

FIRSTにおける輻射流体力学

須佐 元 (立教大学)

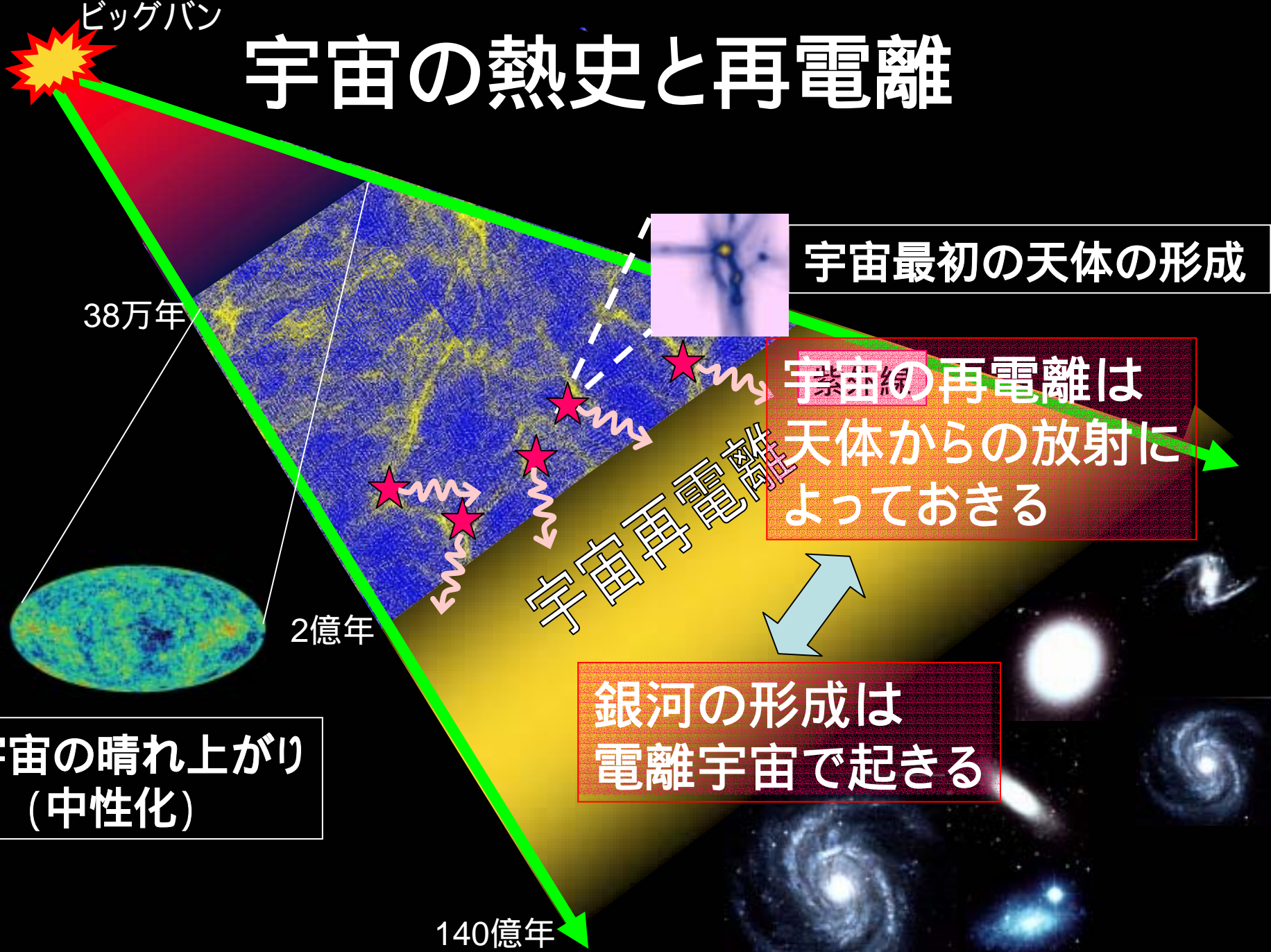
於 筑波大学 2005.2.17

Contents

- 宇宙初期天体形成に関する輻射輸送の重要性
- これまでのHMCSによる試み
- FIRSTでどこまでできるか？
- FIRST用コード
- まとめ

ビッグバン

宇宙の熱史と再電離



Photoheating (光電離に伴う加熱)



