot}$$



# Heterogeneous Multi Computer System



## 5. 今後

詳細な観測データ

詳細な輻射輸送・RHDシミュレーションの意義が  
より大きくなる

多次元輻射輸送・輻射流体力学シミュレーションは黎明期

今後:

輻射輸送

- ・Ray Tracing の工夫
- ・Iteration の改良

RHD

- ・近い将来      Flux Limited Diffusion (FLD)
- ・その先        Variable Eddington Factor (VEF)