

ライマンアルファ・ブロッブの 電離光子脱出確率と赤外線的安全性

○矢島 秀伸(筑波大)

梅村 雅之(筑波大)、森 正夫(筑波大)

中本 泰史(東工大)

目次

●背景

- ・宇宙再電離について
- ・電離光子脱出確率について

●モデル

●原始銀河 (LAE, LBG) に対する電離光子脱出確率

●Relative escape fractionとの関係

●まとめ1

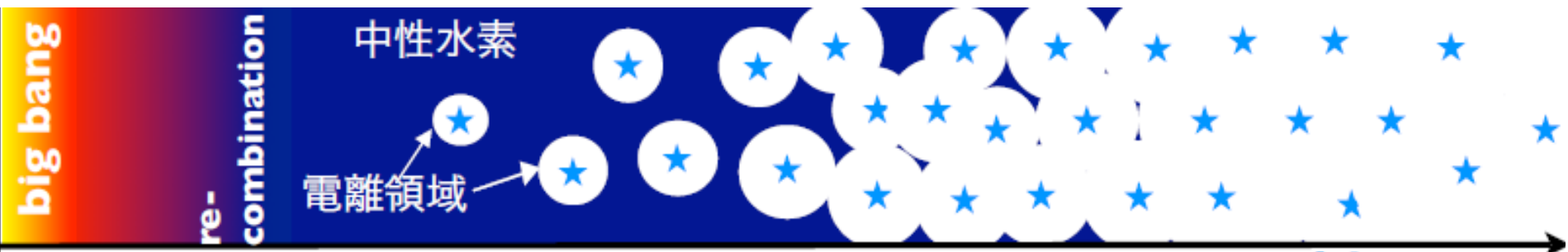
●diffuse photon transferの効果

●重元素汚染史と赤外線放射量の関係、その空間分布

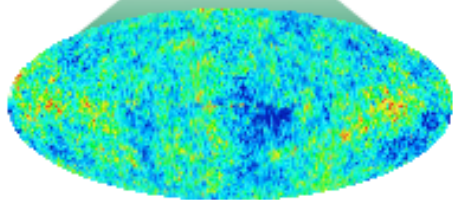
●まとめ2

背景：宇宙再電離

宇宙再電離：天体から放射される紫外線輻射により銀河間物質が電離する現象



WMAP 3-years



Thomson scattering optical depth

$$\tau_e = 0.093 \pm 0.029$$

(Spergel et al. 2006)

$$\tau_e(z) = \int_0^z \sigma_T n_e(z') c \left| \frac{dt}{dz'} \right| dz'$$



reionization redshift

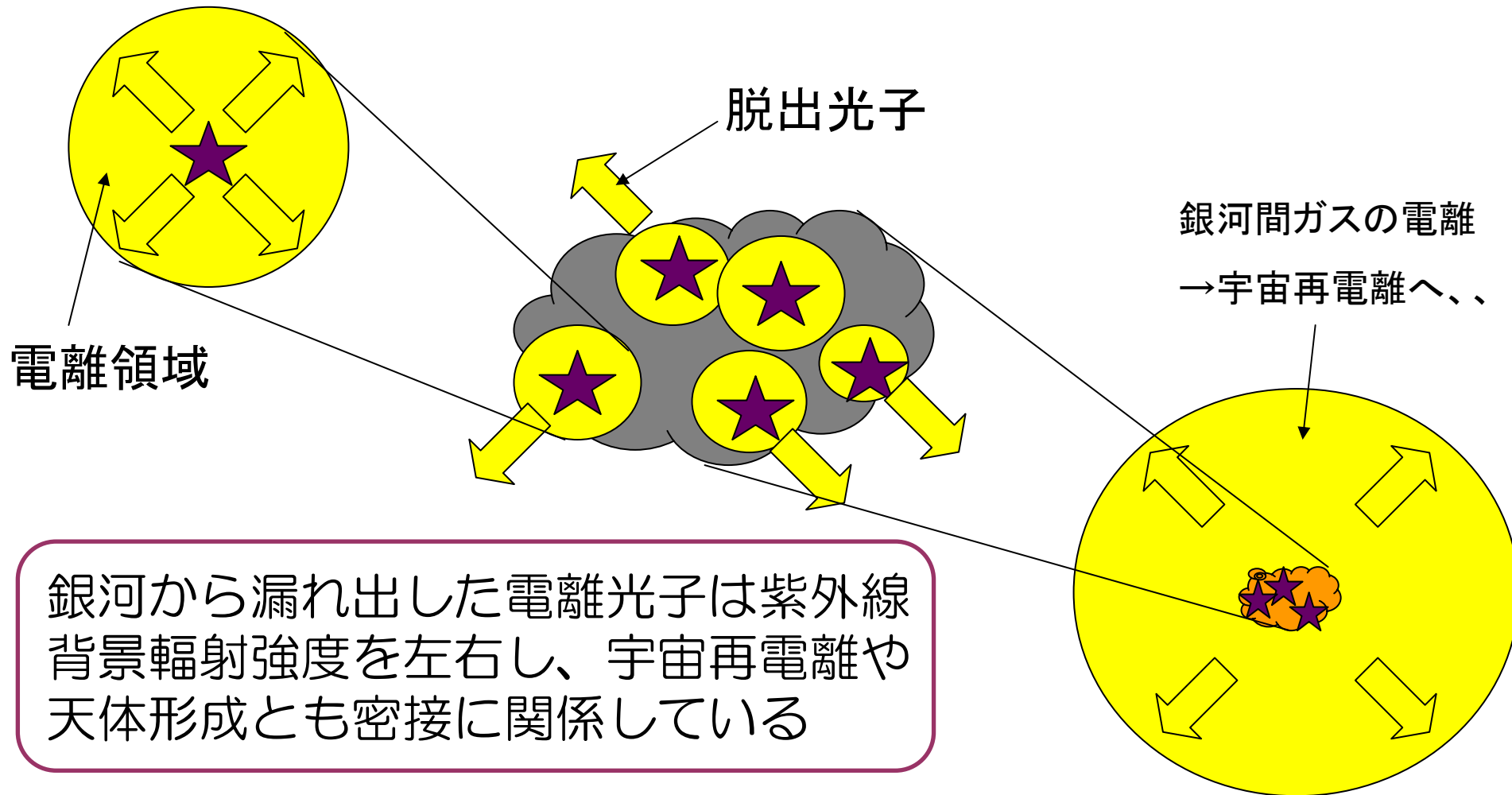
$$z_r = 10.9^{+2.7}_{-2.3}$$

謎：いつ？どのように？何によって？

(PopIII, PopII, QSO, BH, ...)

背景：電離光子の脱出確率

脱出確率 . . . 銀河内の星から放射された、水素に対する電離光子の内、銀河の外に脱出する割合



銀河から漏れ出した電離光子は紫外線背景輻射強度を左右し、宇宙再電離や天体形成とも密接に関係している

先行研究（観測）

$z \sim 3$ の銀河に対する観測例

(Steidel et al. 2001)

.....▶ $f_{\text{esc}} \sim 60\%$

(Giallongo et al. 2002)

.....▶ $f_{\text{esc}} \leq 5\%$

(Inoue et al. 2005)

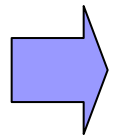
.....▶ $f_{\text{esc}} \leq 38\%$

(Shapley et al. 2006)

.....▶ $f_{\text{esc}} \sim 14\%$

(Iwata et al. 2008)

.....▶ $f_{\text{esc}} \geq 15\%$



高赤方偏移（ $z \sim 3$ ）の銀河に対して、脱出確率の典型的な値はよく分かっていない

$z > 4$ 以上の銀河に対してはIGMによる吸収により脱出確率の観測は困難→理論的アプローチが重要

先行研究（理論）

Gnedin et al. 2008

AMRによる銀河形成

3次元輻射輸送

ダストの減光を考慮

QuickTime[®] Ç²
TIFFÄitÖ älekAj êLiçÉvÉçÉOÉäÉÄ
Ç™Ç±ÇÄÉsENÉ'ÉÉÇ%ä@ÇÉÇZÇ½Ç...ÇÖIKóvÇ-ÇüÄB

結果 → $f_{\text{esc}} \leq 3\%$

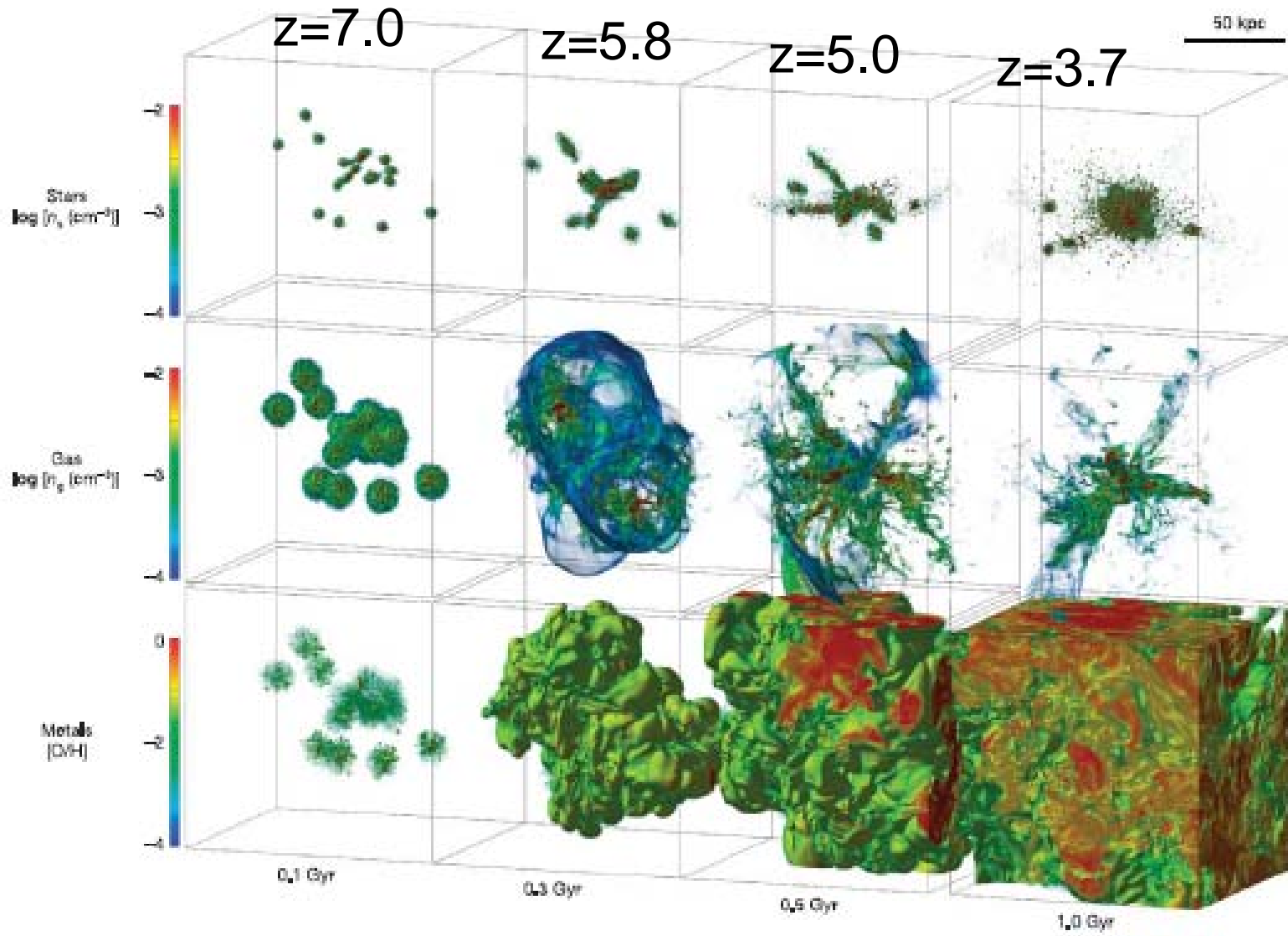
大半の星はcold gas diskに埋まっておりそこからの輻射は抜け出せない。Diskの外に分布しているわずかな星の輻射のみが脱出できる。またダストの効果はほとんどない。