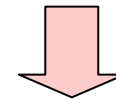
光子 $h\nu > 13.6\text{eV}$



$$\frac{1}{2}m_e v^2 = h\nu - 13.6\text{eV}$$

の運動エネルギーを持つ

中性水素



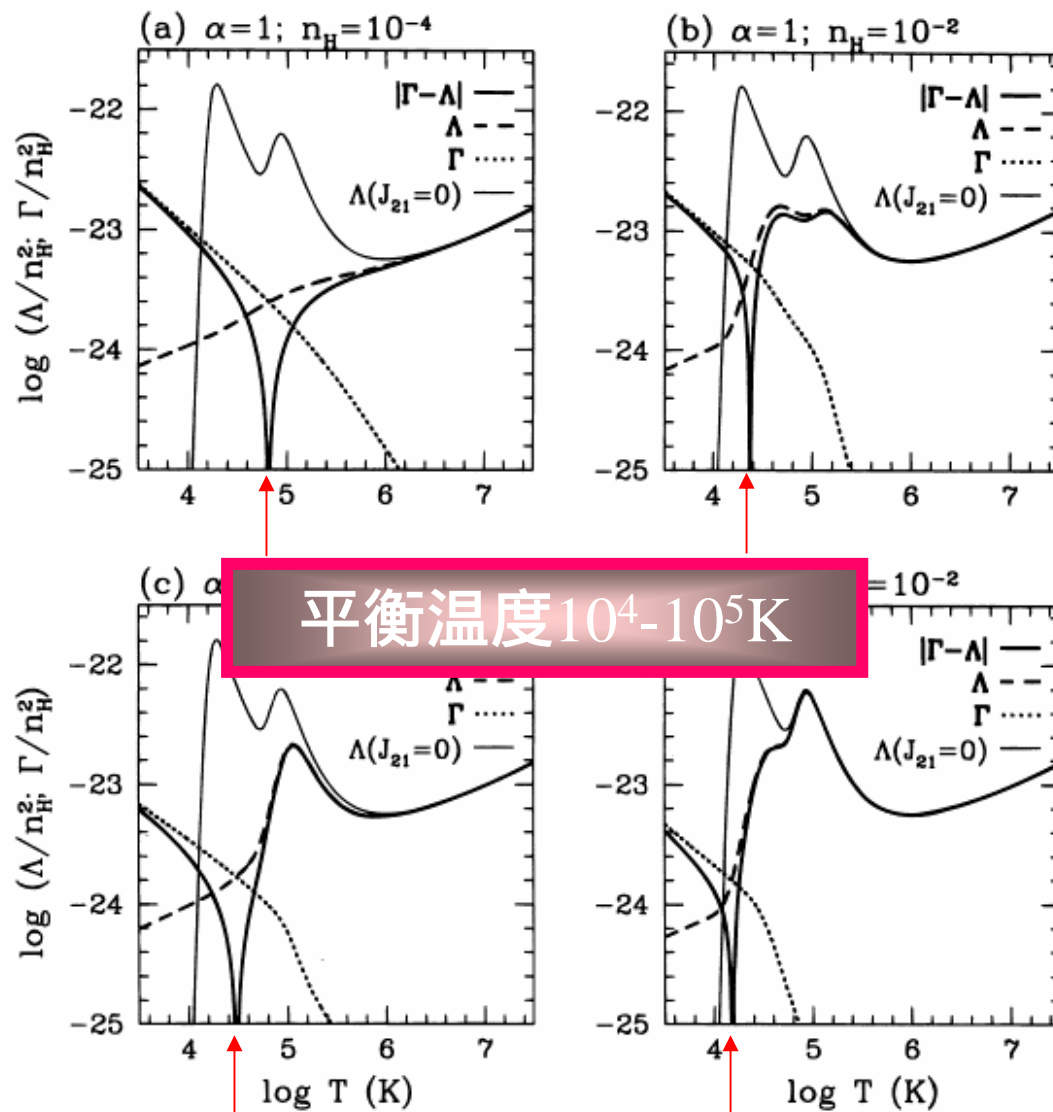
この高速電子が周りの電子、陽子と緩和し、平均エネルギー(温度)を上げる。加熱

紫外線加熱の原始銀河形成への物理的影響

- 気体の温度 10^4 - 10^5 K
- 光蒸発 (ビリアル温度1万度以下の銀河の破壊)
- 銀河中での星形成の抑制.

紫外線輻射場中の原始ガス冷却率、加熱率

Thoul & Weinberg 1996



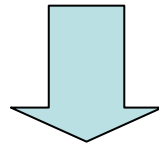
紫外線加熱の原始銀河形成への物理的影響

- 気体の温度 10^4 - 10^5 K
- 光蒸発 (ビリアル温度1万度以下の銀河の破壊)
- 銀河中での星形成の抑制.

電離加熱による「蒸発」 (Photoevaporation)

ジーンズ質量 : ガスの圧力勾配 = 重力

$$\frac{P}{R} \simeq \frac{GMm_p}{R^2}$$



$$M_J \simeq 10^{7.5} M_{\odot} \left(\frac{T}{10^5 \text{K}} \right)^{3/2} \left(\frac{n_H}{1 \text{cm}^{-3}} \right)^{-1/2}$$

ジーンズ質量よりも小さな天体は電離加熱されたガスをポテンシャルにとどめておくことができずにガスを失い、「蒸発」してしまう。

紫外線加熱の原始銀河形成への物理的影響

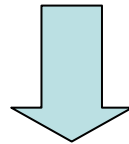
- 気体の温度 10^4 - 10^5 K
- 光蒸発 (ビリアル温度1万度以下の銀河の破壊)
- 銀河中での星形成の抑制.

光加熱による星形成の抑制

銀河中の星の形成は本質的に銀河中の密度の揺らぎが自己重力で成長する過程

然るに電離加熱されたガスのジーンズ質量(それ以下の質量では重力収縮できない質量)は非常に大きい。

$$M_J \approx 10^6 M_\odot \left(\frac{T}{10^4 K} \right)^{1.5} \left(\frac{n_H}{1 \text{cm}^{-3}} \right)^{-0.5} \gg \text{星の質量}$$



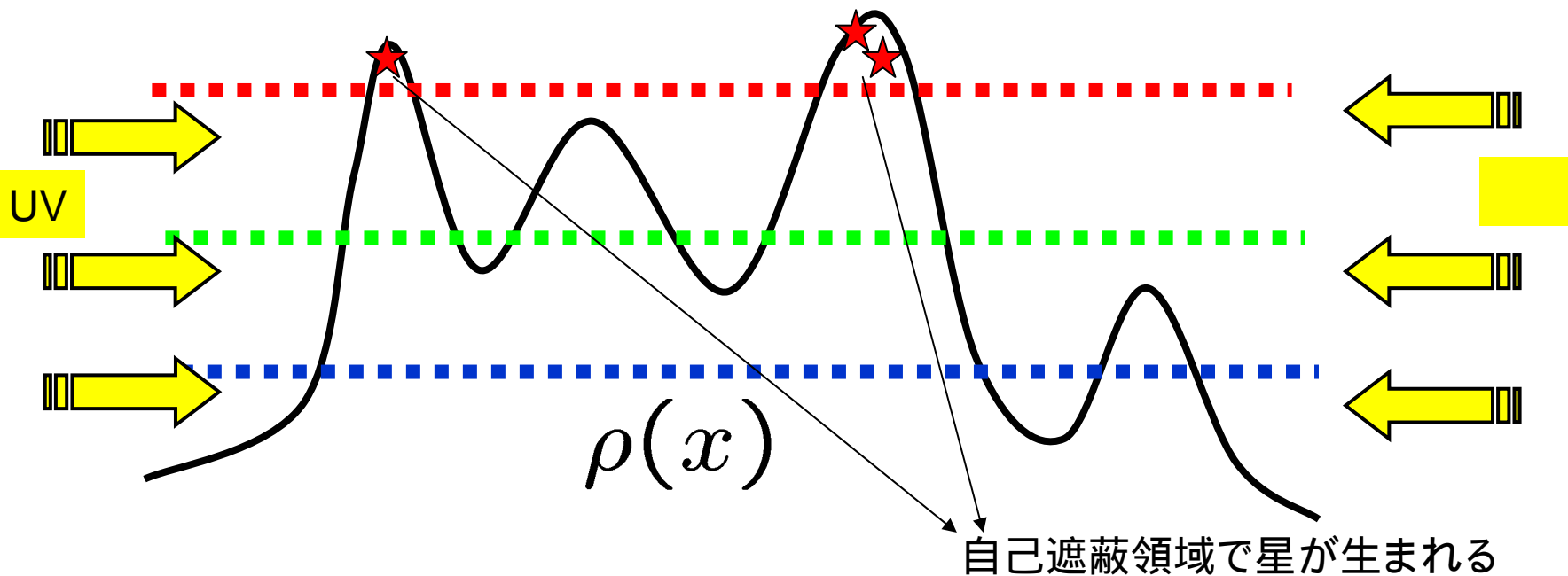
銀河のポテンシャル中からガスが失われなくても、その銀河中での星の形成は著しく阻害される。

