

ダスト放射「原始」銀河

榎基宏 (国立天文台)

竹内努 (名古屋大学)

石井貴子 (京大花山天文台)

§ 1. Introduction

*Galaxy Formation

星形成が進むとdustも形成される。

- ⇒ 星からの輻射はdustに吸収され、**赤外線 (IR)** で再び輻射される。
- ⇒ 銀河形成・星形成史を理解するためには、銀河の赤外線領域のSEDを評価することが重要。

*Forming Galaxies

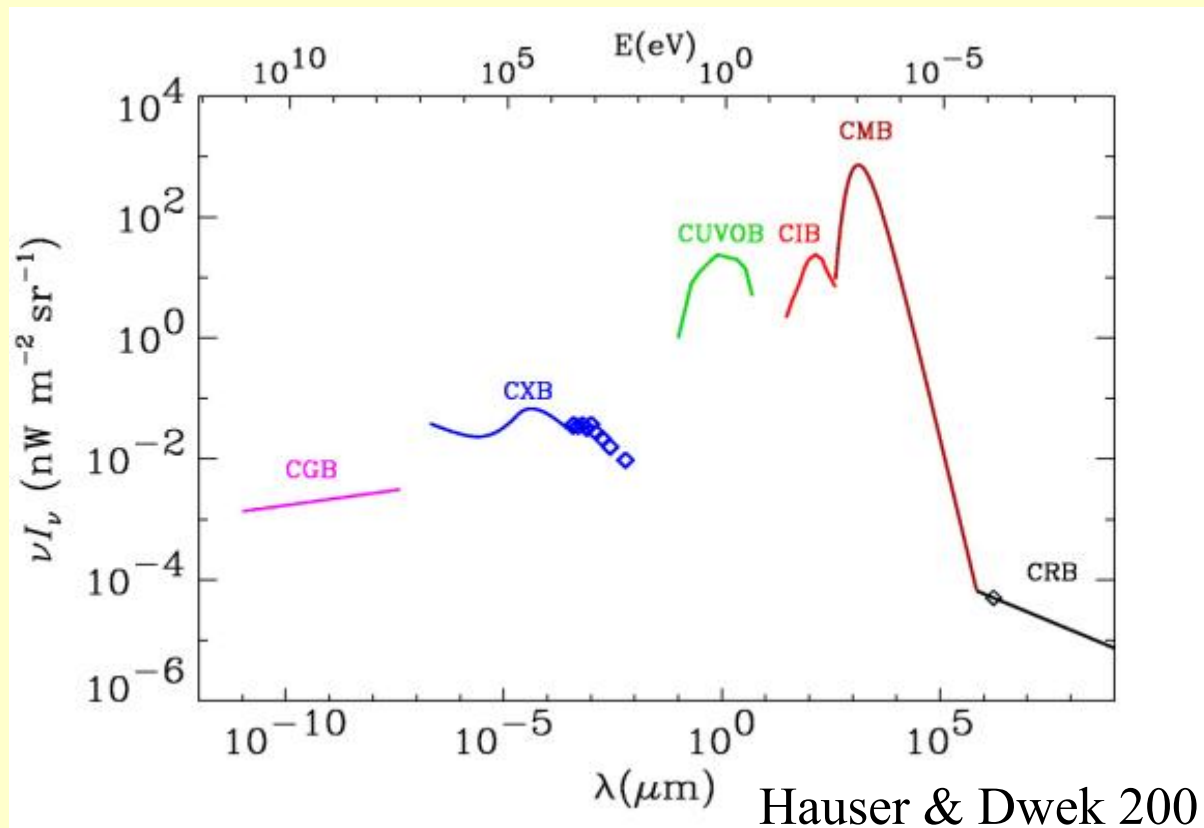
high- z ($z > 4$) にある形成途上の銀河 (**Forming Galaxies**) は直接見えるか？

- ⇒ 個々の銀河からの赤外線輻射の積分は、IR-submmの背景輻射 (**Cosmic Background Radiation: CBR**) として観測できるのではないだろうか？