活発な星形成をしている、irregularな銀河ではどうだろうか？

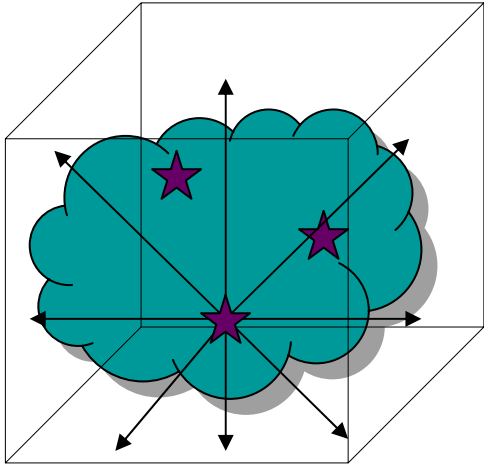
Model galaxy

(Mori&Umemura2006)

IMF:Salpeter IMF



計算モデルと基礎方程式



計算メッシュ： 128^3

計算BOXより出た光子を
脱出光子とみなす

輻射輸送方程式

$$\frac{dI_\nu}{ds} = -\alpha_{\text{abs}} I_\nu + \epsilon_\nu$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_\nu: \text{ 輻射強度} \\ \alpha_{\text{abs}}: \text{ 吸収係数} \\ \epsilon_\nu: \text{ 放射係数} \end{array} \right.$$

電離平衡の式

$$0 = \Gamma^\gamma \cdot n_{\text{HI}} + \Gamma^{\text{C}} \cdot n_e \cdot n_{\text{HI}} - \alpha_{\text{rec}} \cdot n_e \cdot n_{\text{HII}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Gamma^\gamma: \text{ 光電離率、} n_{\text{HI}}: \text{ 中性水素の数密度} \\ \alpha_{\text{rec}}: \text{ 水素の再結合係数、} n_e: \text{ 電子の数密度} \end{array} \right.$$

