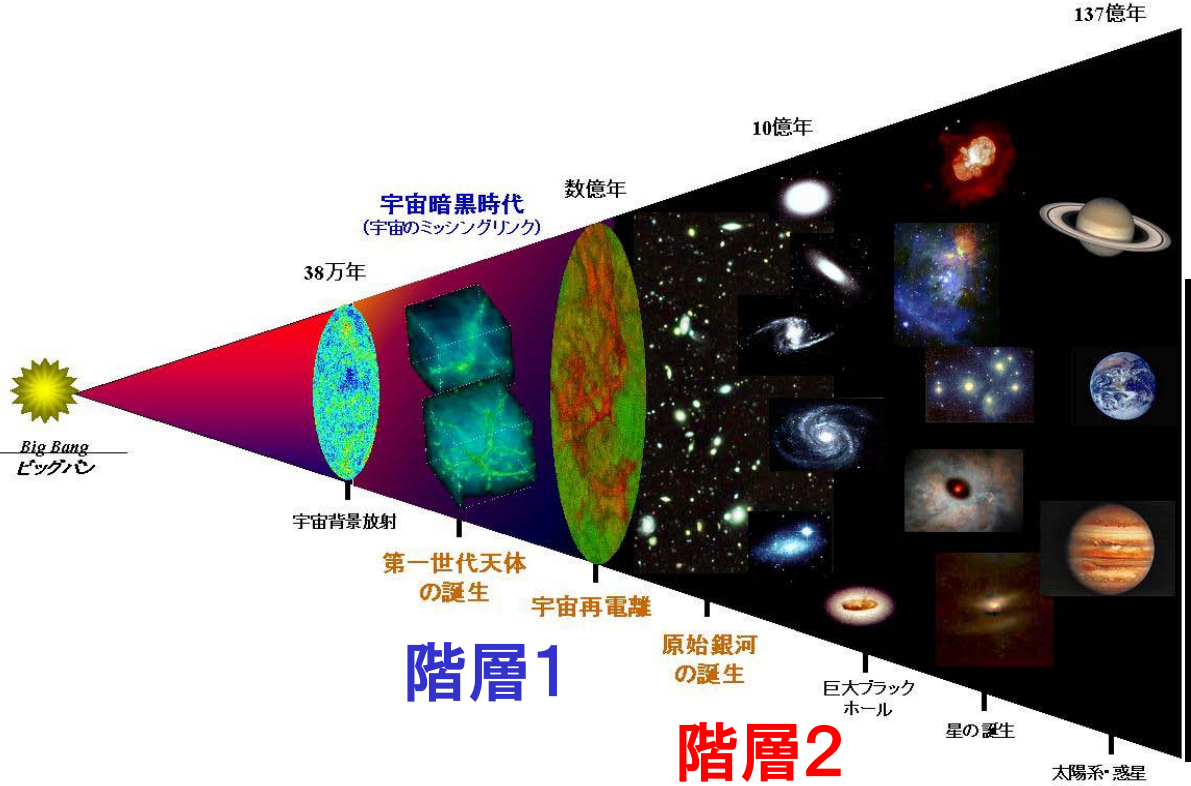
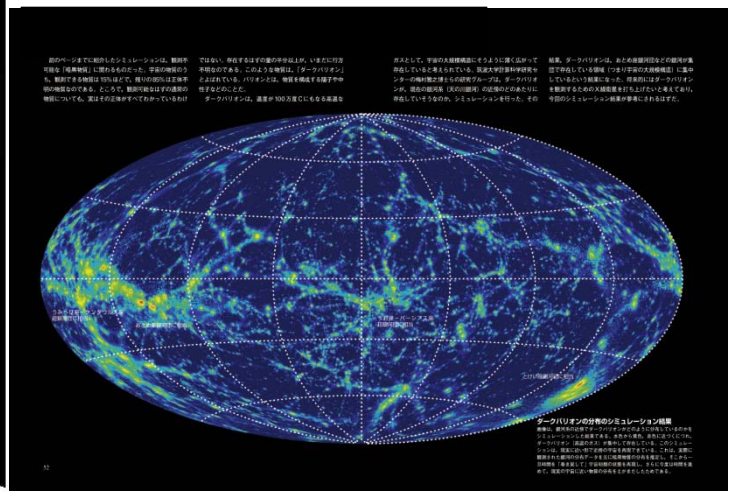
多成分自己重力系の緩和過程における階層間の類似性と特異性の探究



階層3

銀河団
宇宙大規模構造



ダークマター(無衝突系)＋ガス(散逸系)＋星(非散逸系)

組織と役割分担

代表	梅村 雅之 （筑波大学計算科学研究セ，教授）	一階層1
共同研究者	森　正夫 （筑波大学計算科学研究セ，准教授）	一階層2
〃	吉川　耕司 （筑波大学計算科学研究セ，講師）	一階層3
〃	諏訪　多聞 （筑波大学計算科学研究セ，研究員）	一階層1
〃	赤堀　卓也 （筑波大学計算科学研究セ，研究員）	一階層3
〃	長谷川　賢二（筑波大学計算科学研究セ，研究員）	一階層1
〃	清水　一紘 （筑波大学計算科学研究セ，研究員）	一階層2
〃	矢島　秀伸 （筑波大学数理物質科学，D2）	一階層2
〃	佐藤　大介 （筑波大学数理物質科学，D2）	一階層1