Cosmic background radiation

*宇宙背景輻射とその揺らぎ

宇宙には様々な波長の「背景放射」が満ちている



⇒ 銀河からの寄与を引き出せれば、銀河の形成と進化について重要な情報が得られうる。

◎特に、銀河として分解できない遠方の暗い銀河の情報

Forming Galaxies

どのくらいの赤外線輻射強度があるのか？

⇒ dustの種類 (size分布)に依存

⇒ high-zは、low-zと異なる

(※ Forming galaxies = Young metal-poor galaxies)

*dust の主な供給源

AGB/RGB
SNIa } high-zでは効かない

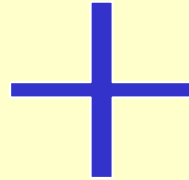
SNII → high-zでは主

⇒ high-zではdustの種類(size分布)が異なる

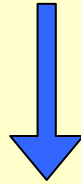
⇒ SEDは近傍銀河と異なる

そこで

SNII のみから形成されたdust
があるForming galaxiesのSED



準解析的銀河形成モデル



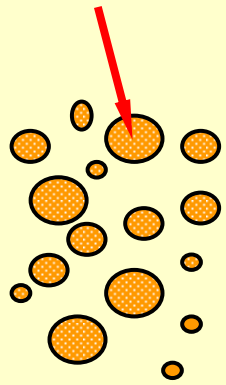
$z=5\sim 20$ に存在するForming galaxies の
Number counts、
相関函数、
IR-submm 背景輻射とその揺らぎ
を計算し、観測可能性を議論する。

§ 2. Galaxy Formation Model

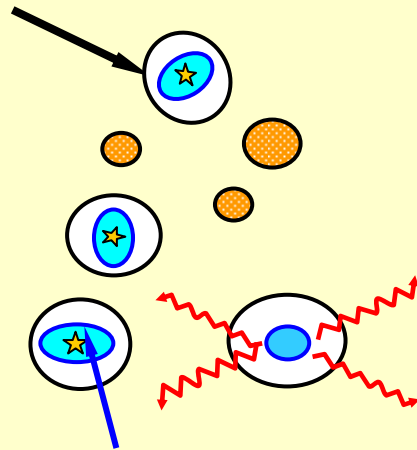
• Galaxy Formation in Hierarchical Clustering Scenario

CLUSTERLING OF DARK HALOS

HOT GAS

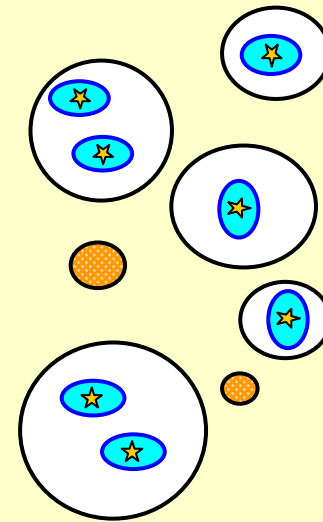


DARK HALO

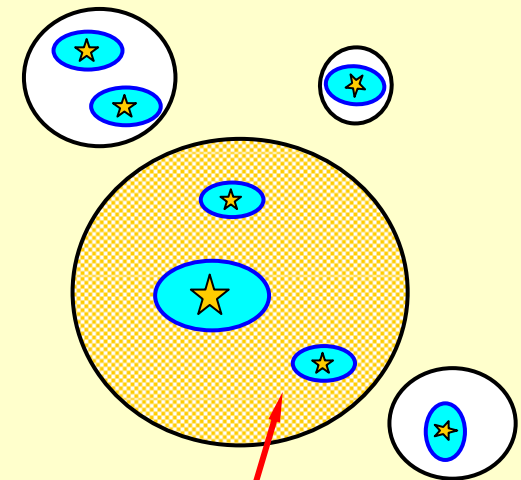


GALAXY;
COLD GAS, STAR

* MERGERS OF
GALAXIES



INTRA CLUSTER
GAS



*PRESENT UNIVERSE
GALAXY CLUSTERS
FIELD GALAXIES

*RADIATIVE COOLING
*STAR FORMATION
* SN FEEDBACK

*COLLAPSE OF
DARK HALOS
*SHOCK-HEATING

Star Formation & Dust Production

*Star Formation Rate (SFR)

cold gas → disk star

- cold gas mass と 銀河のcircular velocity で決める
- 個々の銀河のSFRをSA modelで計算

*Spectral energy distribution (SED)