- スキーム：ART法
- on-the-spot 近似使用
- ソースとしては 10^7 年以下の若い星団だけを考慮

● 星団のスペクトル

Salpeter IMFでの合成スペクトル（年齢、重元素量により異なる）

Dust model

Density : 3 g/cm³

Size : 0.1μm ~ 1.0μm

Distribution function : $n_{\text{dust}}(a_d) \propto a^{-3.5}$

Q – value : $Q(\lambda) = 1$

$$m_{\text{dust}} = f_{\text{dust}} \frac{Z}{Z_{\text{sun}}} m_{\text{H}}$$

Optical depth of interstellar dusts

$$d\tau_d(\lambda) = Q(\lambda) \cdot 4\pi a_d^2 \cdot n_d \cdot ds$$

Ionization Structure

z=7.0

z=5.8



z=

z=5.0



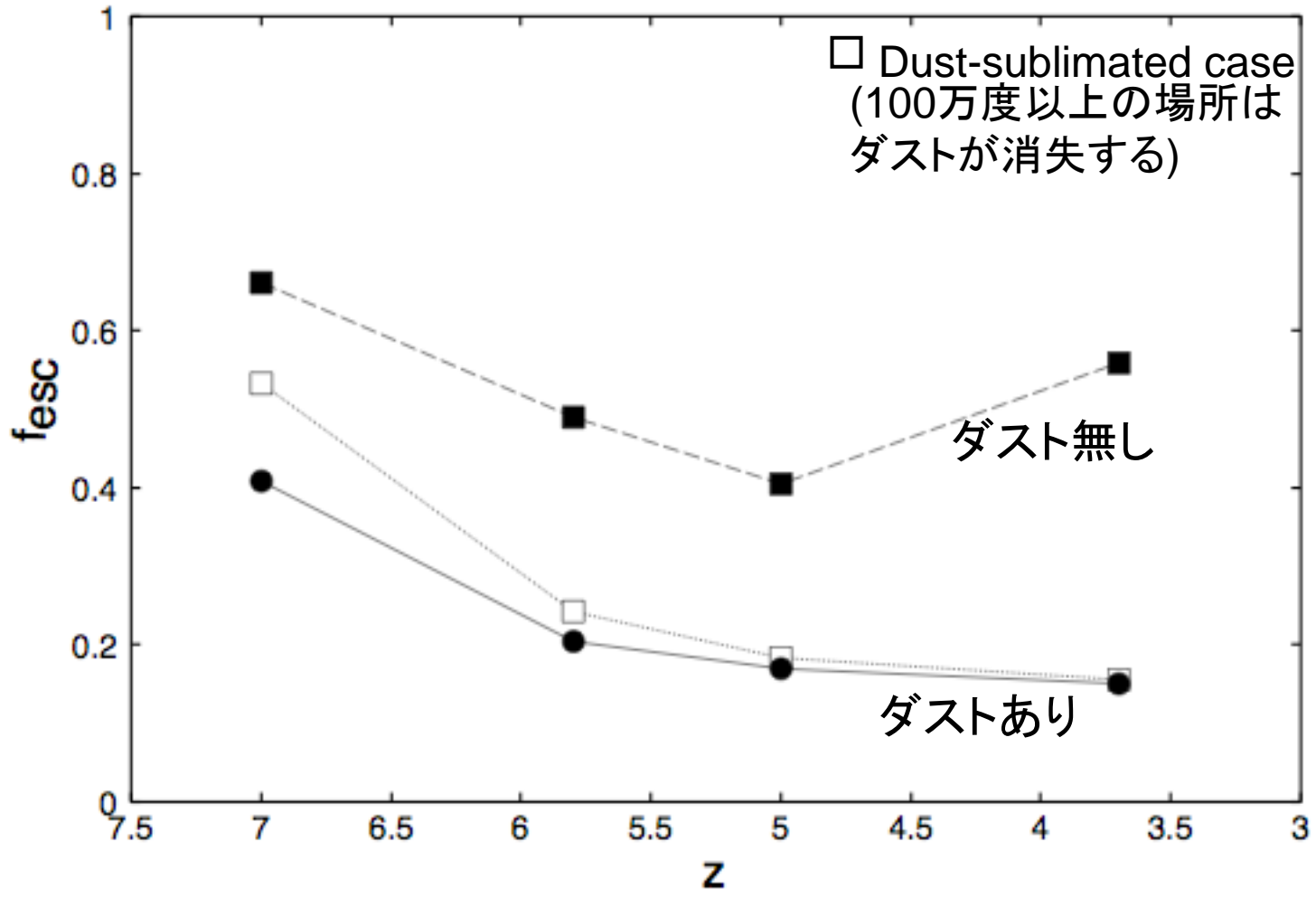
-8

-4

0

log₁₀XHI

Escape fraction



観測による脱出確率の見積もり

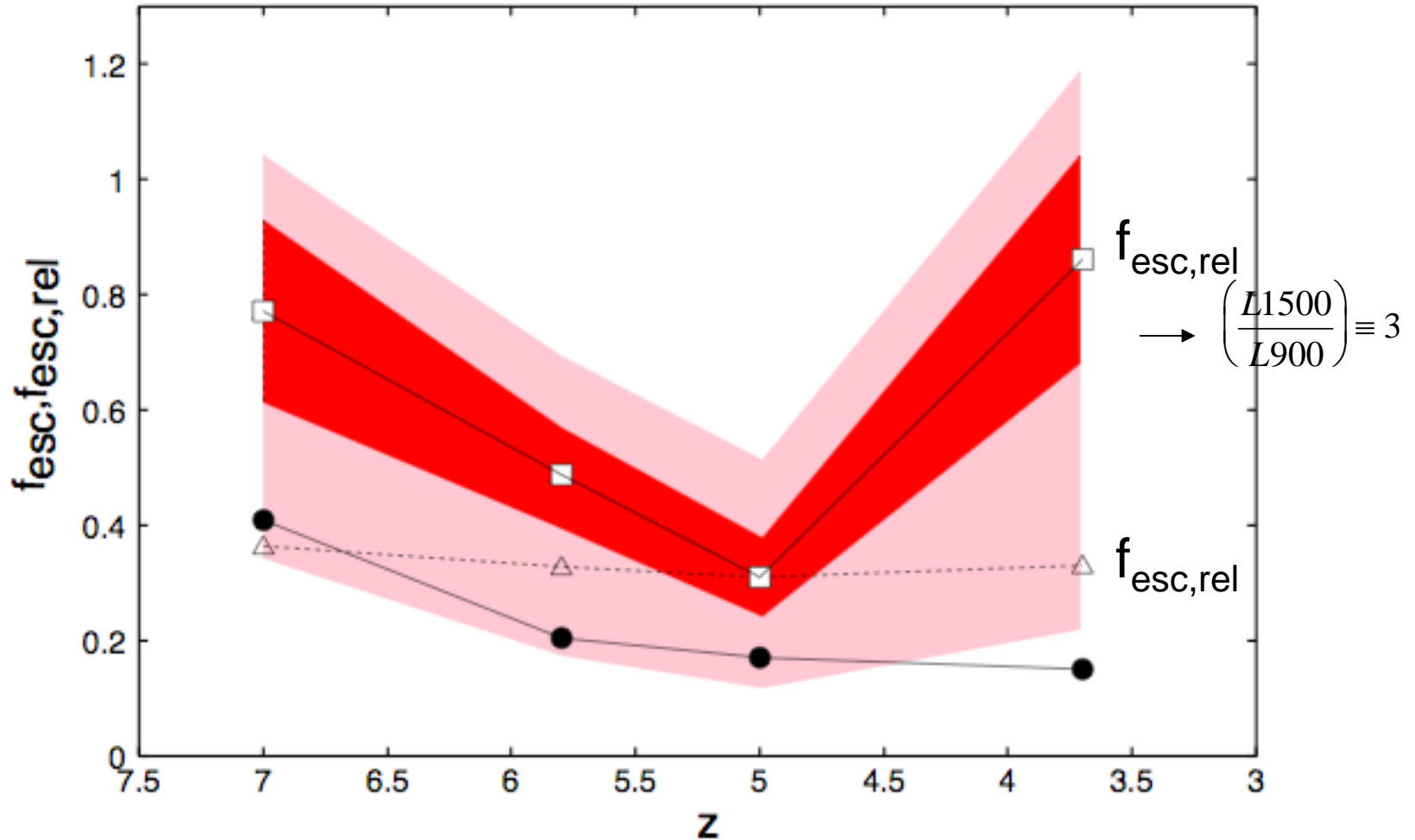
シミュレーションによる脱出確率の見積もり

$$f_{\text{esc}} = \frac{\text{脱出した全電離光子数}}{\text{銀河内で放射されている全電離光子数}}$$

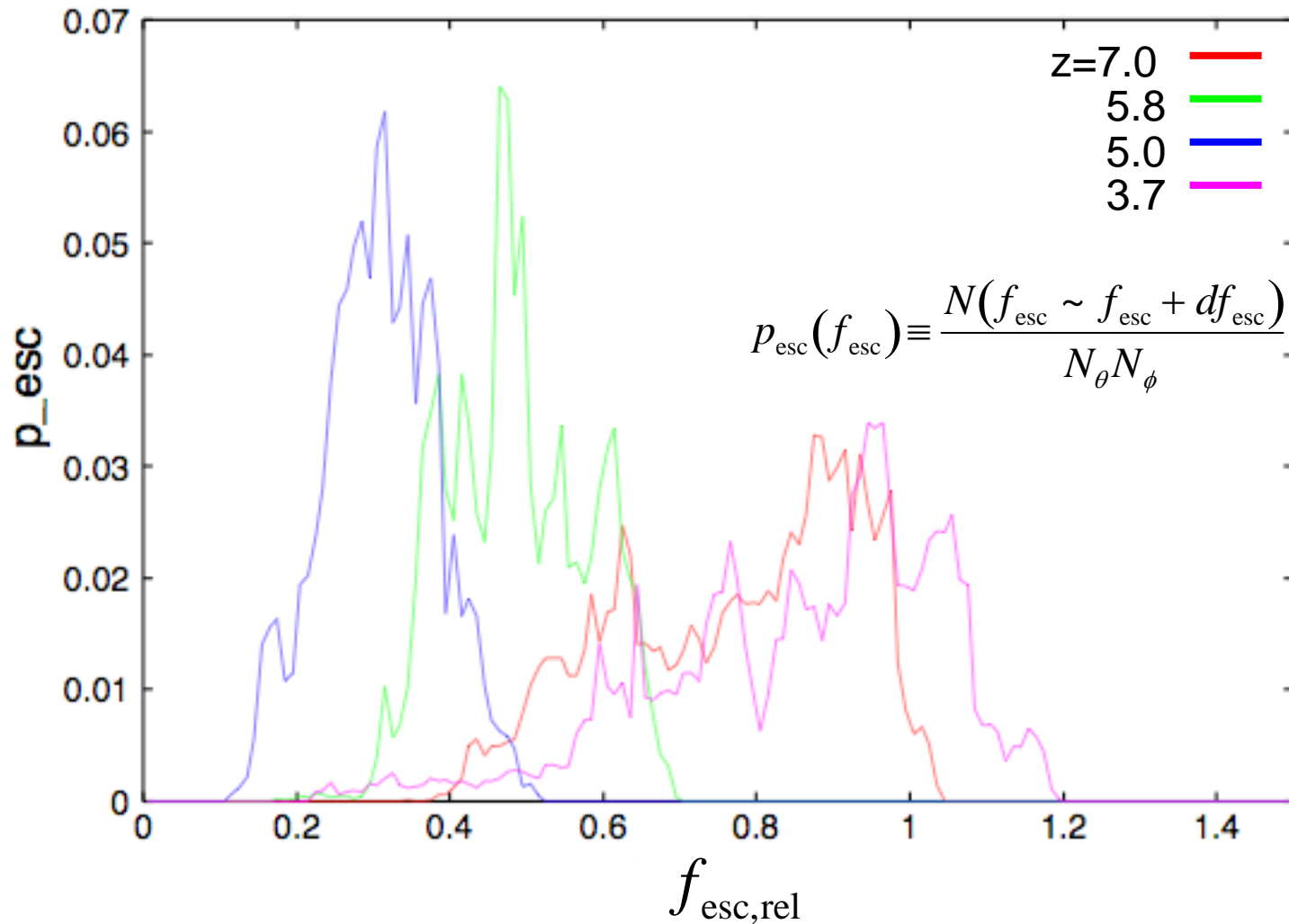
観測による脱出確率の見積もり (Relative escape fraction)

$$f_{\text{esc,rel}} = \frac{\left(\frac{L_{1500}}{L_{900}} \right)_{\text{int}}}{\left(\frac{F_{1500}}{F_{900}} \right)_{\text{obs}}} \exp(\tau_{900}^{\text{IGM}}) \quad \rightarrow =3(\text{Steidel et al.2001, etc})$$