研究成果の概要

1. 原始銀河からの電離光子脱出に関する3次元輻射輸送シミュレーション

2. 原始銀河形成時に放出されるライマンアルファ輝線の空間分布

3. 衝突銀河団の数値シミュレーション

宇宙時間

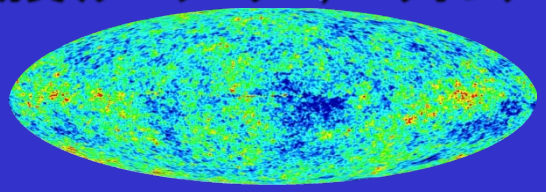
赤方偏移z

ビッグバン

10^{-44}秒

輻射（光）

物質（ダークマター，バリオン）



50万年 — 10^3

宇宙の晴れ上がり（中性化）

中性状態

宇宙暗黒時代

第一世代天体

1億年 — 15

宇宙再電離

QSO　QSO

5億年 — 7

電離状態

銀河形成

dE

E

S0

SB

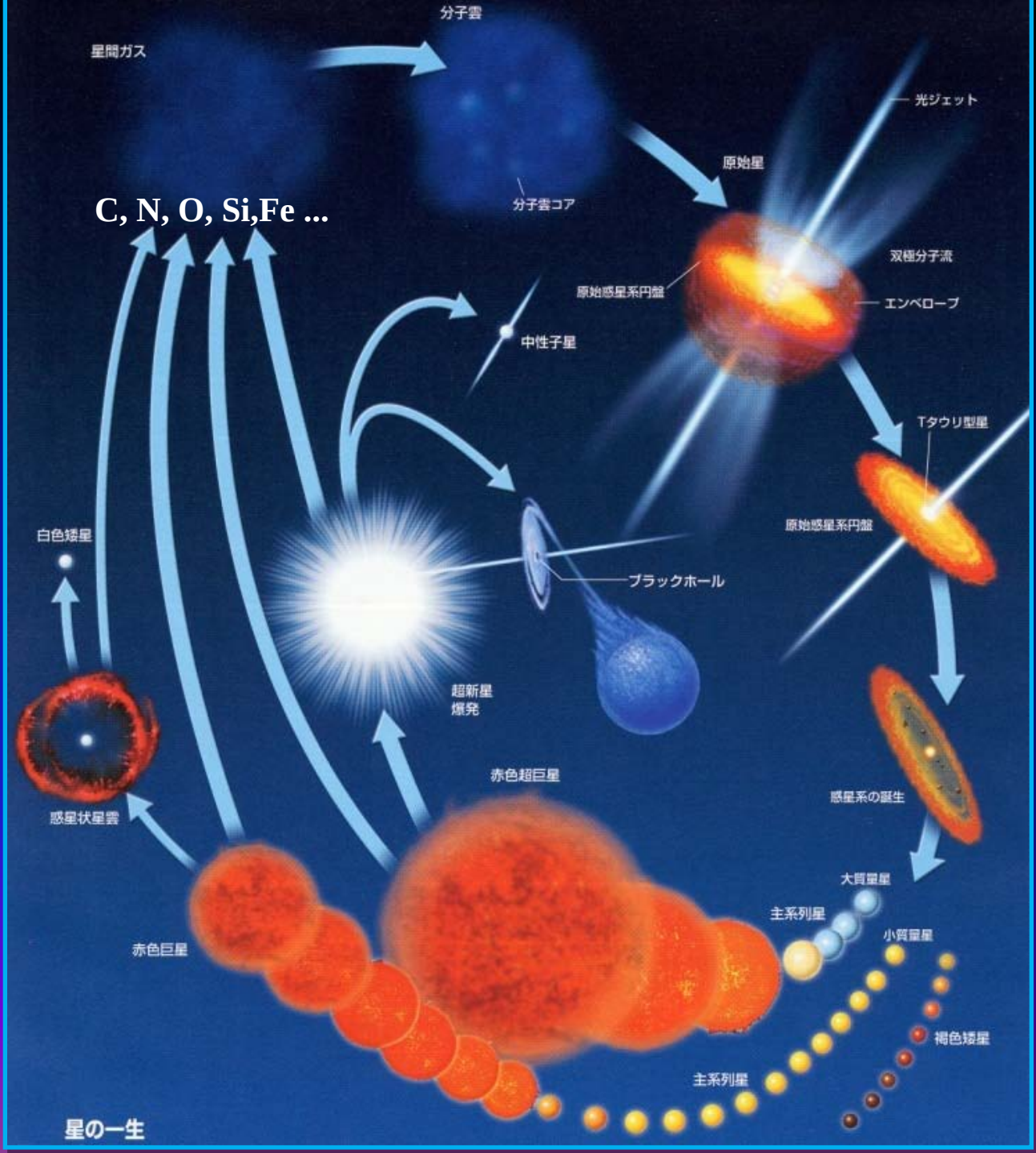
S

dI

1

137億年（現在） — 0

原始銀河中の物質循環


C, N, O, Si,Fe ...
分子雲
星間ガス
光ジェット
原始星
分子雲コア
双極分子流
原始惑星系円盤
エンベロープ
中性子星
Tタウリ型星
原始惑星系円盤
白色矮星
ブラックホール
超新星
爆発
赤色超巨星
惑星状星雲
惑星系の誕生
大質量星
主系列星
小質量星
赤色巨星
褐色矮星
主系列星
星の一生

原始銀河誕生のシミュレーション

By Earth Simulator & CP-PACS

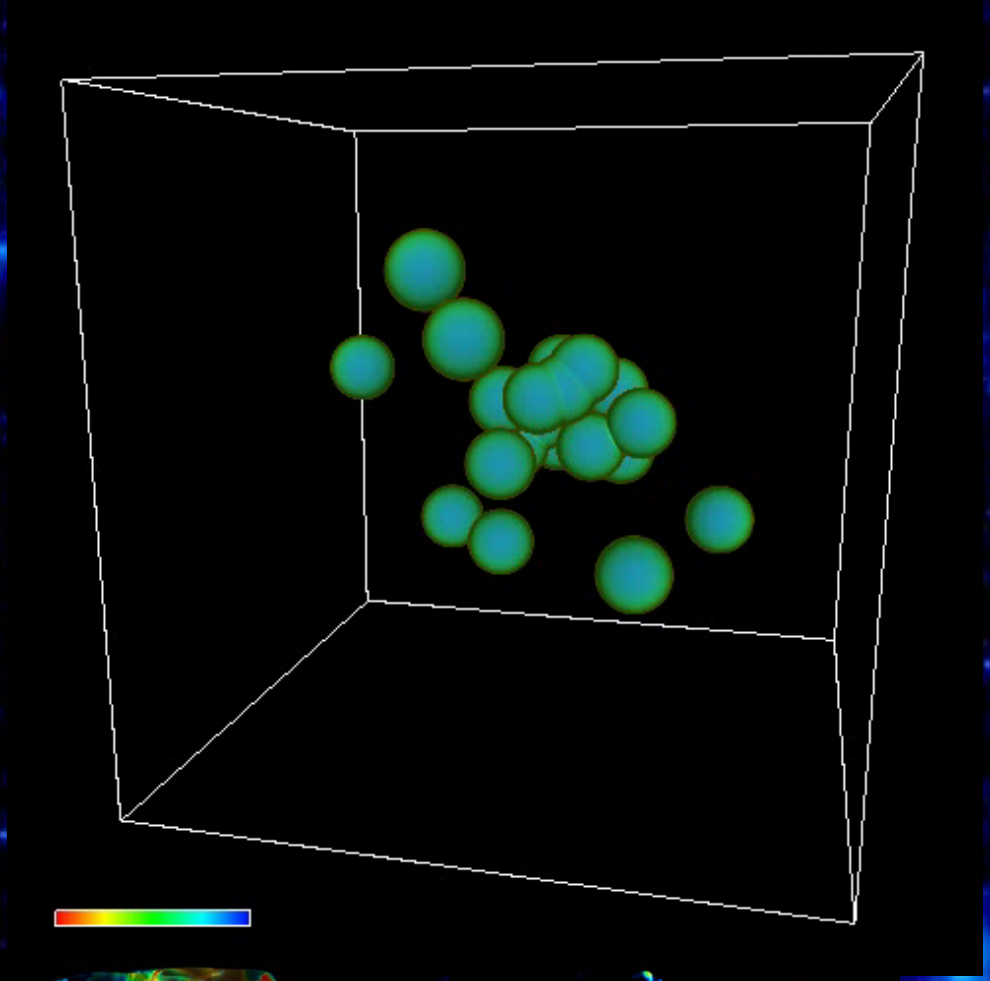
1024^3 Hydrodynamic Calculations
80,000,000 SN explosions

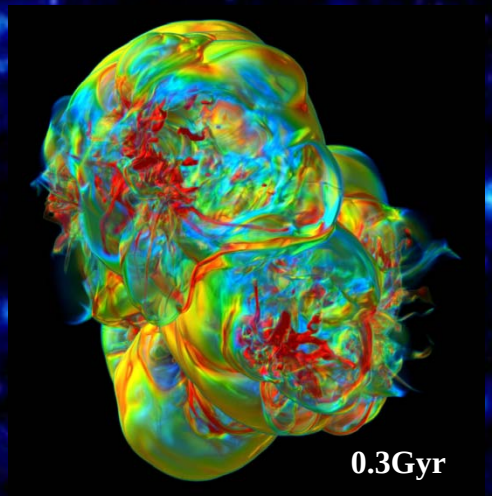
Mori and Umemura, 2006,
Nature, 440, 644