輻射輸送の重要性

光蒸発、星形成の抑制などは電離光子が浸透した場合の話

$$\mathbf{n} \cdot \nabla I = \overset{\text{放射}}{\eta} - \overset{\text{吸収}}{\chi} I$$

紫外線による加熱がどこまで浸透できるのか？

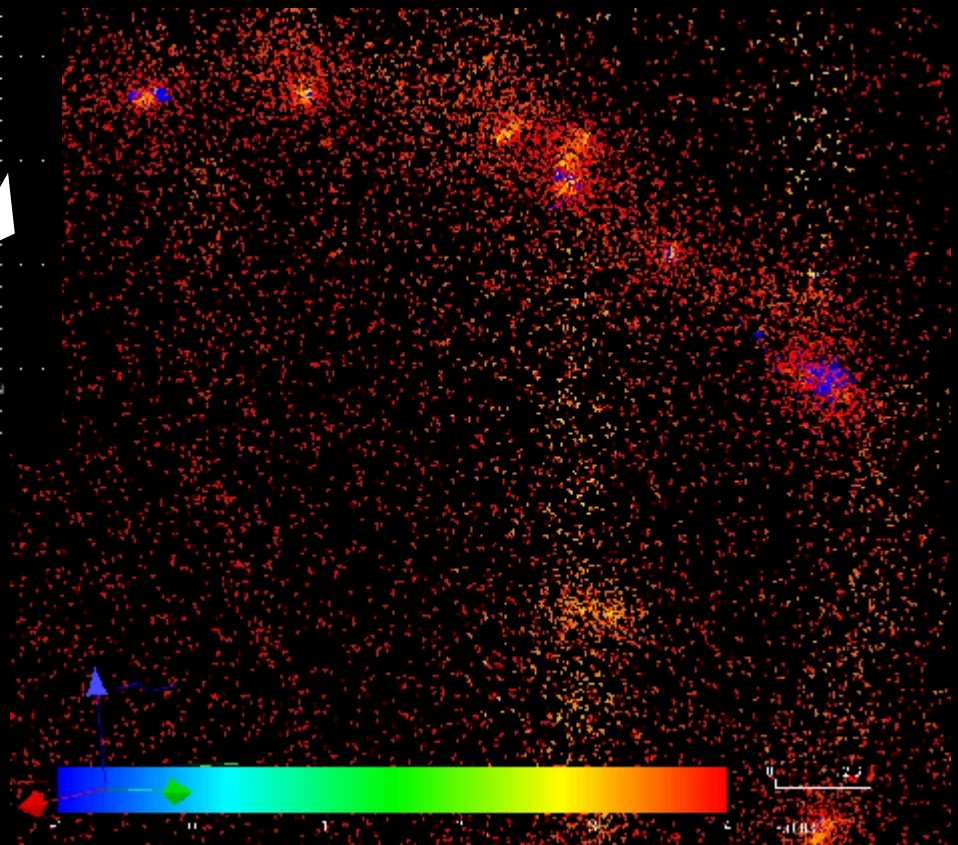
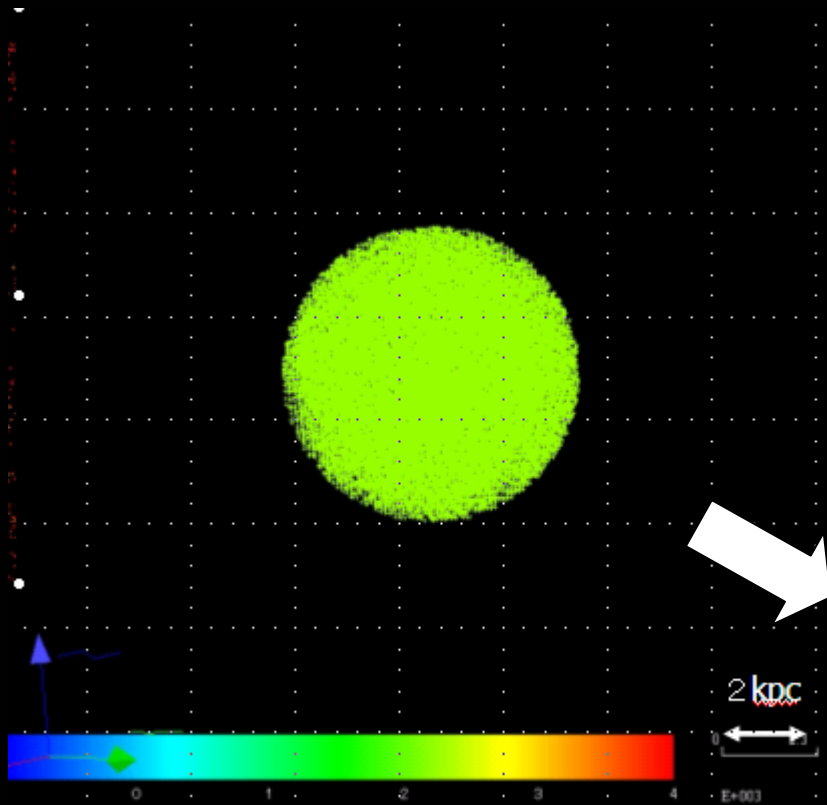