Relative Escape fraction



Probability function of escape fraction



まとめ1

- LAEs, LBGsの電離光子脱出確率は15%~40%を示した。

→理論先行研究に比べ非常に高い値。

(活発な星形成→超新星爆発による星間ガスの高温化→銀河内の高度な電離化→高い脱出確率)

- ダストによる減光によって電離光子脱出確率は2分の1程度減少する。(Gnedin et al.2008ではダストは脱出確率に影響を与えなかった。)

- ダストによる減光を考慮しない事、方向による脱出確率の違い、intrinsicなSEDの不確定性によりrelative escape fractionは実際の脱出確率よりも非常に大きな値を示す可能性がある。

イントロ②

銀河内で吸収された電離光子はどこでどのようにダストに吸収されているか？

近年LABなどに対してsub-mm観測が行われてきている。
(Geach et al. 2005)

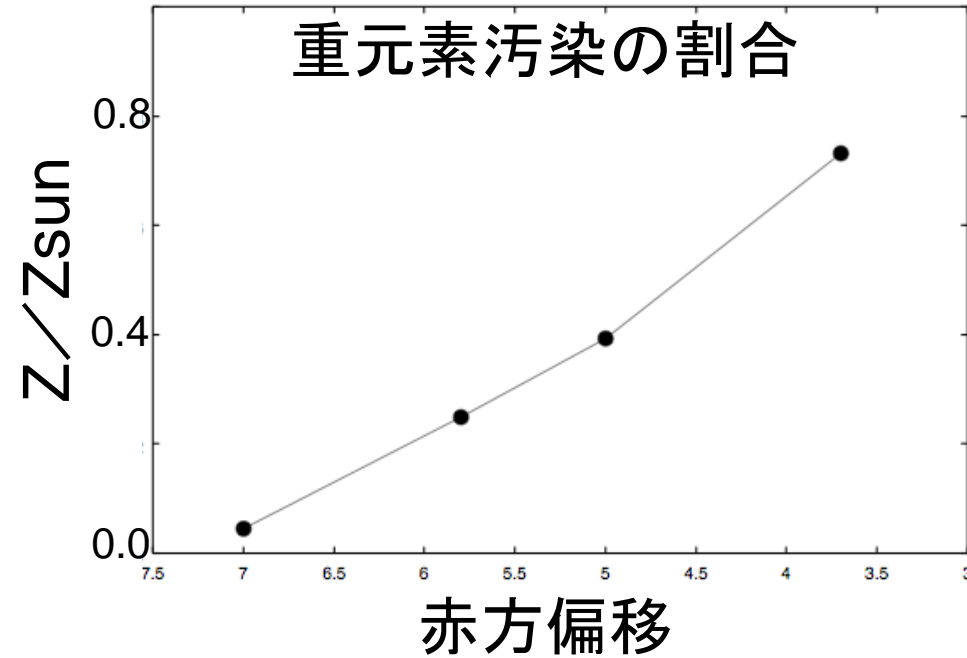
Matsuda et al. 2007

SSA22領域のLAB1を高分解能観測
→Detectionなし

QuickTime[®] C²
TIFFãÿÒàlèkAj èLíÉvÉçÉOÉãÉÄ
Ç™Ç±ÇÃÉsÉNE'ÉÉÇ¾ã©ÇÉÇzÇ½Ç...ÇÖiKónÇ-ÇlÄB

目的2

重元素汚染の割合



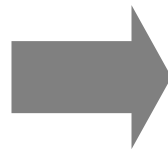
● どれぐらいの輻射エネルギーがダストに吸収されるか？ 重元素汚染との関係は？

● 赤外線空間分布はどのようになっているか？

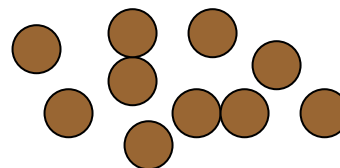
● diffuse photonの輸送も解く

・再結合放射 (free→1s)

・free-free放射



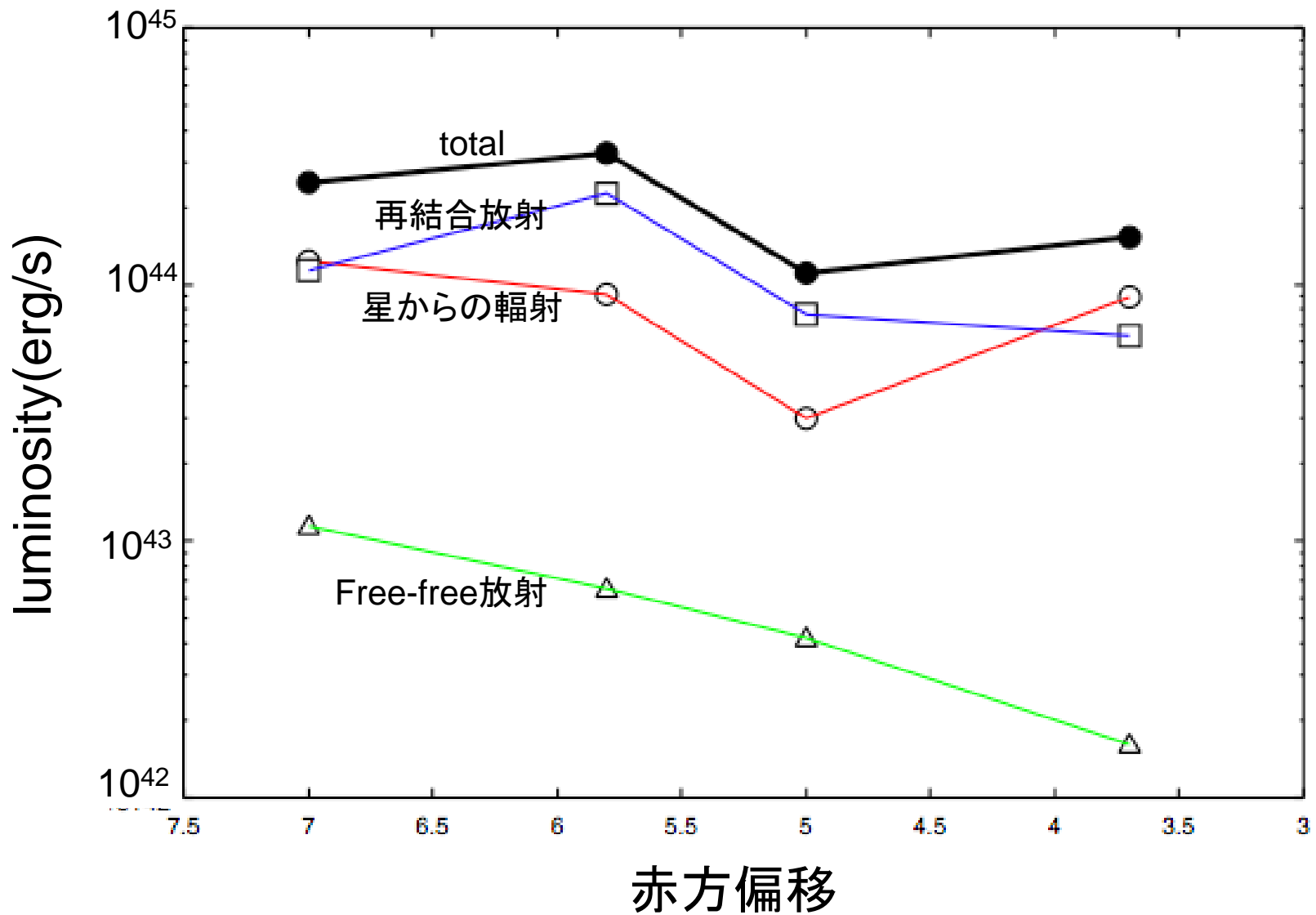
星間ダスト



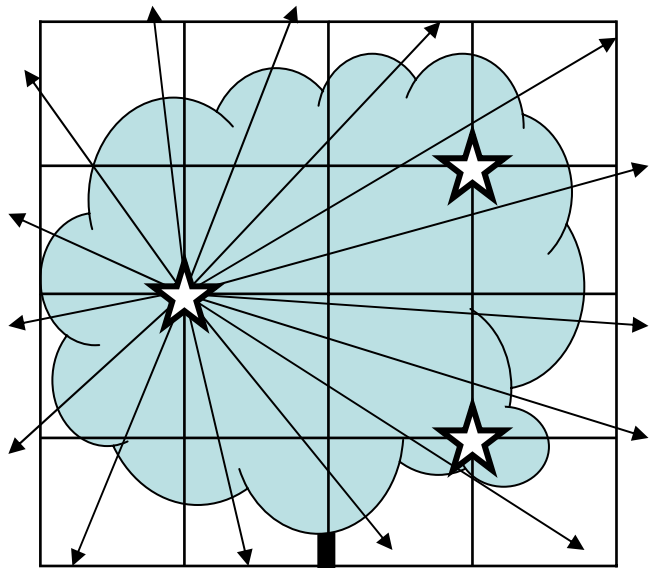
赤外線放射



Intrinsicな光度



手法(輻射輸送)