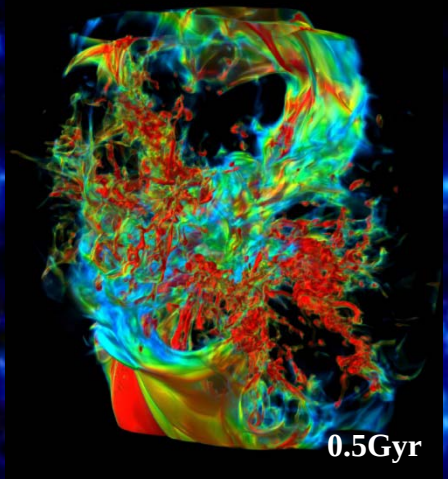
Cover page of Nature
(March 30, 2006)

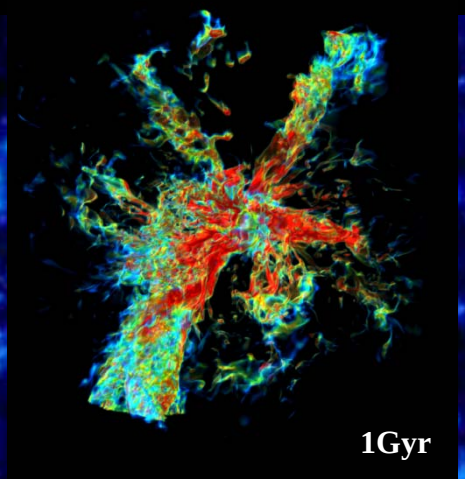
Evolution of Gas Density

Total Mass:10^{11} $M_\odot$
Gas Mass: 1.3×10^{10} $M_\odot$
# of Subunits: 20
Box Size: 134 kpc
Grid Points: 1024^3



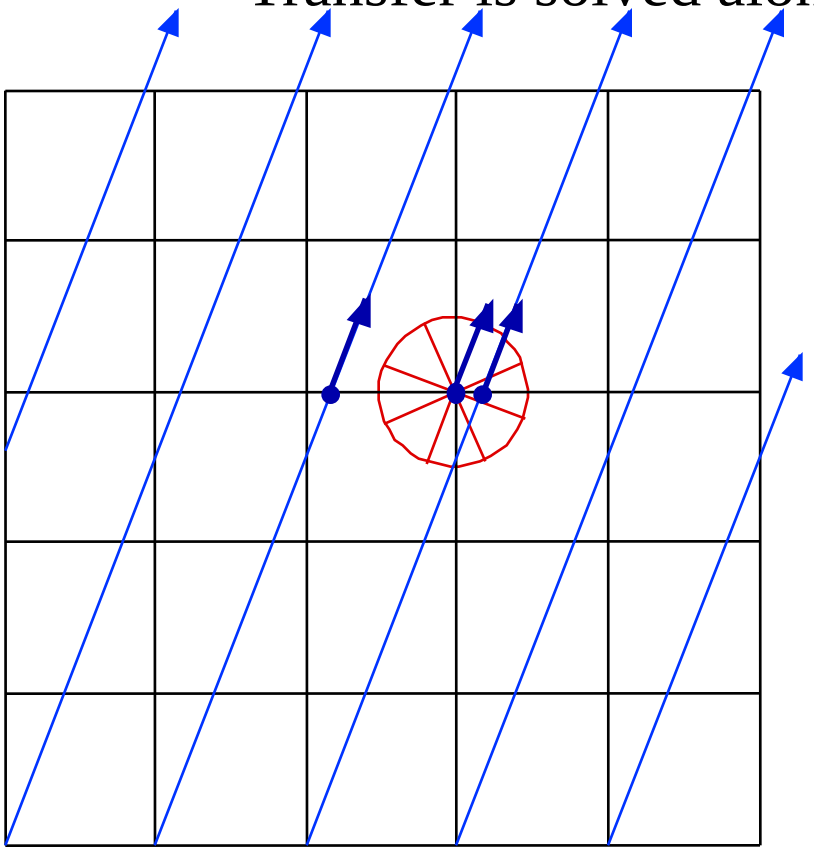






電離光子の6次元輻射輸送計算
ART法
(Authentic Radiative Transfer)