Forming Galaxies ($t_{age} < 10^8$ yr)

- > dust供給源はSNIIのみ
- > SEDは近傍銀河と異なる

SFR (SA model)



Dust formation model (Hirashita et al. 2003)



SED (Takeuchi et al 2003)

SED of Forming Galaxies

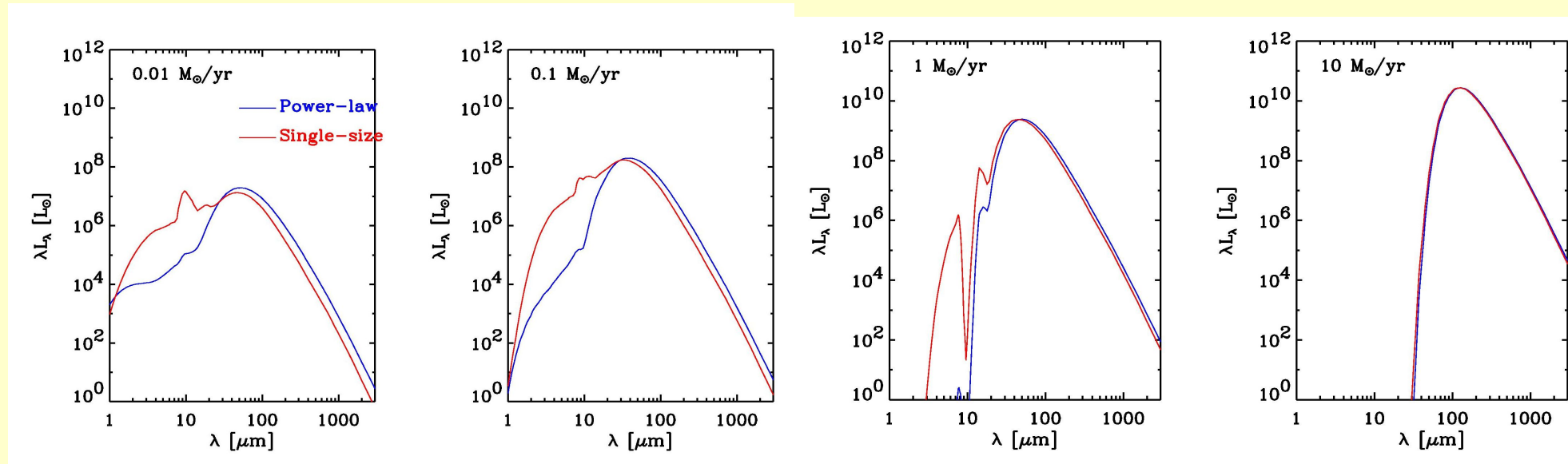
• dust size分布

(1) Single-size (Todini & Ferrara 2001)

$a = 6 \times 10^{-4} \mu\text{m}$; Silicate, $a = 2 \times 10^{-2} \mu\text{m}$; Carbon

(2) Power-law (Nozawa et al. 2003)

$$\frac{dn}{da} \propto \begin{cases} a^{-2.5} & 5 \times 10^{-4} \leq a \leq 10^{-2} (\mu\text{m}) \\ a^{-3.5} & 10^{-2} \leq a \leq 5 (\mu\text{m}) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