ART法一①型

(点光源用)

星からの直接光の伝播を計算

$$\frac{dI_\nu}{ds} = -\alpha_{\text{abs}} I_\nu + \epsilon_\nu$$

(輻射輸送方程式)

方向メッシュ数 $\rightarrow N^2 \rightarrow 128^2$ 本

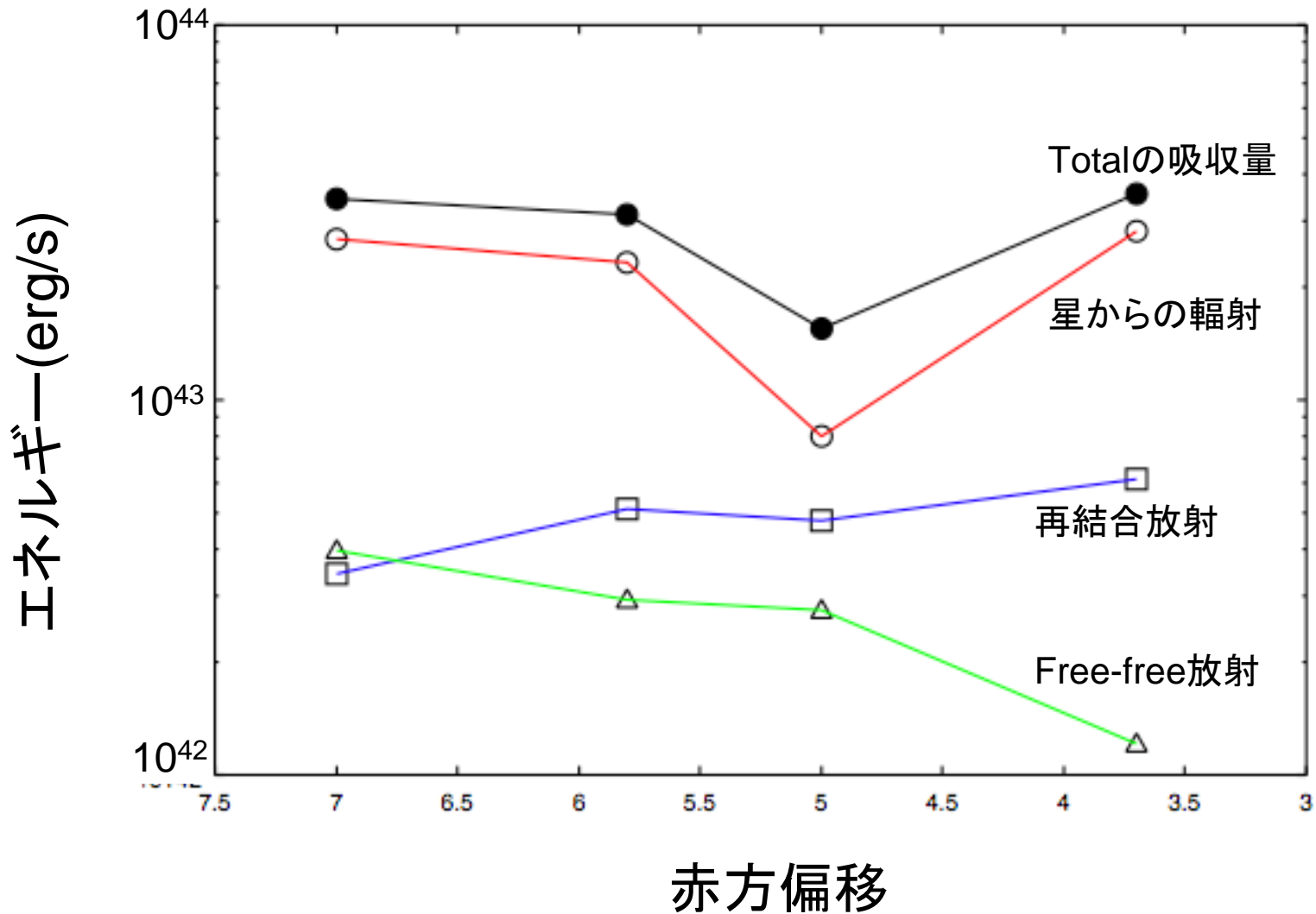
ART法一②型

(散乱光用)

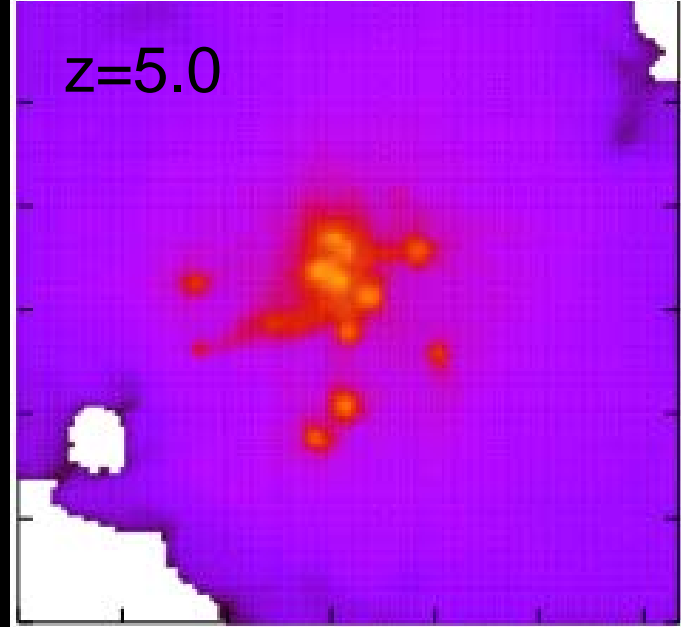
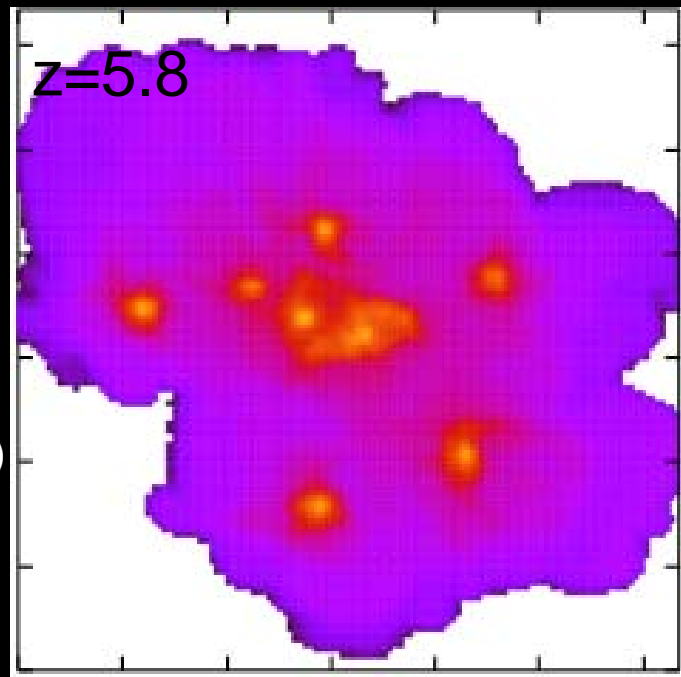
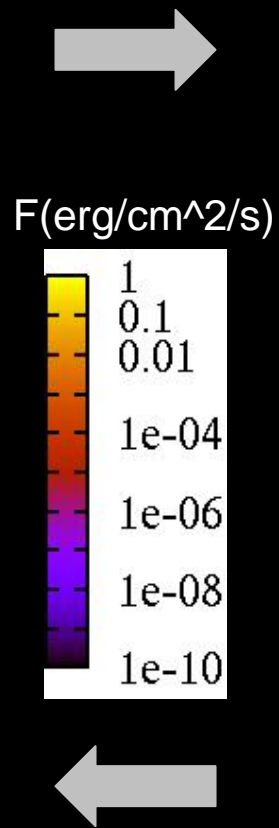
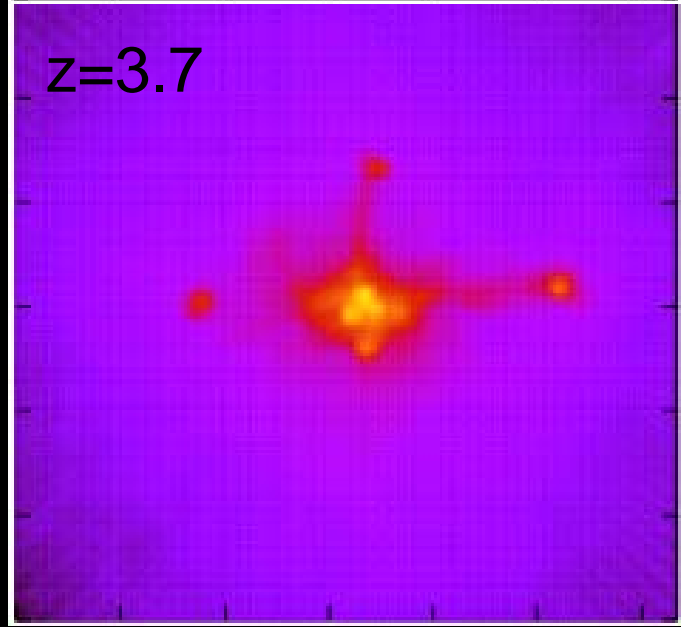
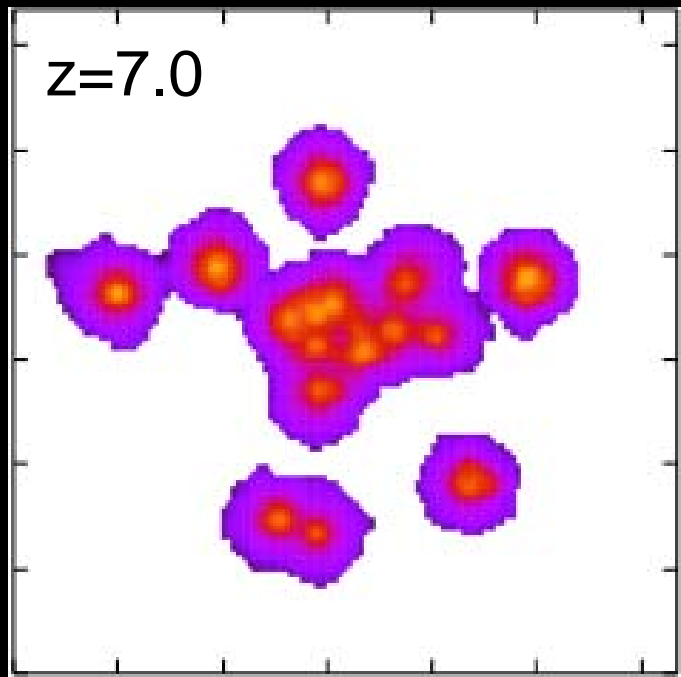
星間ガスから放射されるdiffuse photonの伝播を計算