Transfer is solved along a long ray across the domain

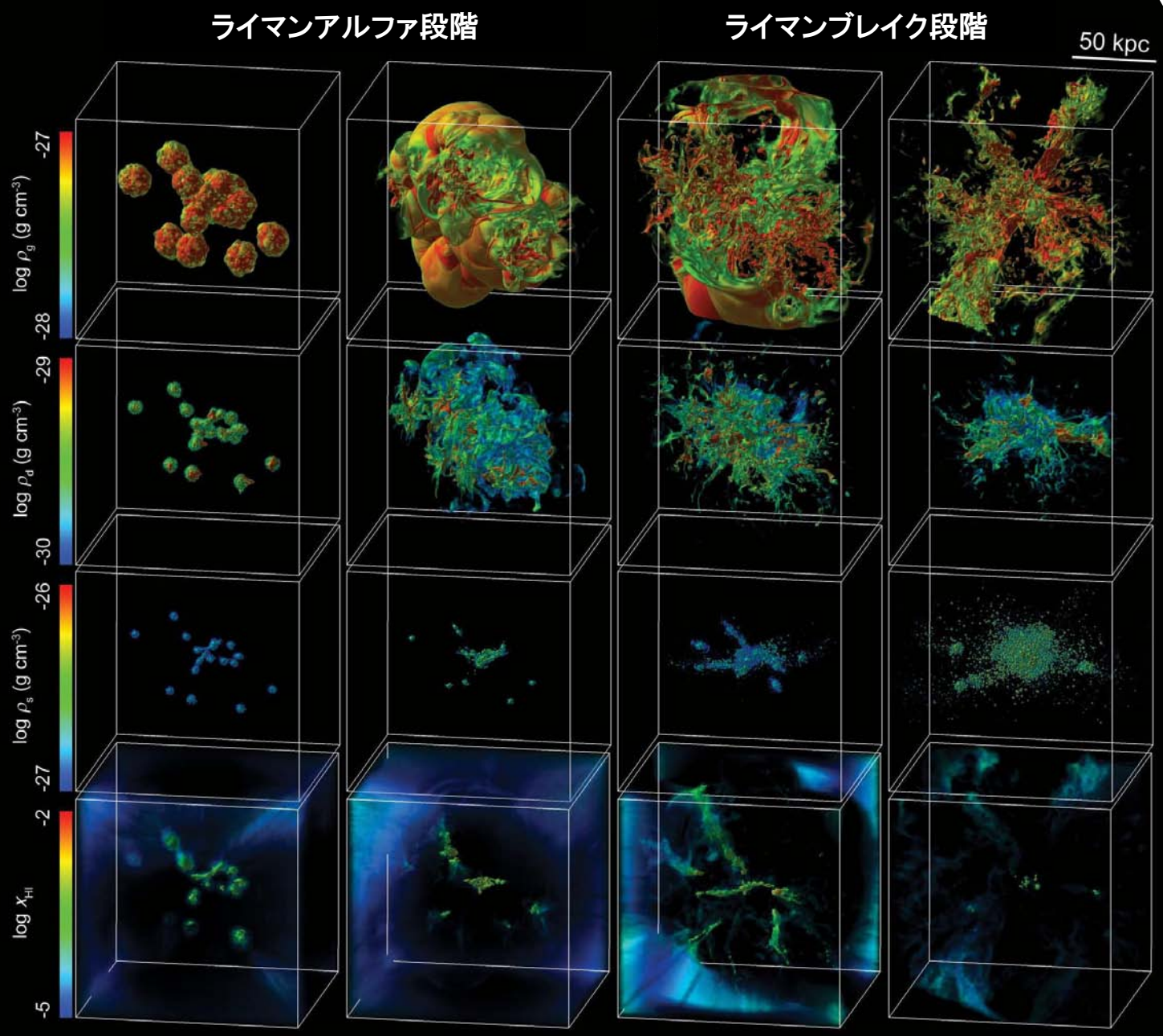


- Physical quantities are interpolated at each grid
- A bit complex coding
- <u>No</u> numerical diffusion (accuracy equivalent to long char.)
- Operations (<u>same as short char.</u>)