これまでの HMCSシステムによる計算

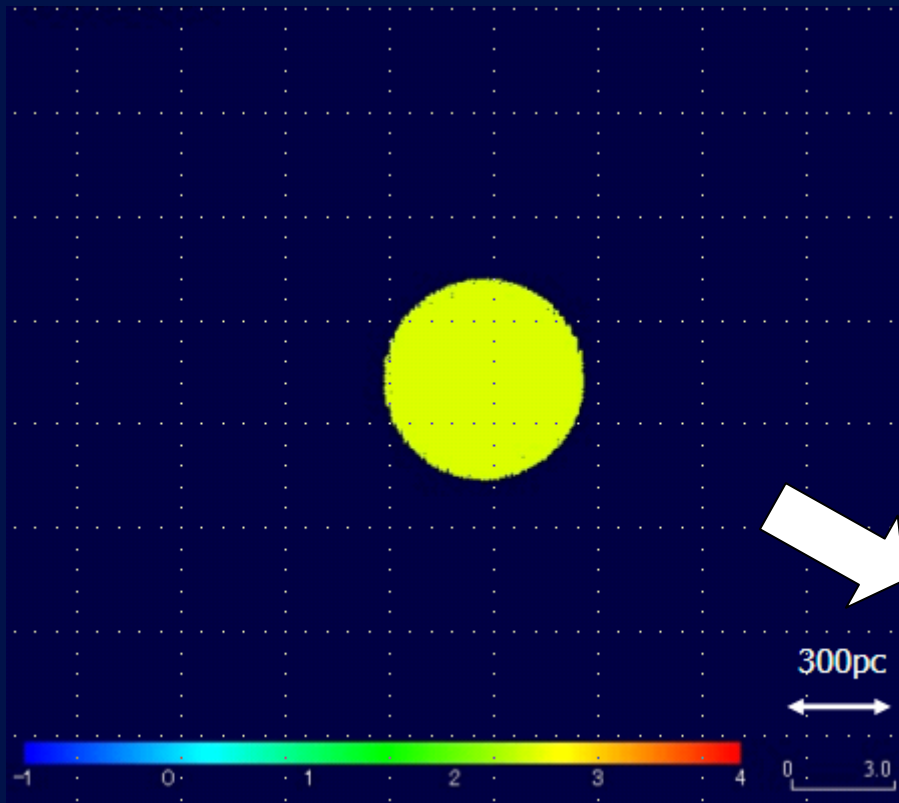
- 流体はSPH法
- 重力はHMCSを介してGRAPE6 (専用計算機)で行う。
- 化学反応、輻射輸送はPCクラスタで行う。
- $N \sim O(10^5)$

密度揺らぎからの矮小銀河の形成 ($M=10^9$ 太陽質量, 形成時期 $z \sim 2$)

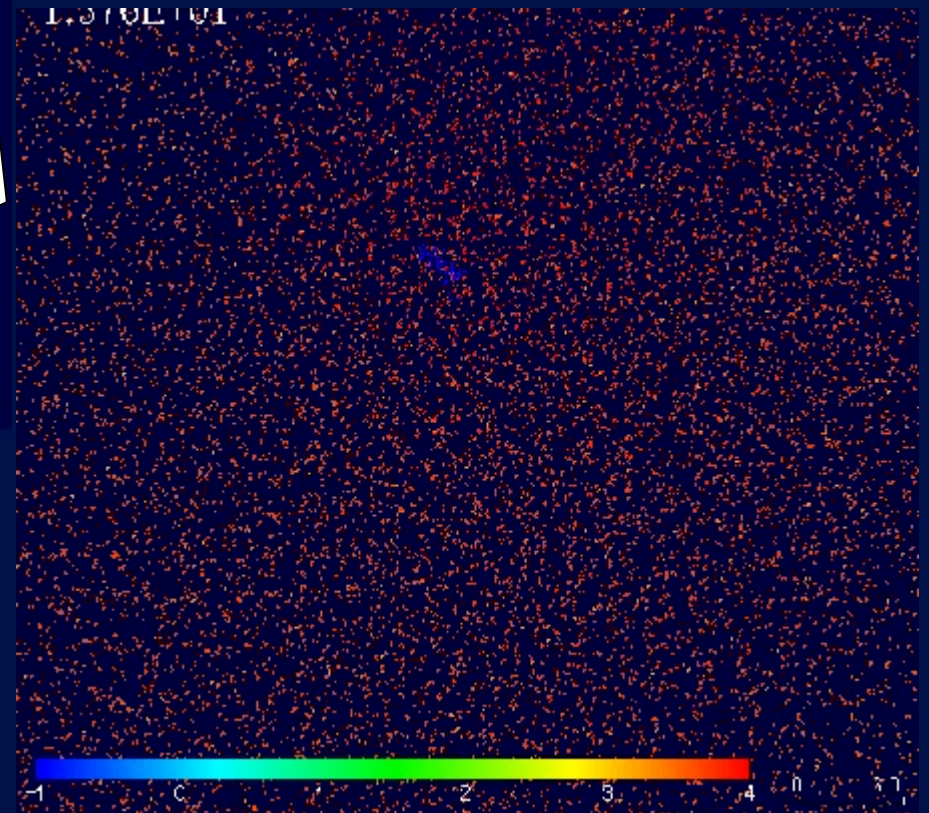
電離加熱を受けるがポテンシャルが深い
ために密度ピークで星が形成される。



密度揺らぎからの矮小銀河の形成 ($M=10^7$ 太陽質量, 形成時期 $z \sim 10$)