(Iliev et al. 2006)

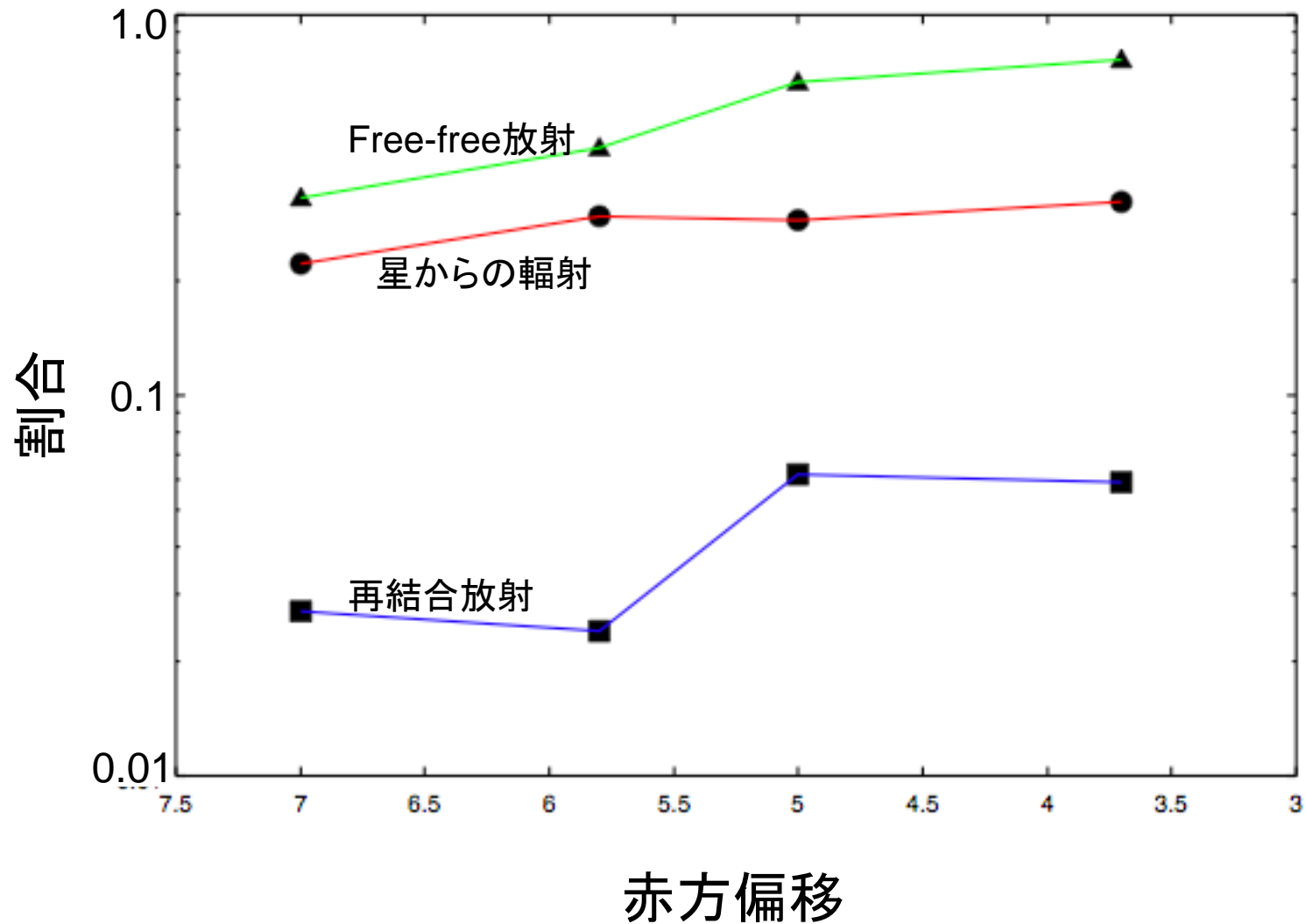
ダストに吸収されたエネルギー



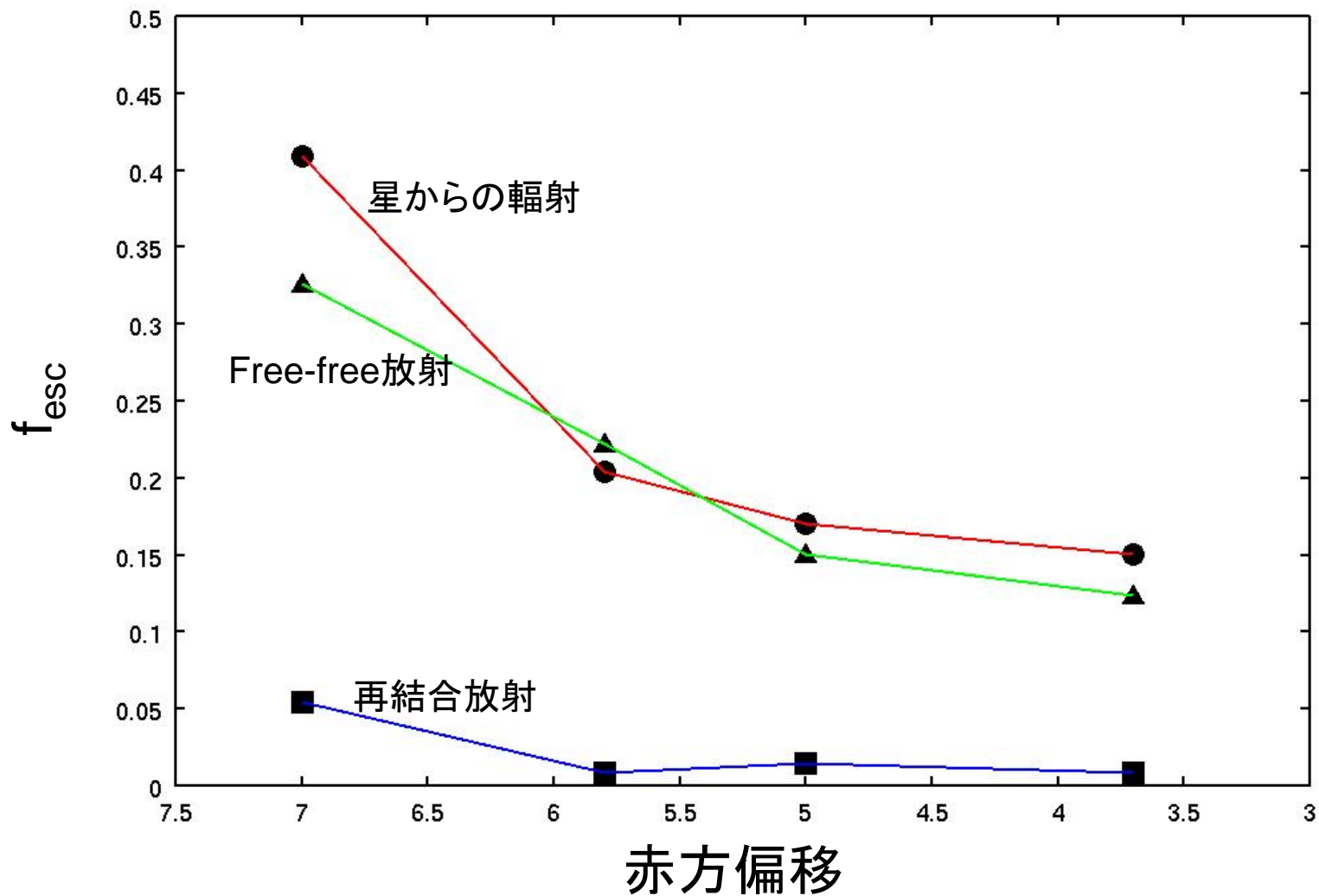
赤外線空間分布図



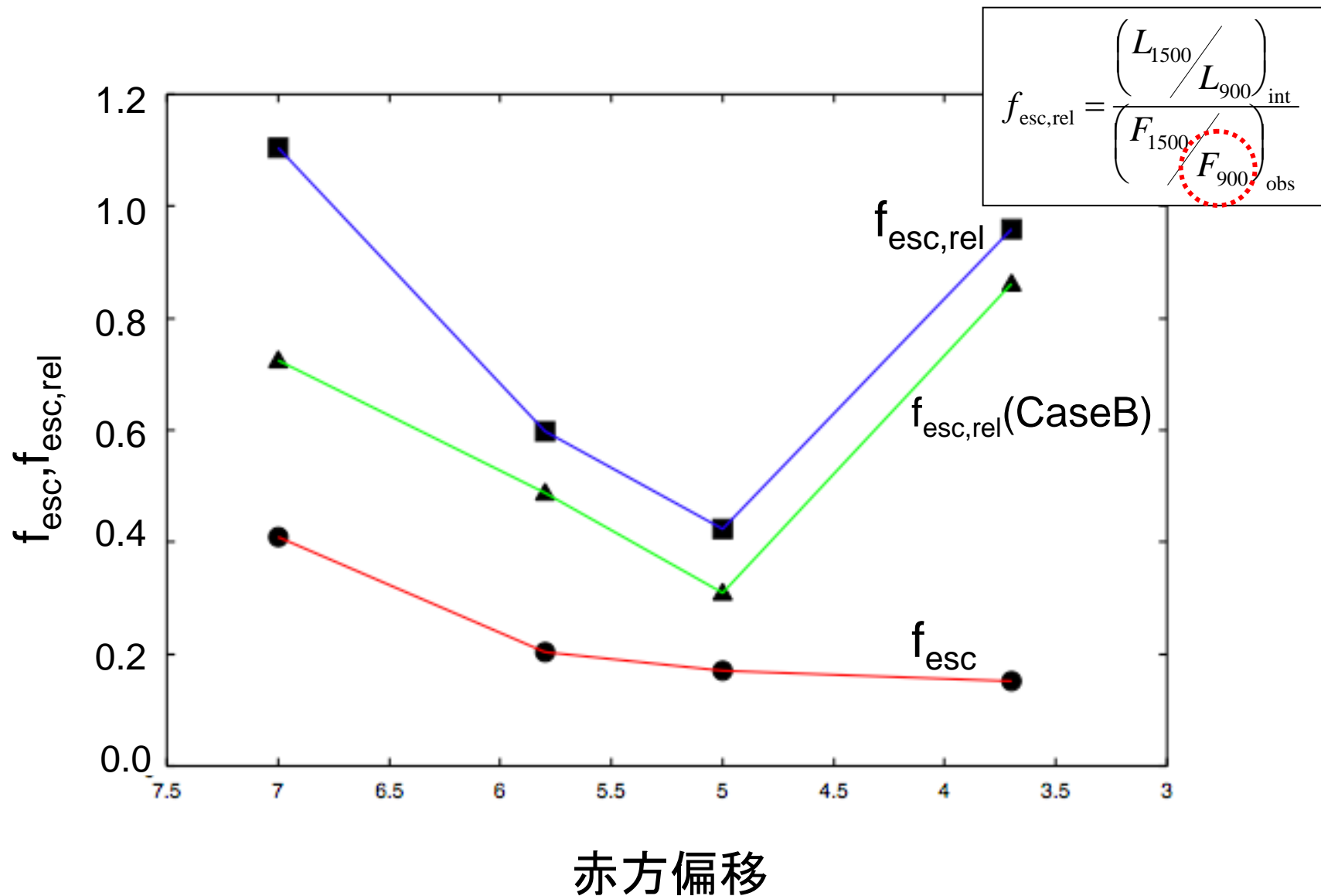
ダストに吸収されるエネルギーの割合



各輻射の脱出確率



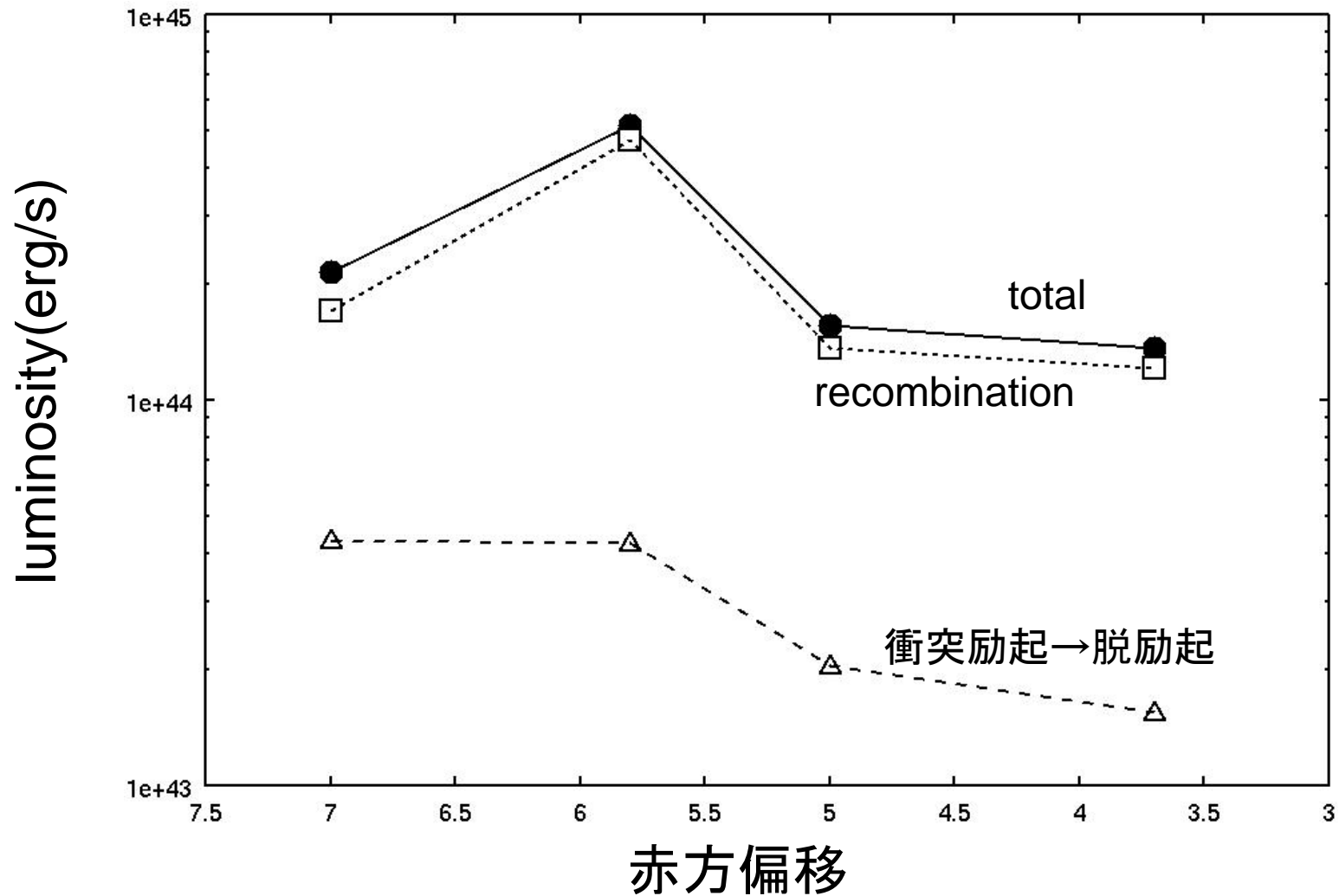
散乱光を考慮したrelative escape fraction



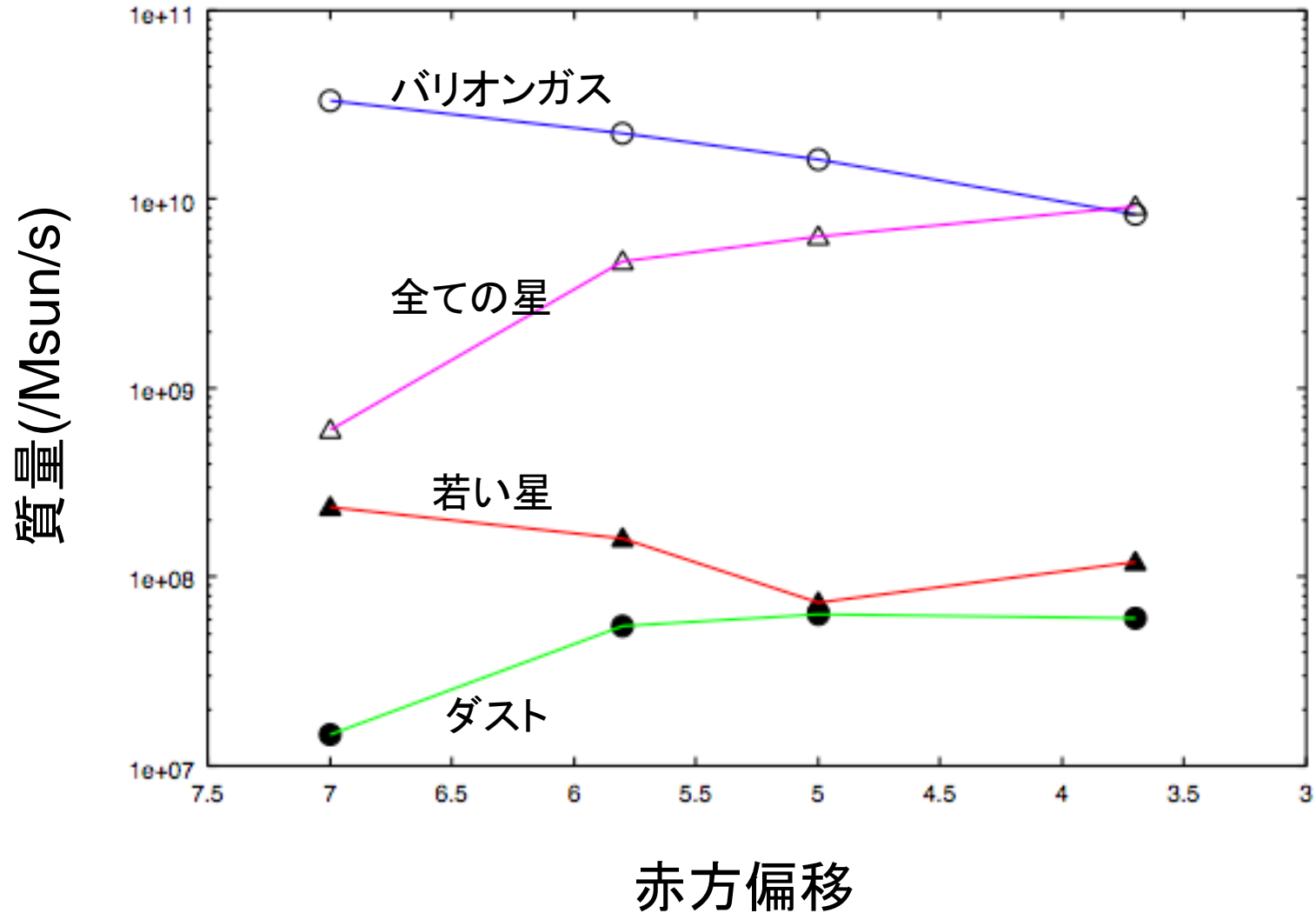
まとめ2

- ダストに吸収される輻射のエネルギーは銀河内全体の重元素汚染史に依存していない。
- 赤外線空間分布は星形成領域を主にトレースしLAEフェイズではdiffuseに広がっており、LBGフェイズでは中心に密な構造を示す。
- 再結合放射による電離光子の一部が銀河内から脱出する効果によってrelative escape fractionは非常に大きくなる。