$$\sim \; N_x N_y N_z \cdot N_\theta N_\varphi N_\nu$$

原始銀河における電離光子伝播の6次元輻射輸送計算

Yajima et al. 2008

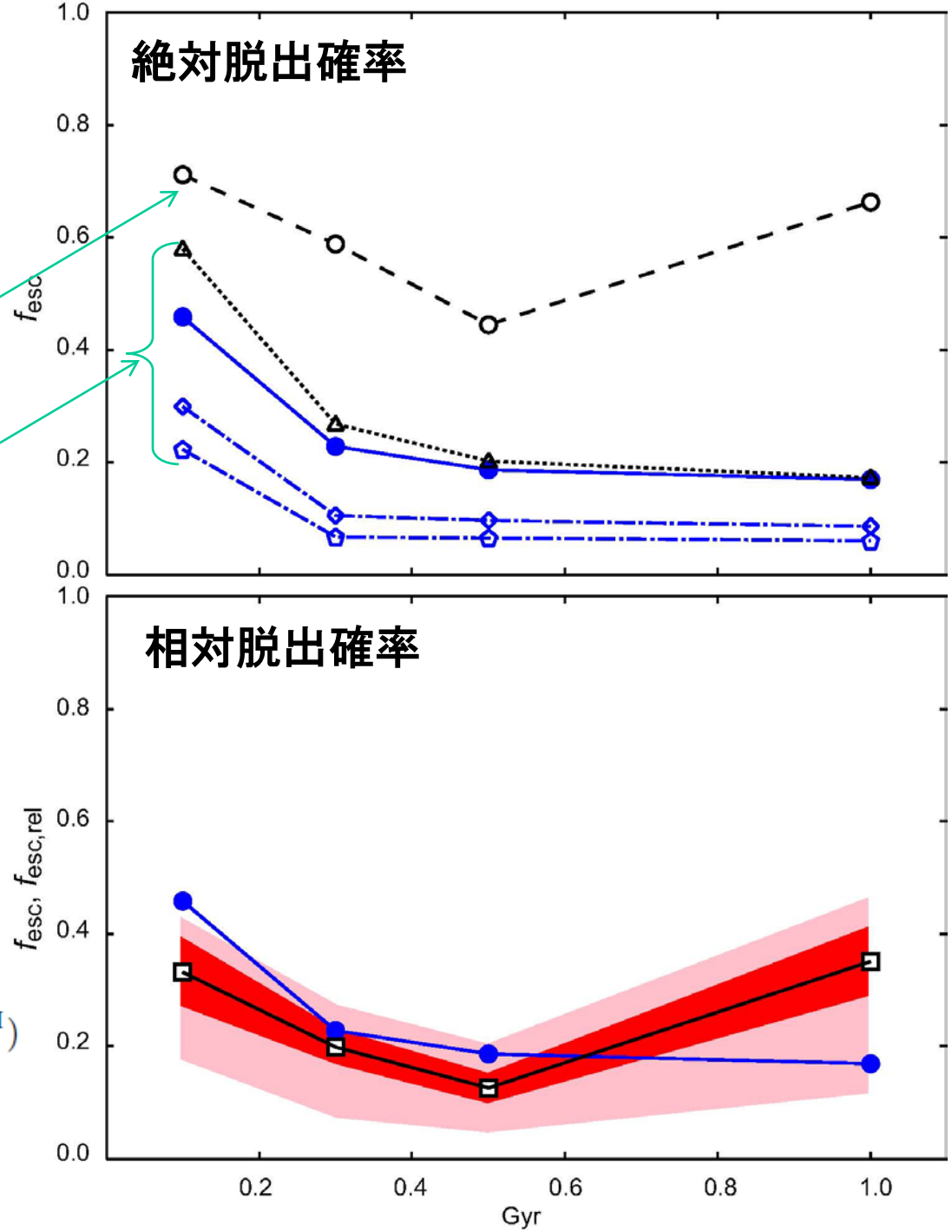


Ionization of ISM
& Escape of UV

電離光子の脱出確率

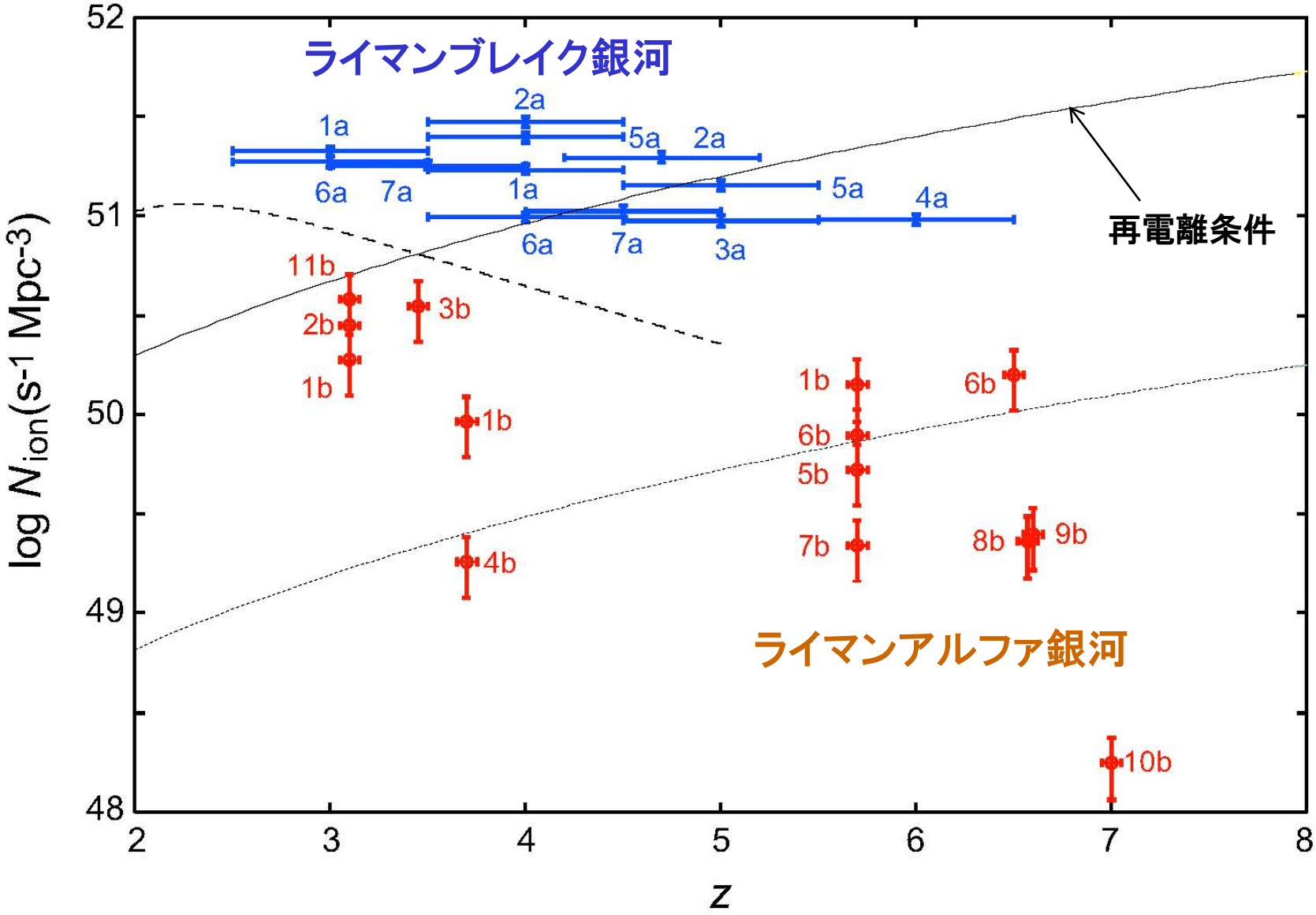
ダスト吸収がない場合

ダスト吸収を入れた場合



$$f_{\rm esc,rel} = \frac{(L1500/L900)_{\rm int}}{(F1500/F900)_{\rm obs}} \exp(\tau_{900}^{\rm IGM})$$

宇宙再電離の可能性

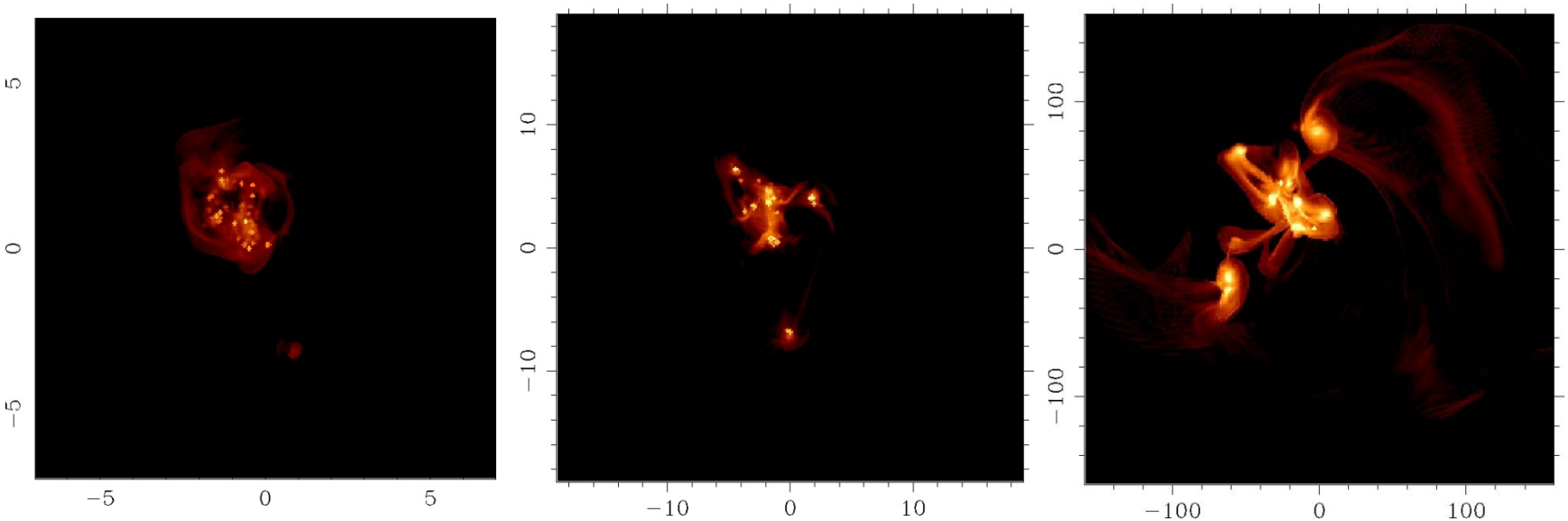

ライマンブレイク銀河
ライマンアルファ銀河
再電離条件
1a
2a
5a
2a
6a
7a
1a
5a
4a
6a
7a
3a
11b
2b
1b
3b
1b
4b
1b
6b
5b
7b
6b
8b
9b
10b
log N_{ion}(s^{-1} Mpc^{-3})
z
52
51
50
49
48
2
3
4
5
6
7
8