重力が弱いため電離加熱で蒸発する

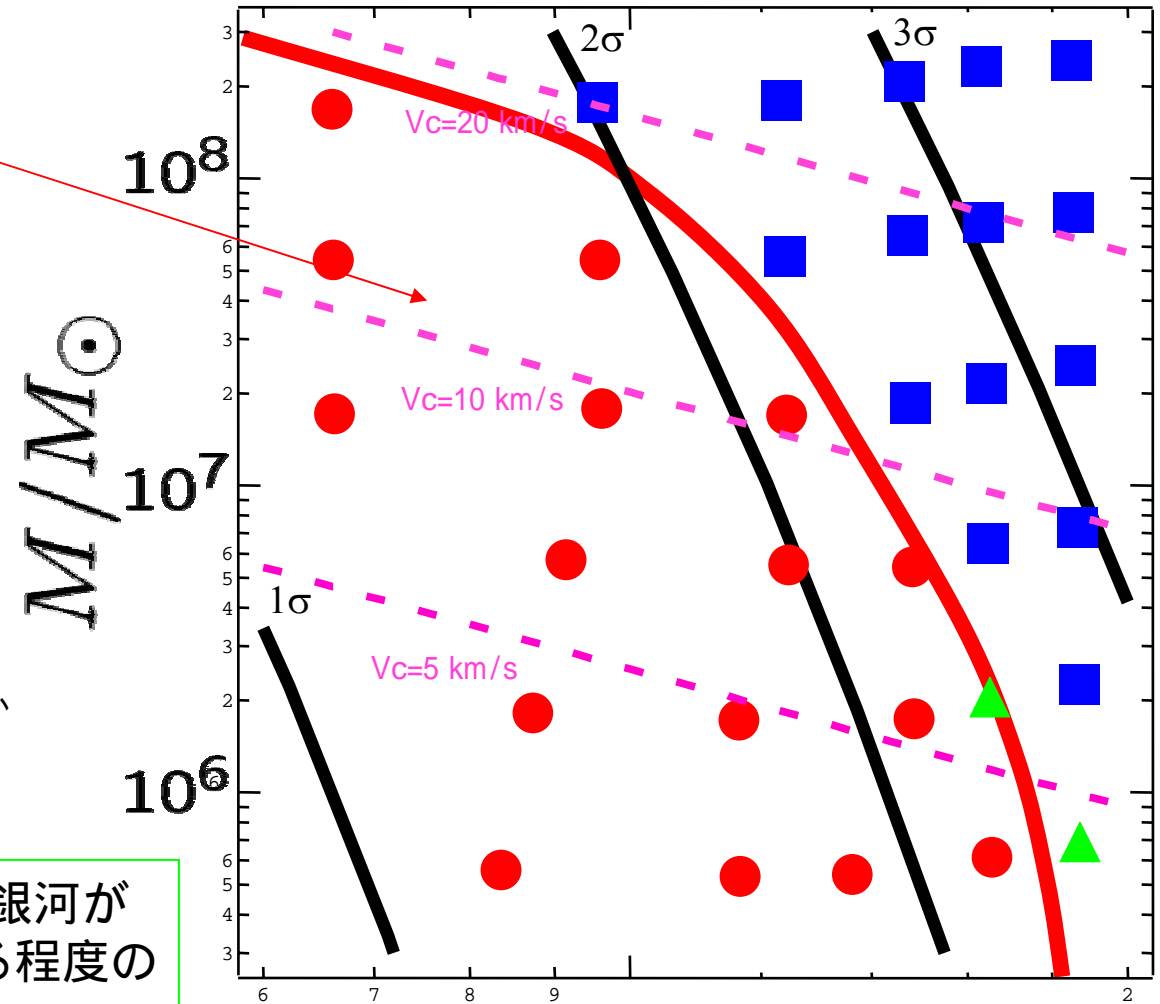


パラメータスタディ

銀河ができない領域

10^8 太陽質量以下の天体は、基本的に銀河になれない。

標準的な宇宙論では小さな銀河ができ過ぎる問題に対するある程度の答えを与える。



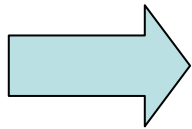
Susa & Umemura 2004b

$1+z_c$ (形成時期)

FIRSTでより現実に近い 取り扱いへ向けて

1. 星形成をある程度正しく取り扱うために、**超高分解能の計算**を行う。
2. 内部の**複数の光源**を正しく取り扱い、自己整合的な計算を目指す。

小銀河の形成への輻射フィードバック、という問題の枠組みを超えて、

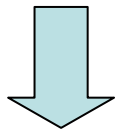


1. 宇宙初期の星の質量分布 (初期質量関数)
2. 宇宙の再電離史
3. より大きな銀河の計算

1. に関して要求される分解能

$$M_{RES} \approx 10 - 100 M_{\odot}$$

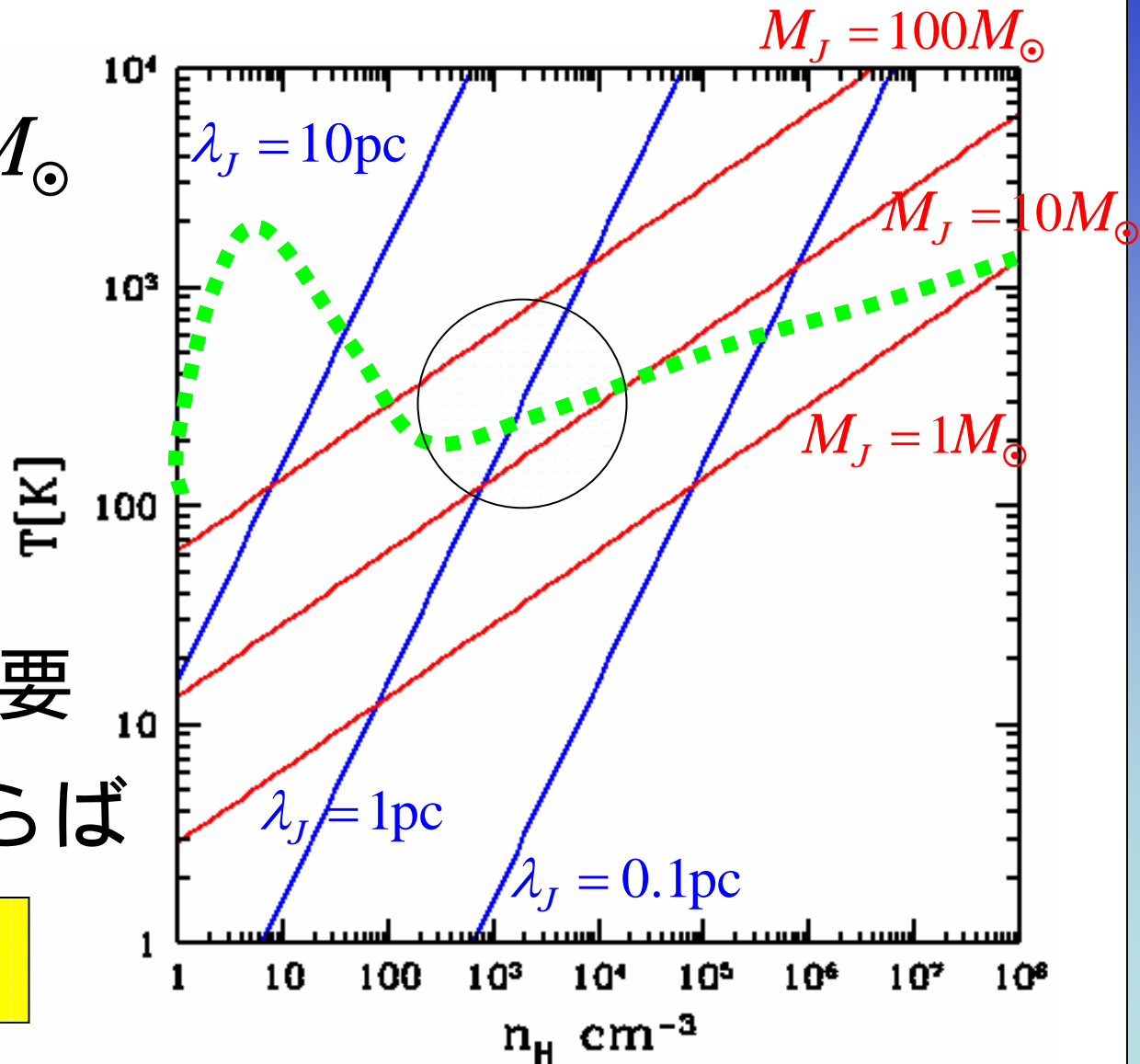
$$\lambda_{RES} \approx 1 \text{ pc}$$



$M_{SPH} = 1 M_{\odot}$ が必要

$M_{gas} \approx 10^7 M_{\odot}$ ならば

1千万粒子必要



光学的厚さ()