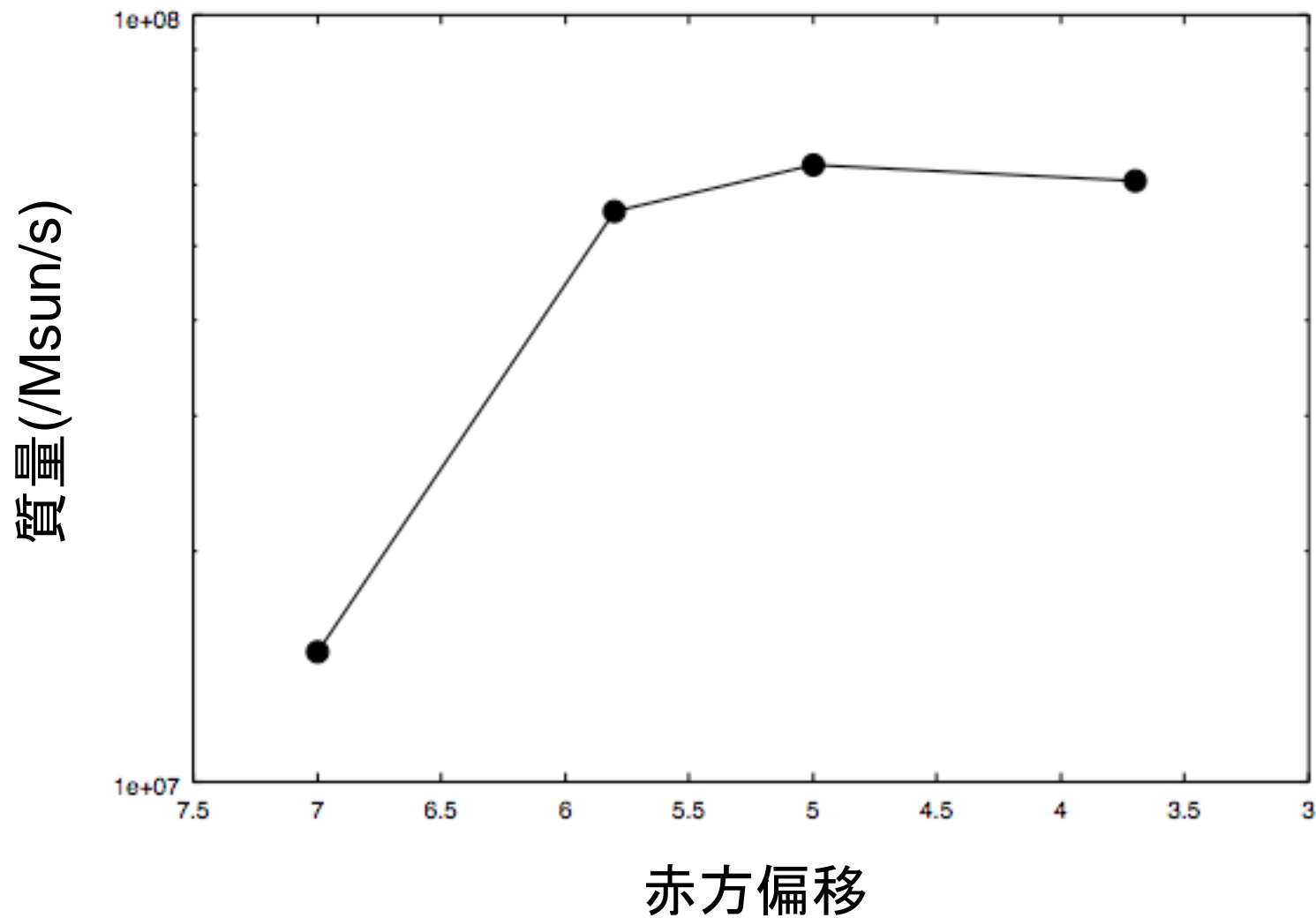
ライマンアルファのintrinsicな光度



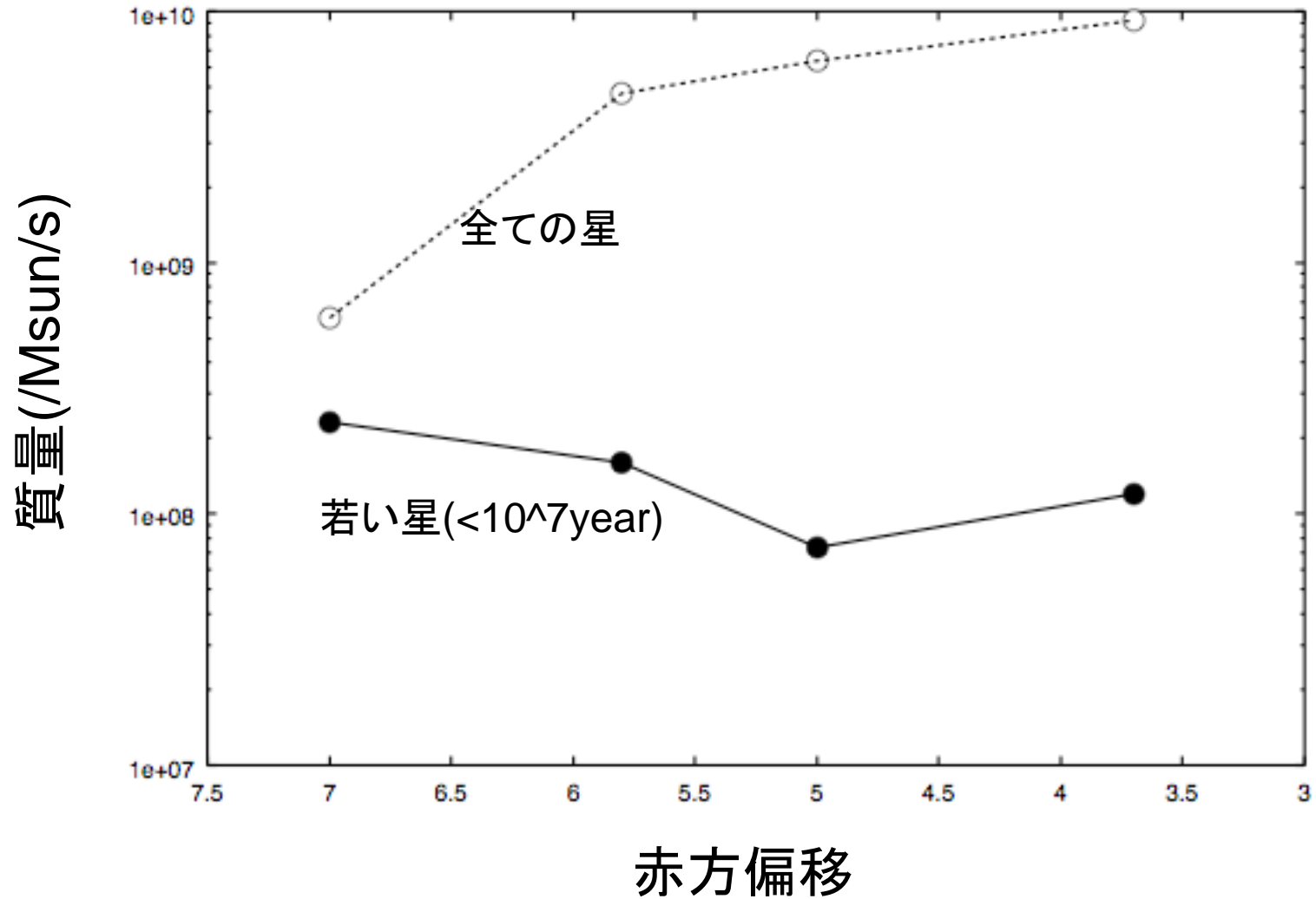
各質量の進化



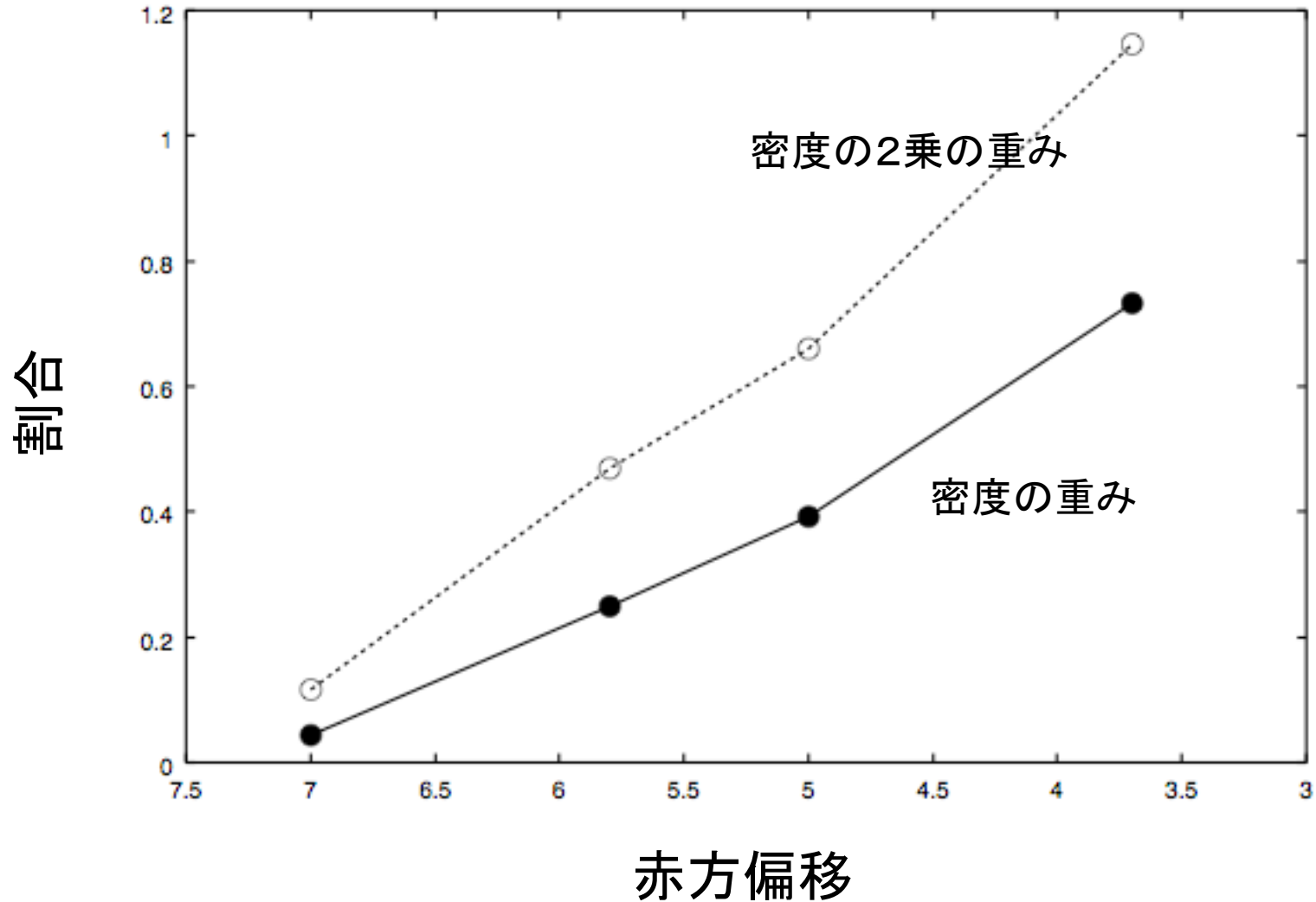
ダスト質量の進化



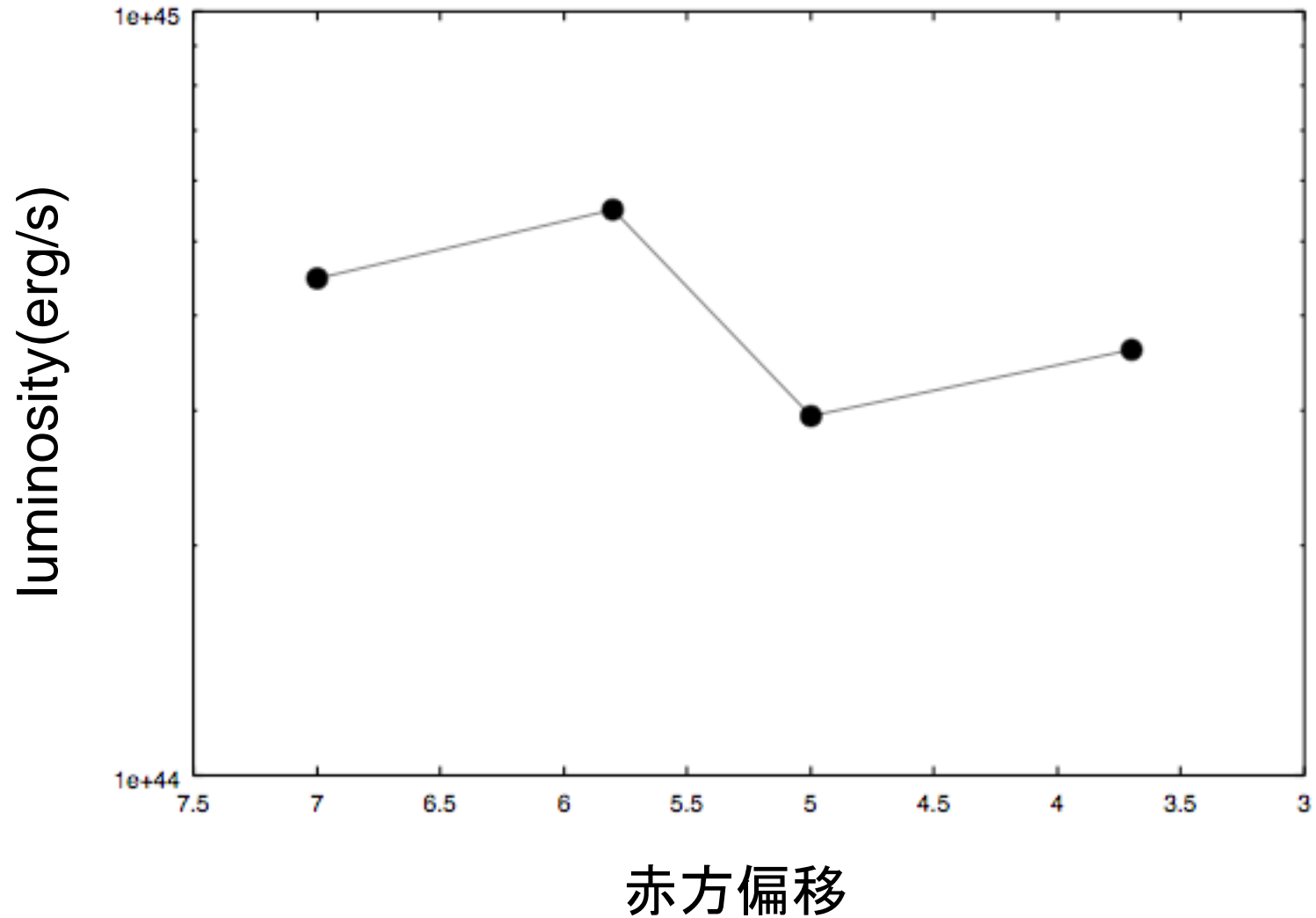
星質量の進化



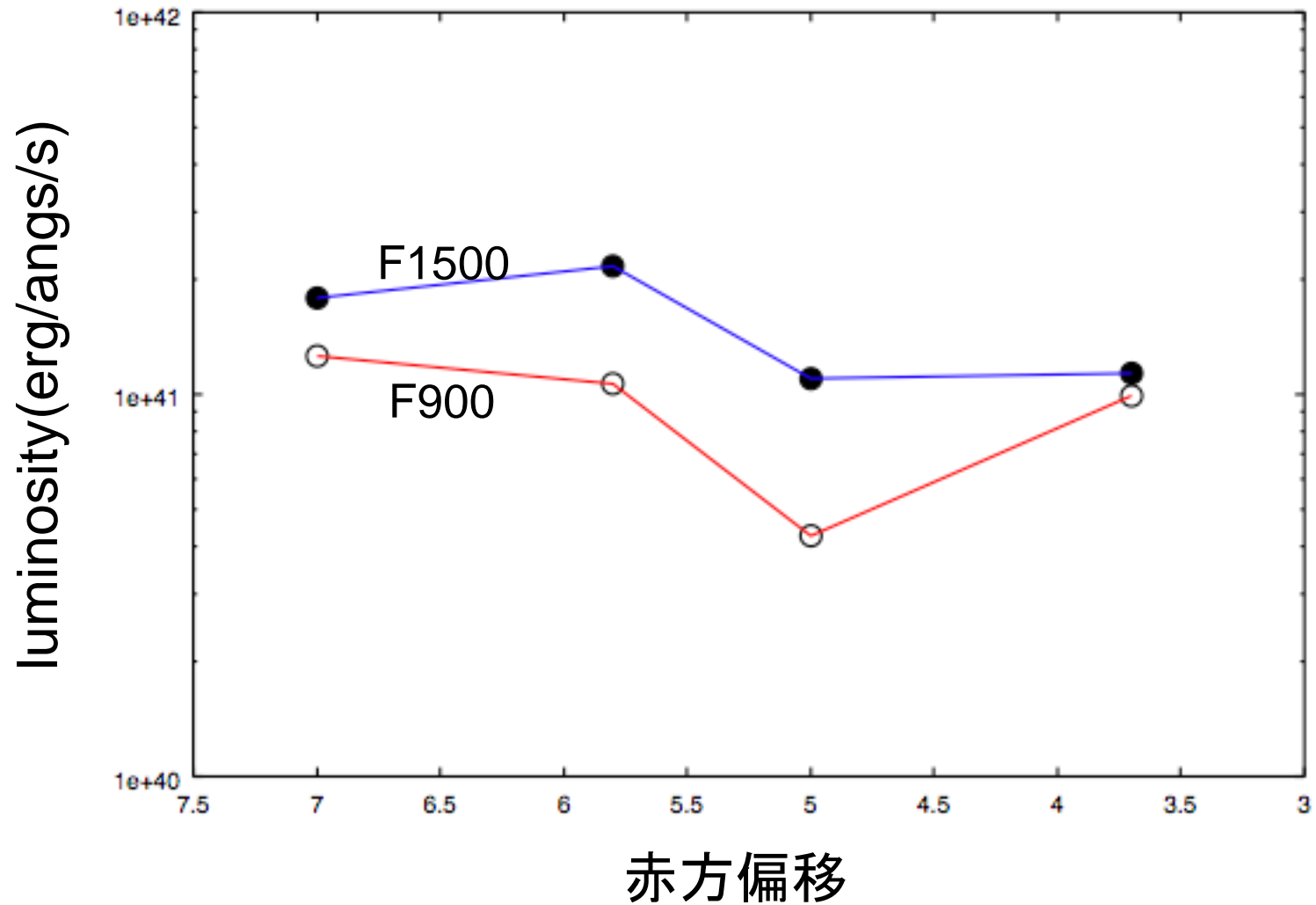
重元素汚染の割合



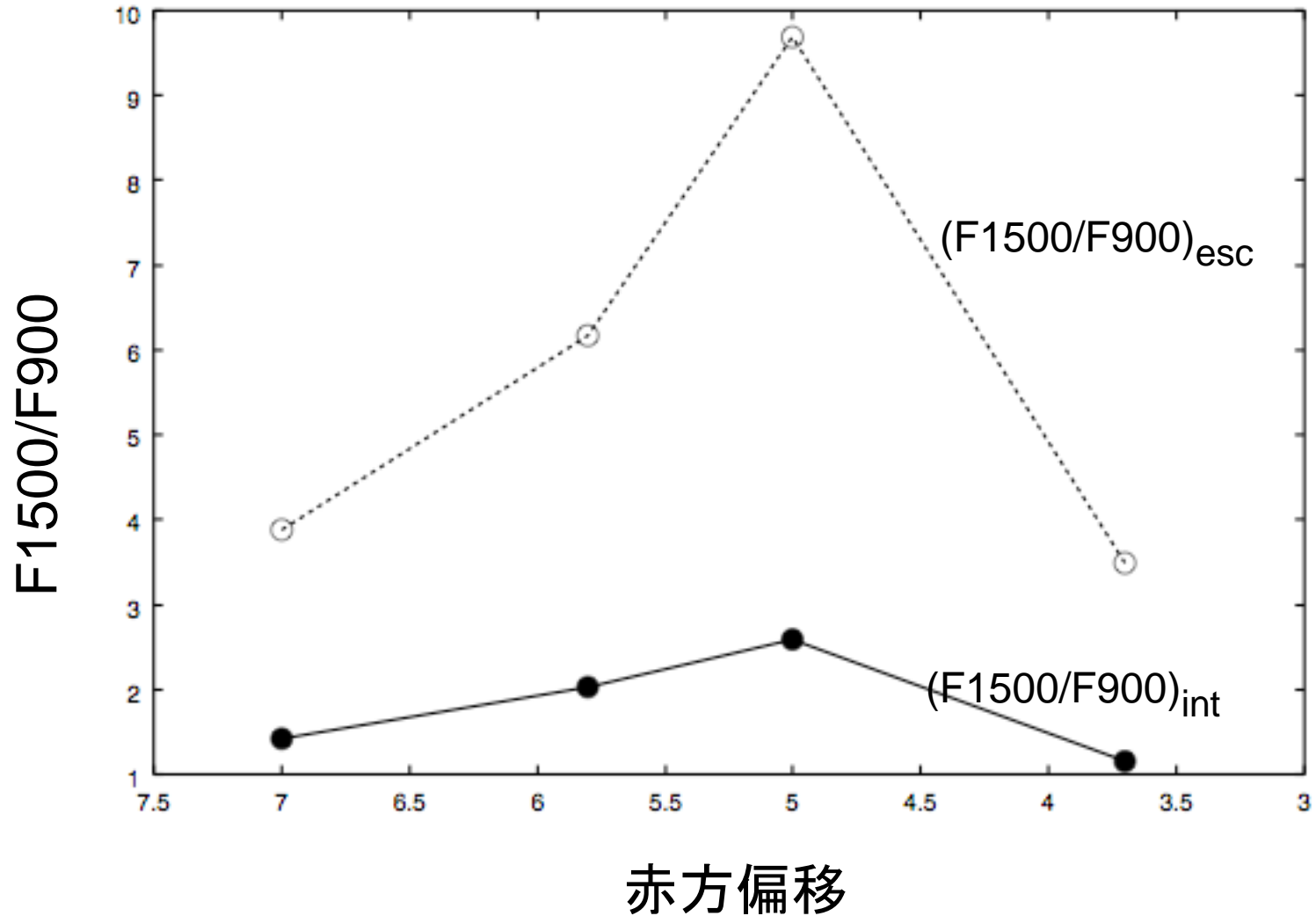
星のtotal luminosityの進化



F1500, F900の進化



F1500/F900の進化



冷却関数

Thoul&Weinberg(1996)

QuickTimeý Ç²
TIFFÅiîÒàlèkÅj êLí£ÉvÉçÉOÉâÉÄ
Ç™Ç±ÇÃÉsÉNE`ÉÉÇ¾¼â©ÇÈÇžÇ½Ç...ÇÕiKónÇ-ÇlÅB

QuickTimeý Ç²
TIFFÅiîÒàlèkÅj êLí£ÉvÉçÉOÉâÉÄ