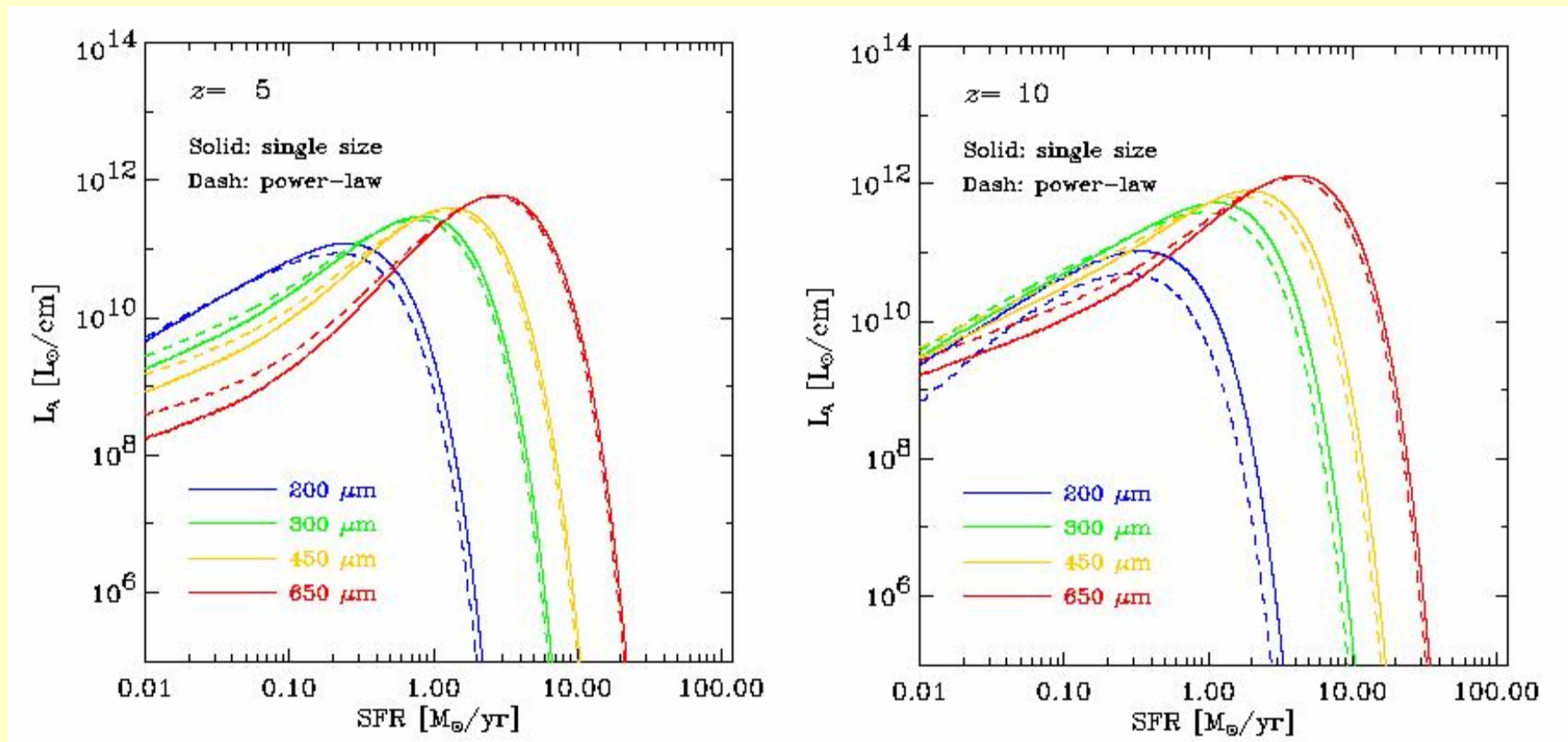


power lawはsingle sizeに比べると、 \Rightarrow large scale のdustもできる
 \Rightarrow small dust が相対的に減るので、短波長側で暗くなる