$$\frac{dI}{ds} = -\chi I \quad \longrightarrow \quad \frac{dI}{d\tau} = -I$$

$$\tau \equiv \int_0^s \chi ds \left[= \int_0^s n\sigma ds \right]$$

光源から粒子までの
積分量

吸収体の個数密度

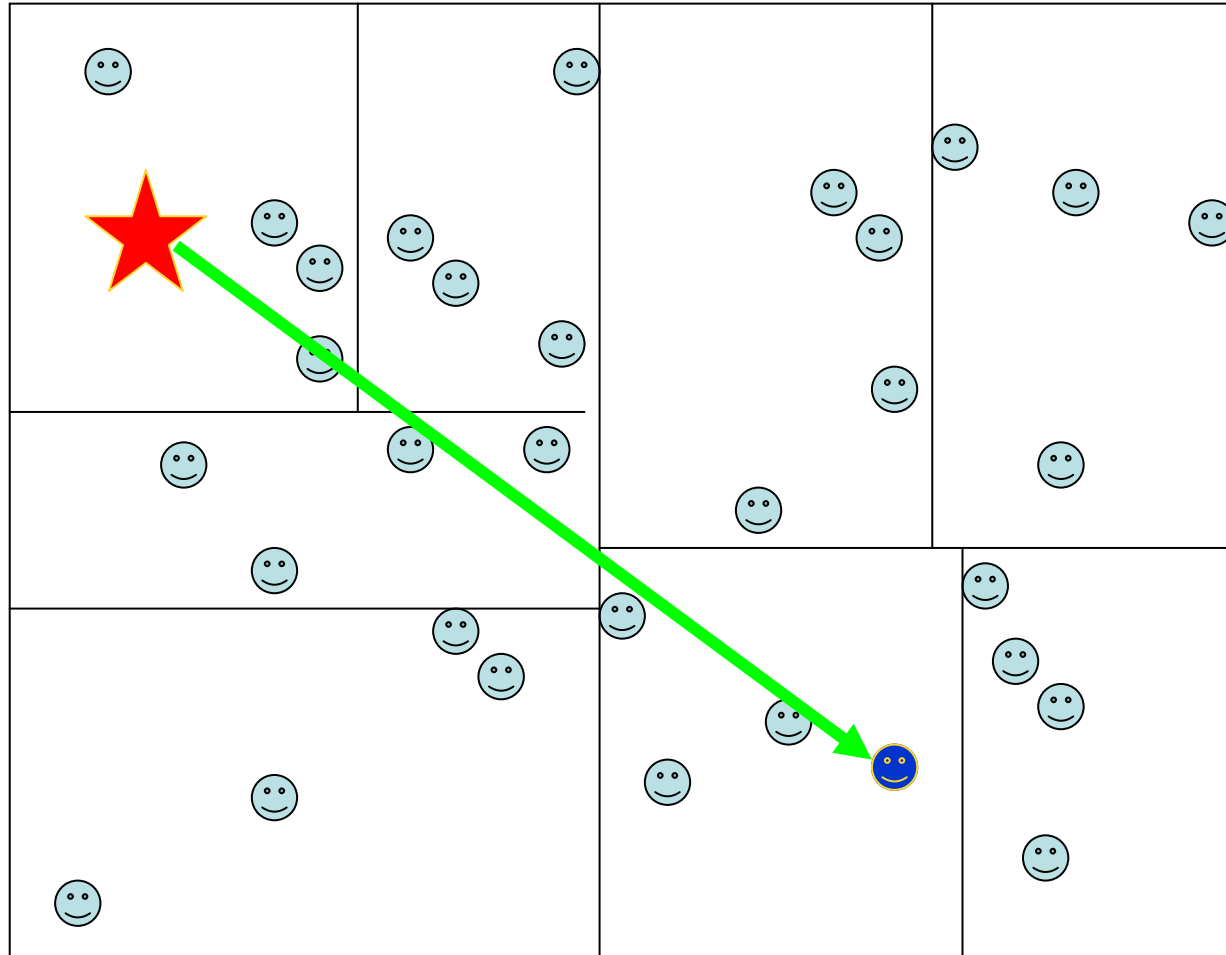
吸収断面積



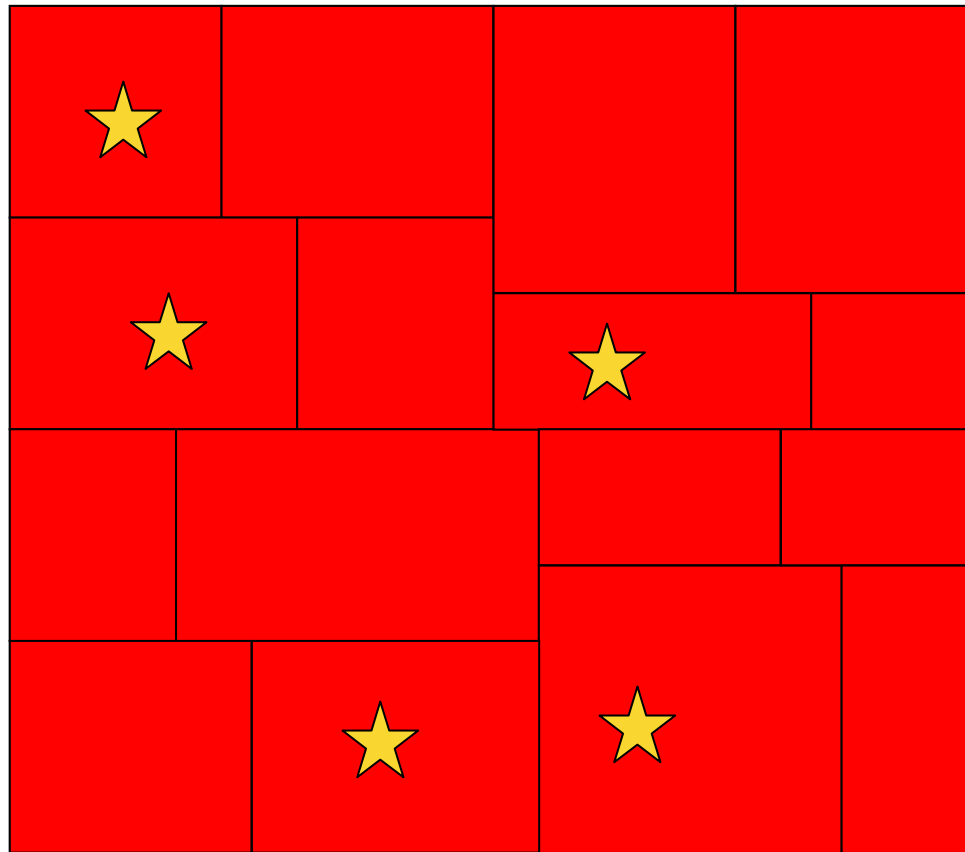
$$I = I_0 e^{-\tau}$$

光学的厚さは吸収の程度をあらわす
無次元量。

並列化時のロードバランスをとるための領域分割 (ORB)