Ç™Ç±ÇÃÉsÉNE`ÉÉÇ¾¼â©ÇÈÇžÇ½Ç...ÇÕiKónÇ-ÇlÅB

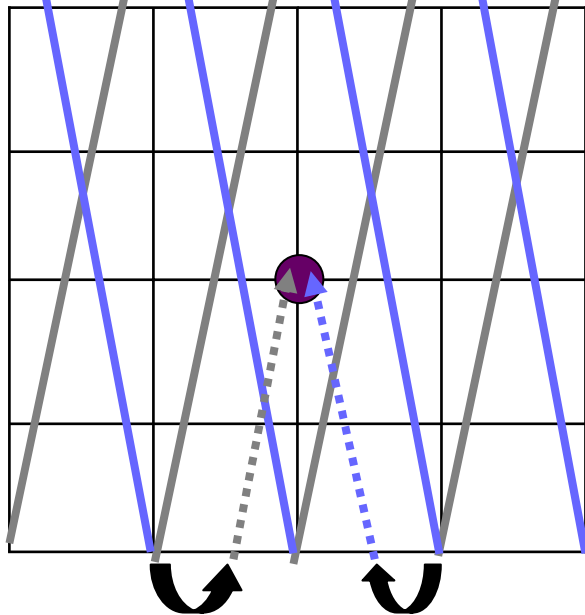
Thoul&Weinberg(1995)

Authentic Radiative Transfer Method (ART法)

特徴：流体メッシュとは独立に輻射メッシュを考え、流体メッシュ上の輻射場は近くの輻射メッシュの情報から補間する

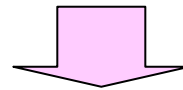
利点：long法に比べ計算量が軽い、数値拡散が起きない

難点：アルゴリズムが少々複雑



計算量

$$\sim N_{\text{path}} \times \cancel{N_X N_Y N_Z} \times N_{\theta} N_{\phi}$$



$$\sim N_{\text{path}} \times (N_X N_Y N_Z \div N) \times N_{\theta} N_{\phi}$$

$$\xrightarrow{\text{teal arrow}} \sim N^5$$