SFR \Rightarrow IR luminosity

SFRが大 \Rightarrow dustが増える $\Rightarrow L_{\text{IR}}$ も大

しかし、dustが増えすぎると自己吸収が効いて、(中間赤外領域で)
 L_{IR} は減少する。



§ 3. Clustering & cosmic background radiation of galaxies

*Cosmic background radiation (CBR)

$$I_{\nu_0} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{\infty} \frac{c}{(1+z)^2 H(z)} \left[\int_0^{\infty} \Phi(L_{\nu_0}, z) K(L_{\nu_0}, z) L_{\nu_0} dL_{\nu_0} \right] dz$$
$$\equiv \frac{c}{4\pi} \int_0^{\infty} \frac{j(\nu_0, z)}{(1+z)^2 H(z)} dz,$$

where L_{ν_0} is the monochromatic luminosity at observed frequency ν_0 , $\Phi(L_{\nu_0})$ is the luminosity function, and $K(L_{\nu_0}, z)$ is the K -correction defined as $K(L_{\nu_0}, z) L_{\nu_0} \equiv (1+z)L_{(1+z)\nu_0}(L_{\nu_0})$.

*Correlation function of CBR fluctuation

CBR揺らぎの
相関函数:

$$C(\theta, \nu_0) \equiv \langle \delta I(\Omega, \nu_0) \delta I(\Omega', \nu_0) \rangle$$

where $\delta I(\Omega, \nu_0)$ is the fluctuation of the background,

\Rightarrow
($\theta \ll 1$ を仮定)

$$C(\theta, \nu_0) = \frac{c}{(4\pi)^2} \int_0^{\infty} \frac{j^2(\nu_0, z)}{(1+z)^4 H(z)} \int_{-\infty}^{\infty} \xi_{\text{gal}}(r_c, z) du dz$$

$\xi_{\text{gal}}(r, z)$; galaxy correlation function

* Clustering of galaxies

$$\xi_{\text{gal}}(r, z) = b_{\text{eff}}^2 \xi_{\text{DM}}(r, z)$$

where b_{eff} is the effective bias and $\xi_{\text{DM}}(r, z)$ is the correlation function of the DM.

b_{eff} : Effective bias (Baugh et al. 1999)

$$b_{\text{gal,eff}} = \frac{\int b_{\text{halo}}(M) \langle N_{\text{gal}}(M) \rangle n(M) dM}{\int \langle N_{\text{gal}}(M) \rangle n(M) dM}$$

$b_{\text{Halo}}(M)$: 質量 M のdark halo のbias

$\langle N_{\text{gal}}(M) \rangle$: 質量 M のdark haloにあるgalaxyの平均個数

← SA-modelにより求める

$n(M)$: dark halo の mass function

* 異なるdark haloに存在するgalaxyからの寄与を
考えている

→large scale で有効

*Fluctuation of the CBR temperature

CBR温度揺らぎの定義:

$$\delta T(\Omega, \nu_0) \equiv \delta I(\Omega, \nu_0) \left(\frac{\partial B_0}{\partial T_0} \right)^{-1}$$

where T_0 is the mean temperature of CMB, B_0 is black body brightness

温度揺らぎの
相関函数:

$$\begin{aligned} C_T^{1/2}(\theta, \nu_0) &\equiv \langle \delta T(\Omega, \nu_0) \delta T(\hat{\Omega}, \nu_0) \rangle^{1/2} \\ &= C^{1/2}(\theta, \nu_0) \frac{c^2 k_b T_0^2}{2h_p^2 \nu_0^4} \left[\exp\left(\frac{h_p \nu_0}{k_b T_0}\right) - 1 \right]^2 \exp\left(-\frac{h_p \nu_0}{k_b T_0}\right) \end{aligned}$$

温度揺らぎの
power spectrum:

$$P_T(k, \nu_0) = \int d\theta C_T(\theta, \nu_0) e^{-ik\theta}.$$

温度揺らぎの
多重極展開:

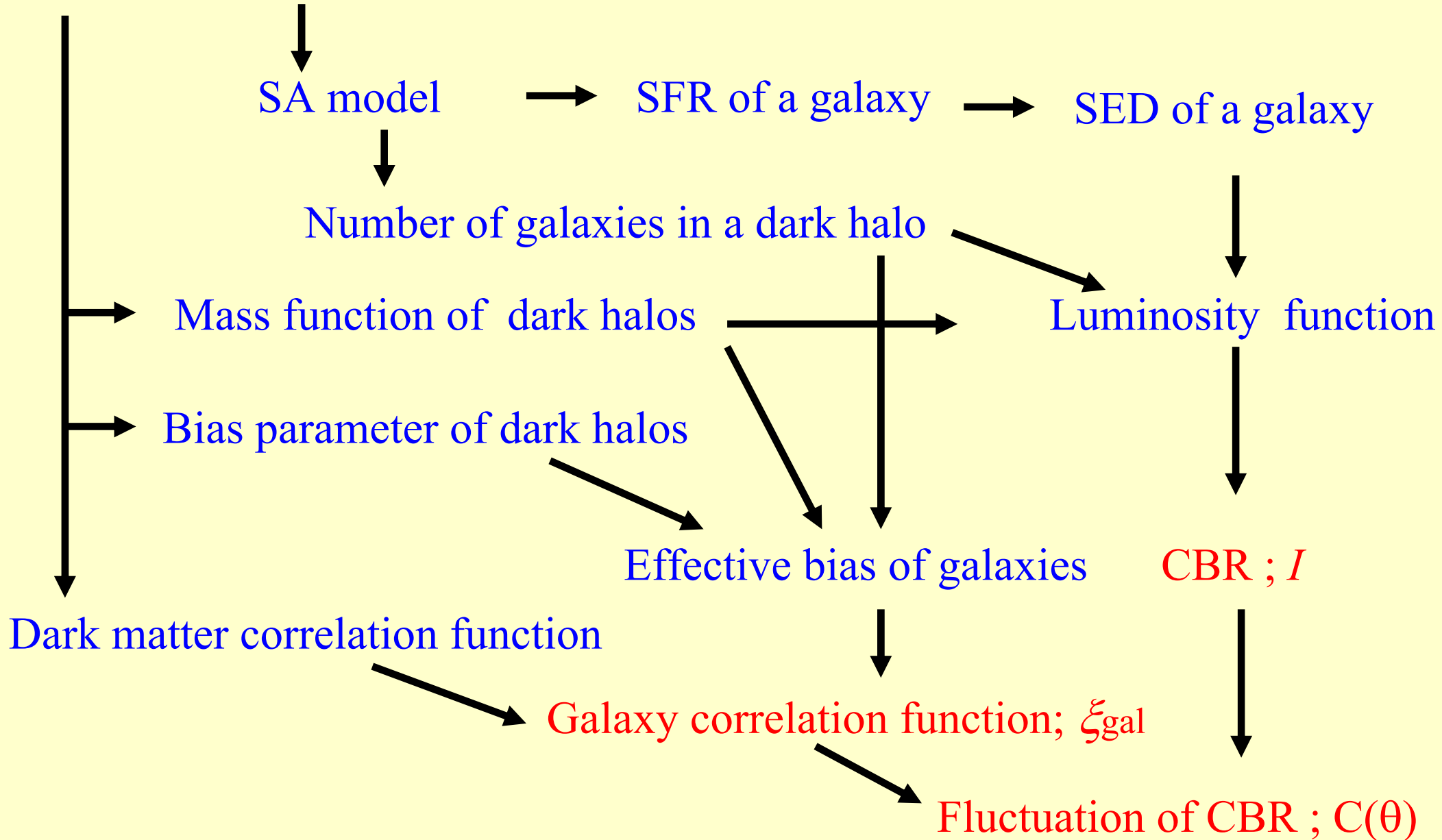
$$C_T(\theta, \nu_0) = \sum_{l=0}^{\infty} \frac{2l+1}{4\pi} C_l(\nu_0) P_l(\cos\theta)$$

where $P_l(\cos\theta)$ are Legendre polynomials.