光学的厚さ計算の五月雨式並列化



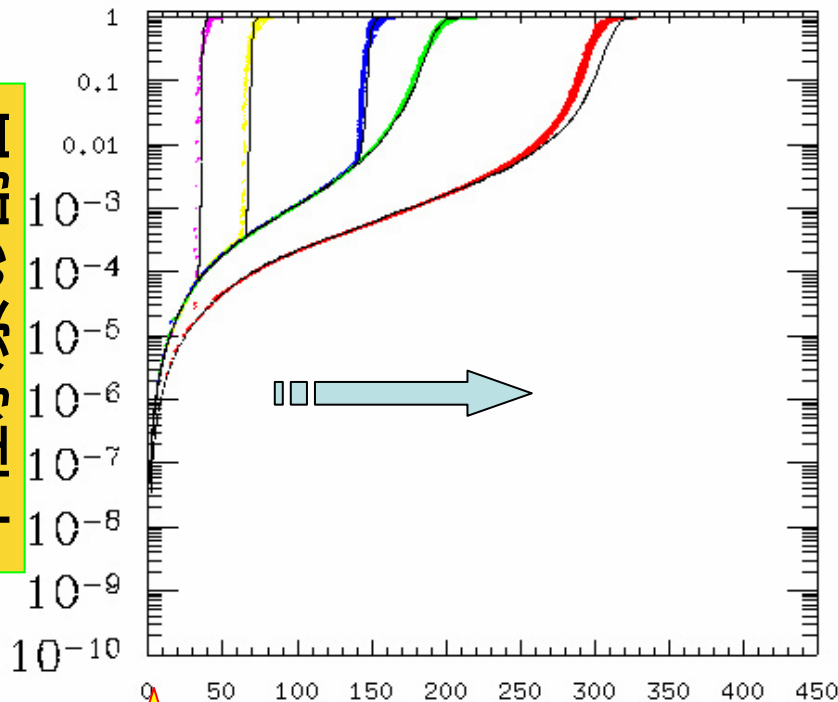
注)「五月雨式」梅雨の雨のように途中途切れながらもだらだらと続くこと

電離波面伝播テスト(1次元との比較)