原始銀河形成時に放出されるライマンアルファ輝線の空間分布

$M=10^9 M_\odot$ z=8.1 1 arcsec=4.8 kpc

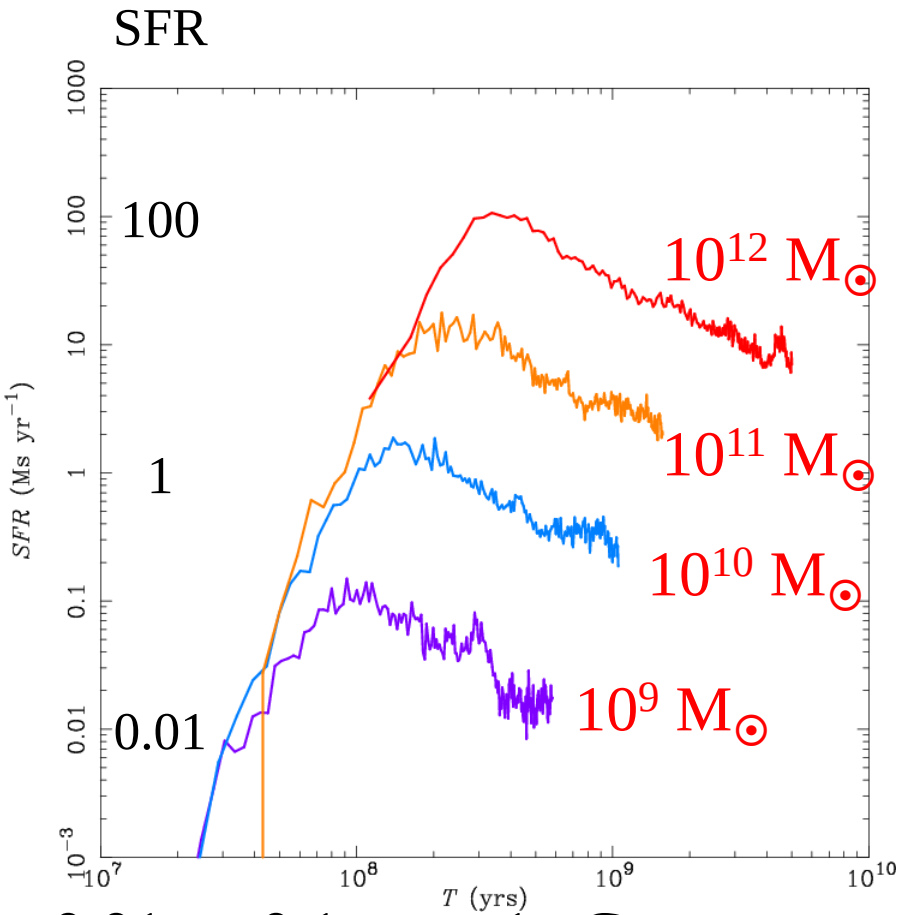
$M=10^{10} M_\odot$ z=6.2 5.6 kpc

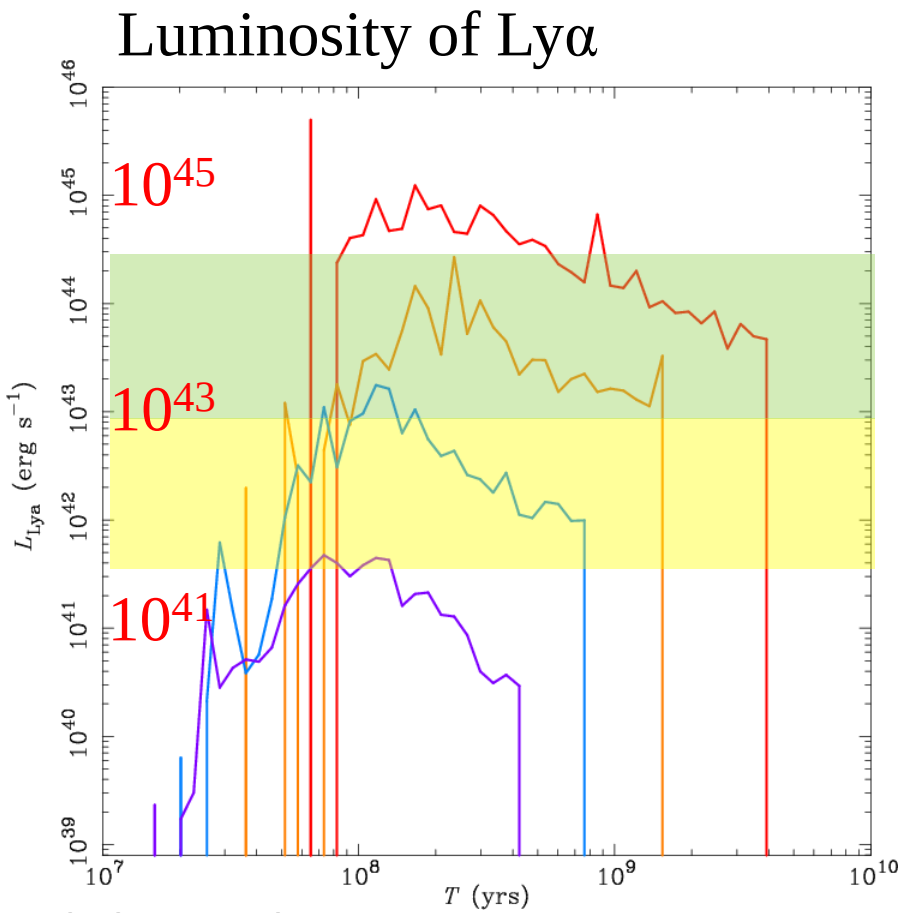
$M=10^{12} M_\odot$ z=3.0 7.7 kpc



Theoretical Lyα emission comes mainly from high density regions.
The filamentary structures are produced by the galaxy merger and multiple SN explosions. At the lower redshift, these galaxies with the complicated structures are observed as Lyman alpha blobs. But the higher redshift, most of structures become unclear due to the limited resolution.

星形成率とライマンアルファ輝線強度の時間変化

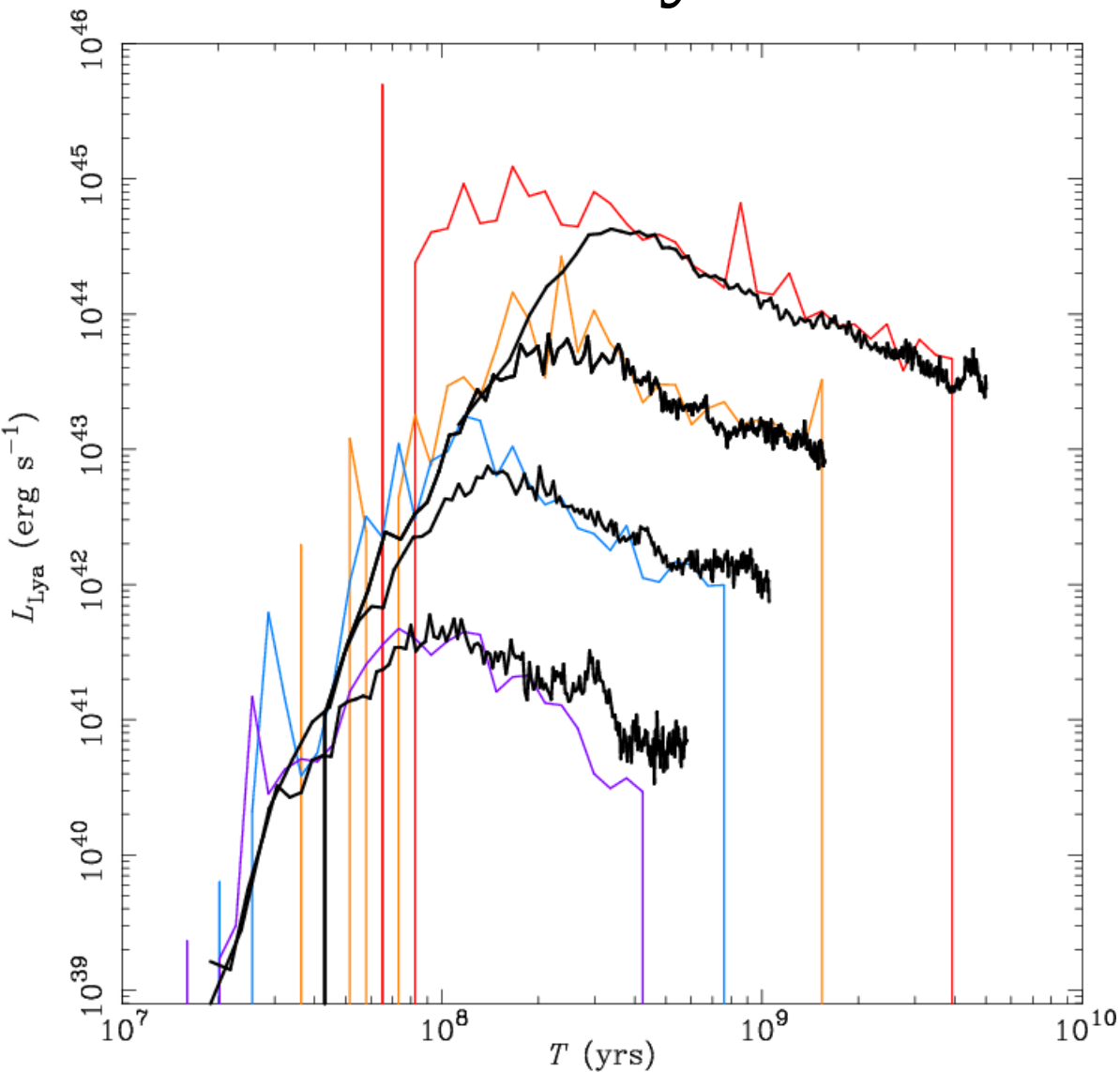




0.01 0.1 1 Gyr 0.01 0.1 1 Gyr

Time

Scaling relation between SFR and Lyα luminosity



$$L_{\rm Lya} \approx 4\text{x}10^{42}\ SFR$$

cf. Kennicutt law:

$$L_{\rm Lya} = 10^{42}\ (\text{erg s}^{-1})\ SFR$$

衝突銀河団の数値シミュレーション

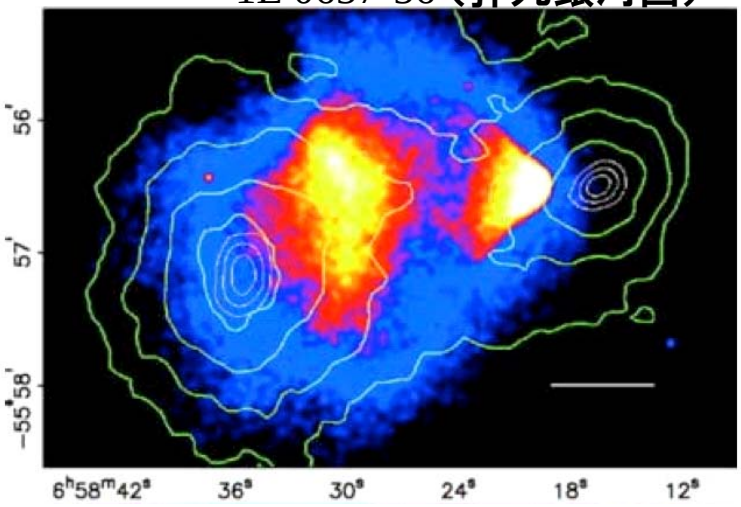
銀河団

質量: 10^{14}〜10^{15} $M_{\odot}$

- ダークマター
- 10^{7}〜10^{8} Kの高温プラズマ
- 数百〜千個程度の銀河

宇宙最大の重力的に束縛された天体

1E 0657-56（弾丸銀河団）

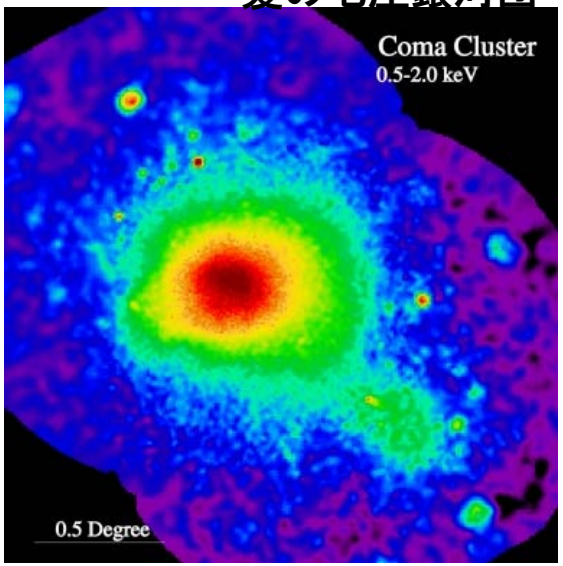


衝突銀河団

銀河団同士が相対速度>1000km/sで衝突する現象

- 銀河団の内部構造(ガス・ダークマター)
- 銀河団内の重元素量
- プラズマの運動論的性質

髪の毛座銀河団



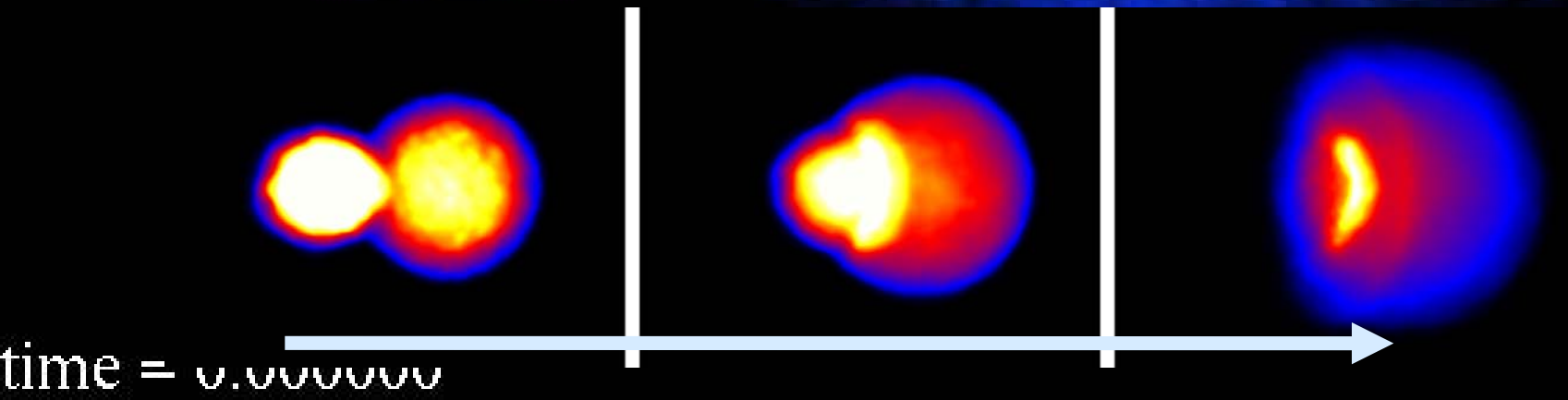
衝突銀河団の数値シミュレーション

- 自己重力：N体シミュレーション
- 流体力学：Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)
- H, He, C, N, O, Si, Mg, Fe などの電離状態の時間発展
- イオンと電子の間の熱的緩和の時間発展