一様密度場中の電離領域の拡大テスト

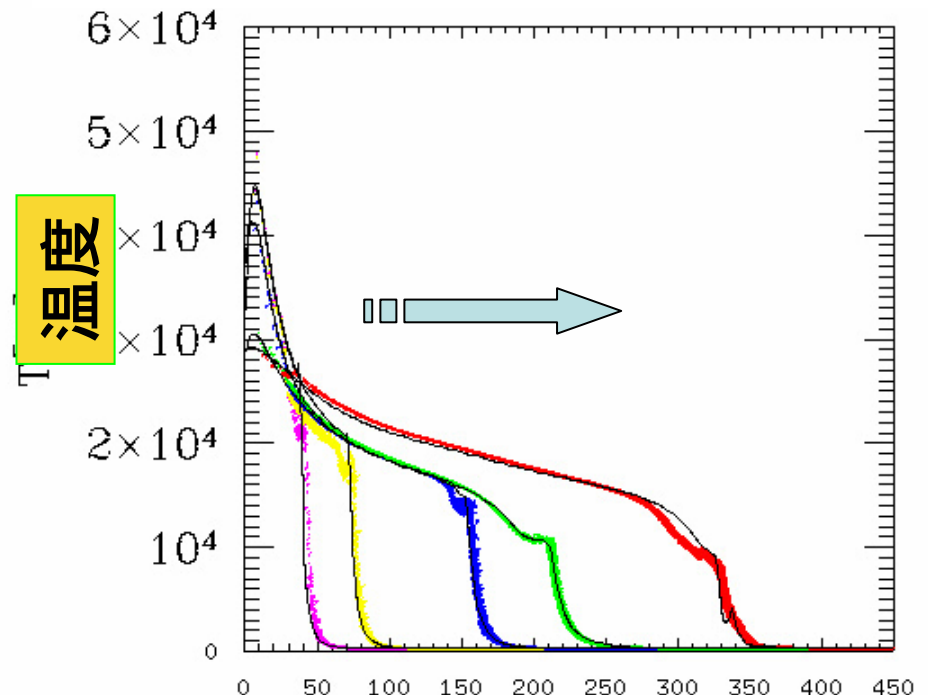
黒実線: 1次元計算結果
色つき: RSPHの計算結果

中性水素の割合



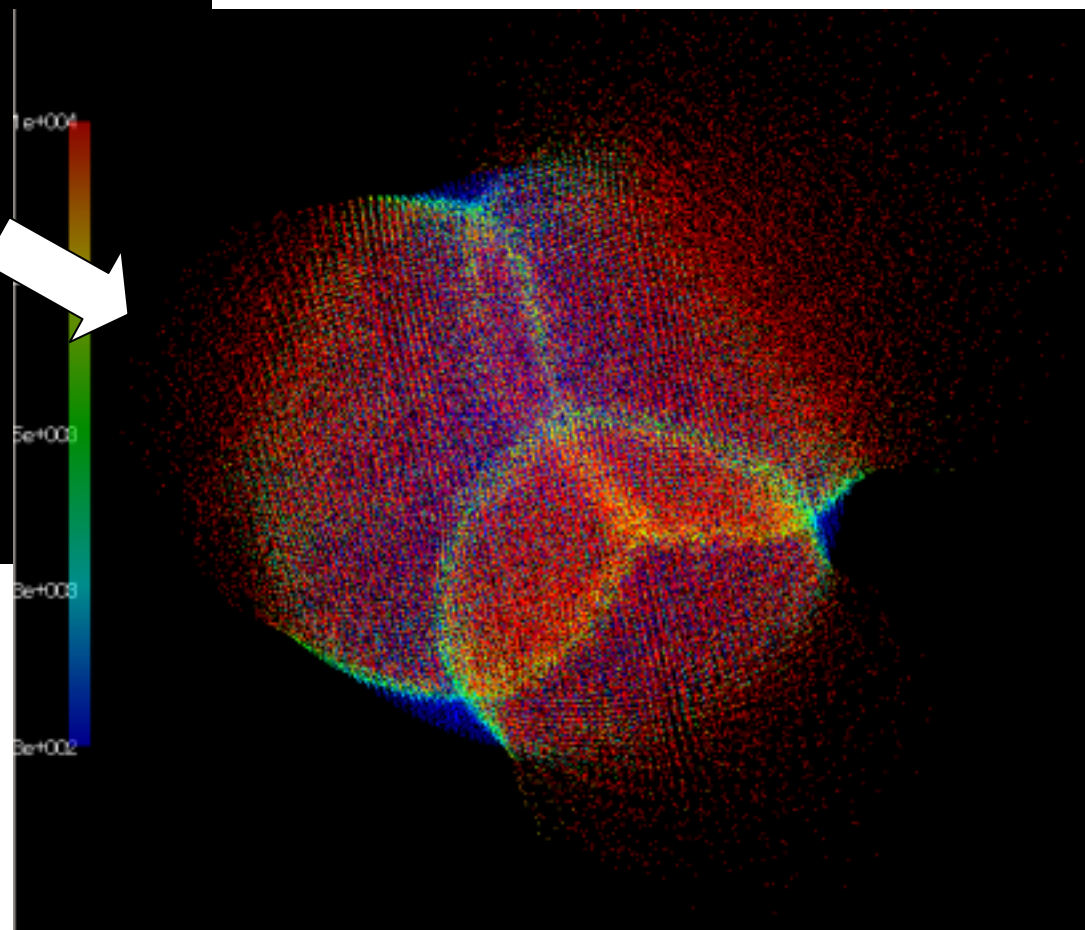
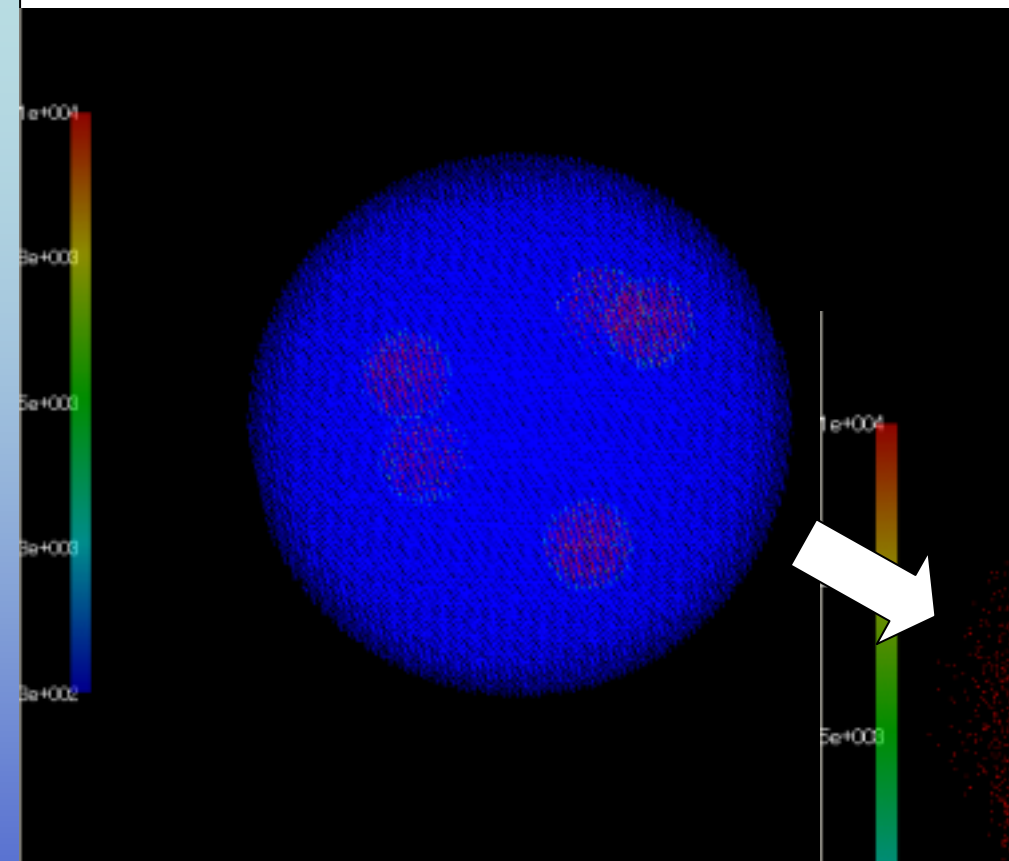
星からの距離

温度



星からの距離

一様な冷たいガス中での電離波面の伝播



要求される計算時間

- 私が我慢できる計算時間 ~ 2 month
- 必要な時間ステップ ~ 10万

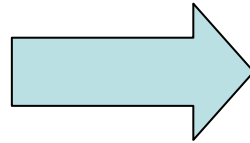
$$t \text{ s/step} = \frac{2 \text{ month}}{10^5 \text{ step}} = 52 \text{ s/step}$$



なんにしるステップあたり1分以内に収めないため。

現状の計算速度

ソース5個の計算(電離波面伝播)
Gbpsネットワーク・P4が8ノード
 2^{18} SPH粒子(2^{15} SPH粒子/ノード)



約9秒/ステップ

+ 重力計算の部分

$$2^{15} \times 512 = 2^{24} = 16777216$$

(ノードあたりの粒子数は上の計算と同じで1000万規模)

スケーリング予想

ノードあたりの計算量、通信量

計算の待ち

$$t_{1\text{step}} \approx t_1 \frac{N}{N_{PU}} N_{PU}^{1/3} = t_1 \frac{N}{N_{PU}^{2/3}}$$

$$\approx 9s \left[\frac{N}{2^{18}} \right] \left[\frac{N_{PU}}{8} \right]^{-2/3}$$

$$\approx 36s \left[\frac{N}{2^{24}} \right] \left[\frac{N_{PU}}{512} \right]^{-2/3}$$

まとめ

- 銀河形成において輻射輸送、特に紫外線の輻射輸送の問題は重要である。
- FIRSTプロジェクト向けに、銀河形成の問題と輻射輸送を内部のソースを含めて計算するコードを開発中。
- 超並列にしたときにどうなるか？