将来のX線観測で、衝突銀河団内のプラズマの電離状態を手掛かりに

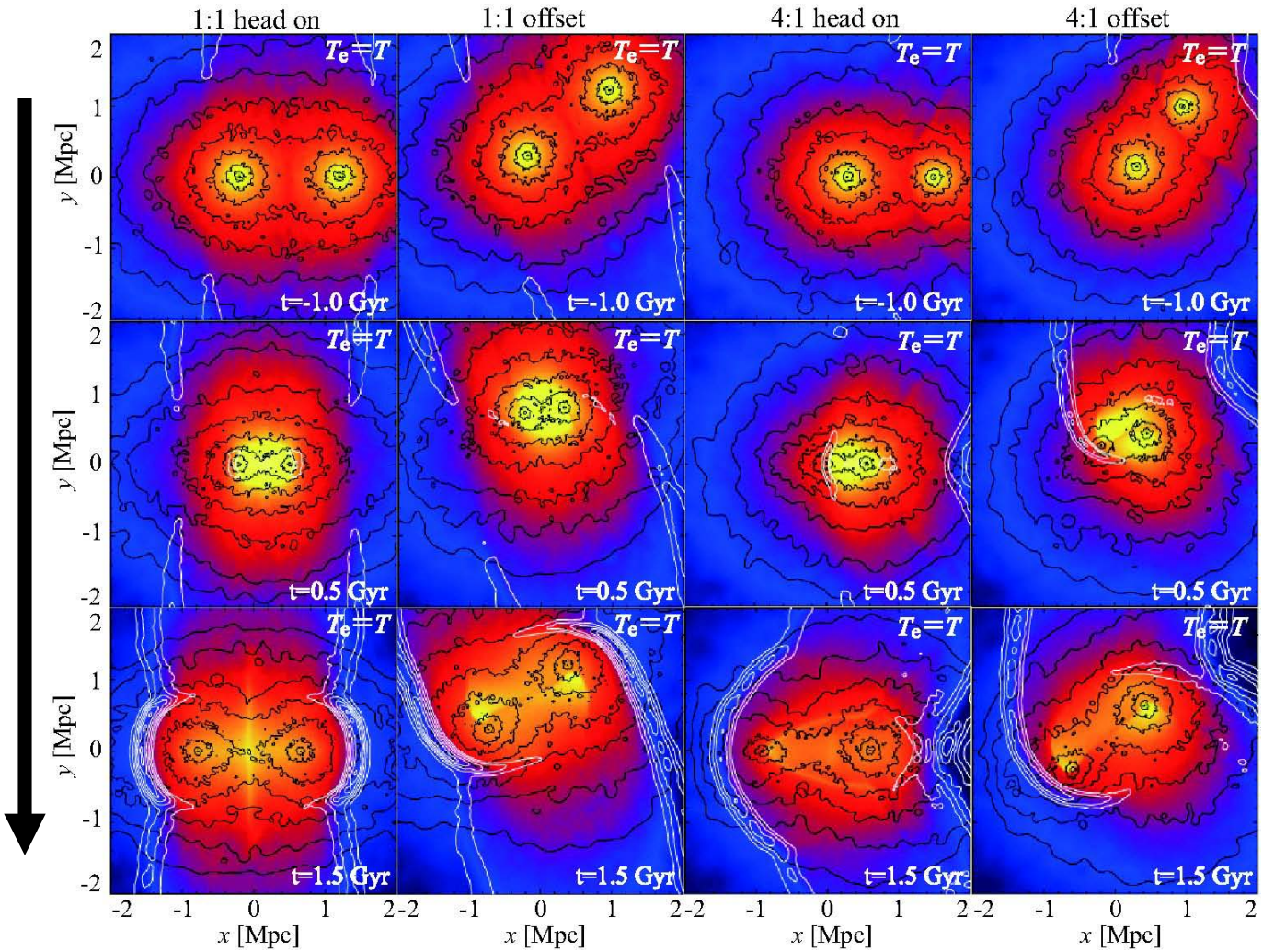
- **銀河団外縁部の物理状態**
- **極めて希薄な無衝突プラズマの運動論的性質**

について、新たな知見を得られる可能性を示した。



衝撃波の構造

様々な初期条件(インパクトパラメータ、質量比)に対する、衝撃波の構造

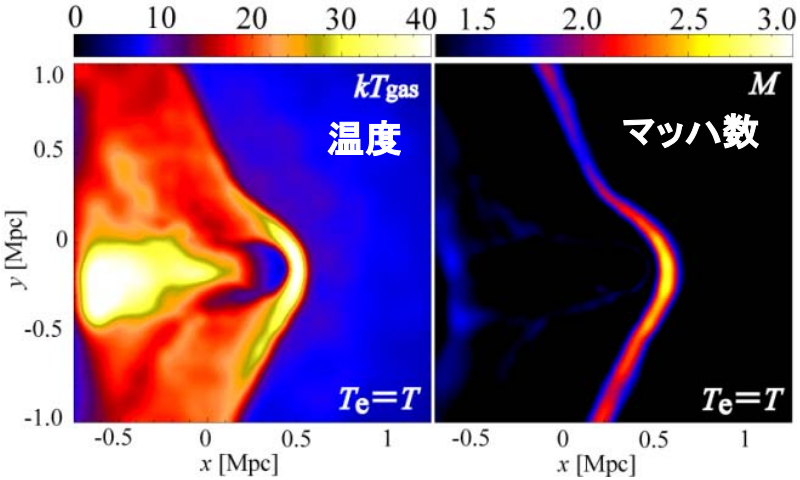


カラー:ガス密度

黒い等高線:DM密度

白い等高線:マッハ数

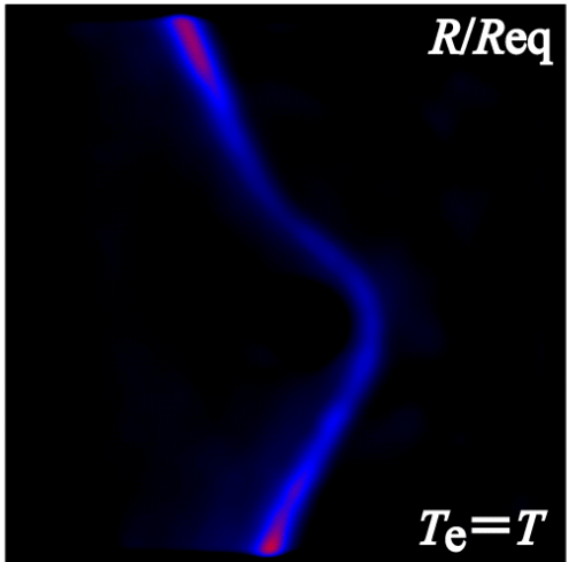
非平衡電離・二温度プラズマ状態



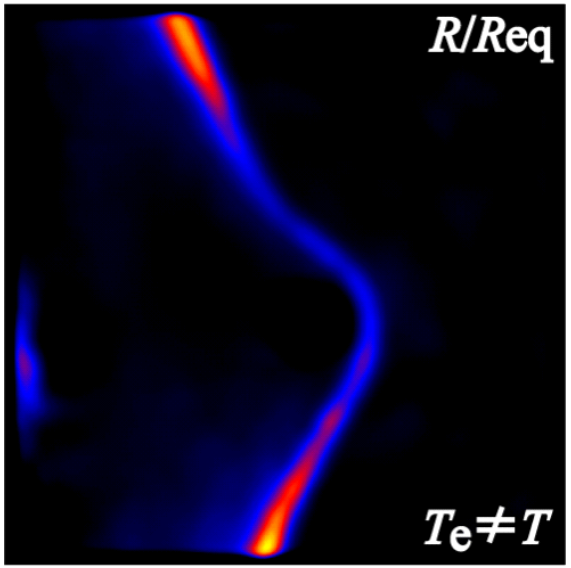
非平衡電離状態とプラズマ二温度状態を整合的に取り入れた、世界で最初の銀河団シミュレーション

電離平衡からのずれ具合

イオンと電子の温度が同じ場合



イオンと電子の温度が異なる場合



電離平衡からのずれ具合が、プラズマの運動論的性質の違いに依存する。

↓

電離平衡からのずれを観測することによって、希薄なプラズマの運動論的性質に対する知見を得ることが可能になる。

研究成果のまとめ

1. 電離光子脱出に関する3次元輻射輸送シミュレーションによって原始銀河の宇宙再電離への寄与を明らかにした

2. 原始銀河形成時に放出されるライマンアルファ輝線強度の銀河質量依存性を明らかにした

3. 衝突銀河団の数値シミュレーションによって，非平衡電離とプラズマ二温度状態の重要性を明らかにした