$$C_l(\nu_0) = 2\pi \int_0^\pi d\cos\theta P_l(\cos\theta) C_T(\theta, \nu_0).$$

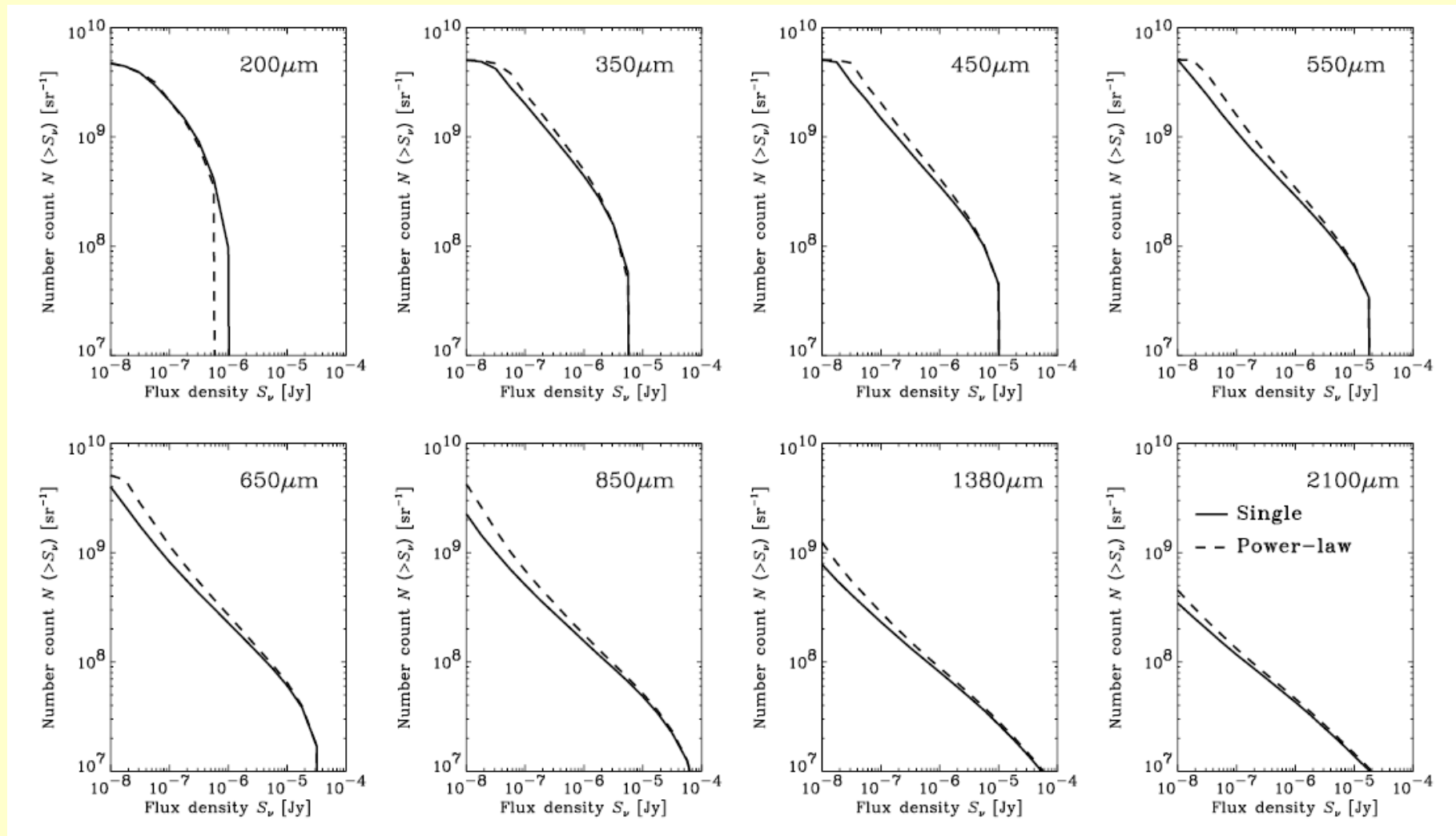
*計算の流れ

Cosmological Model



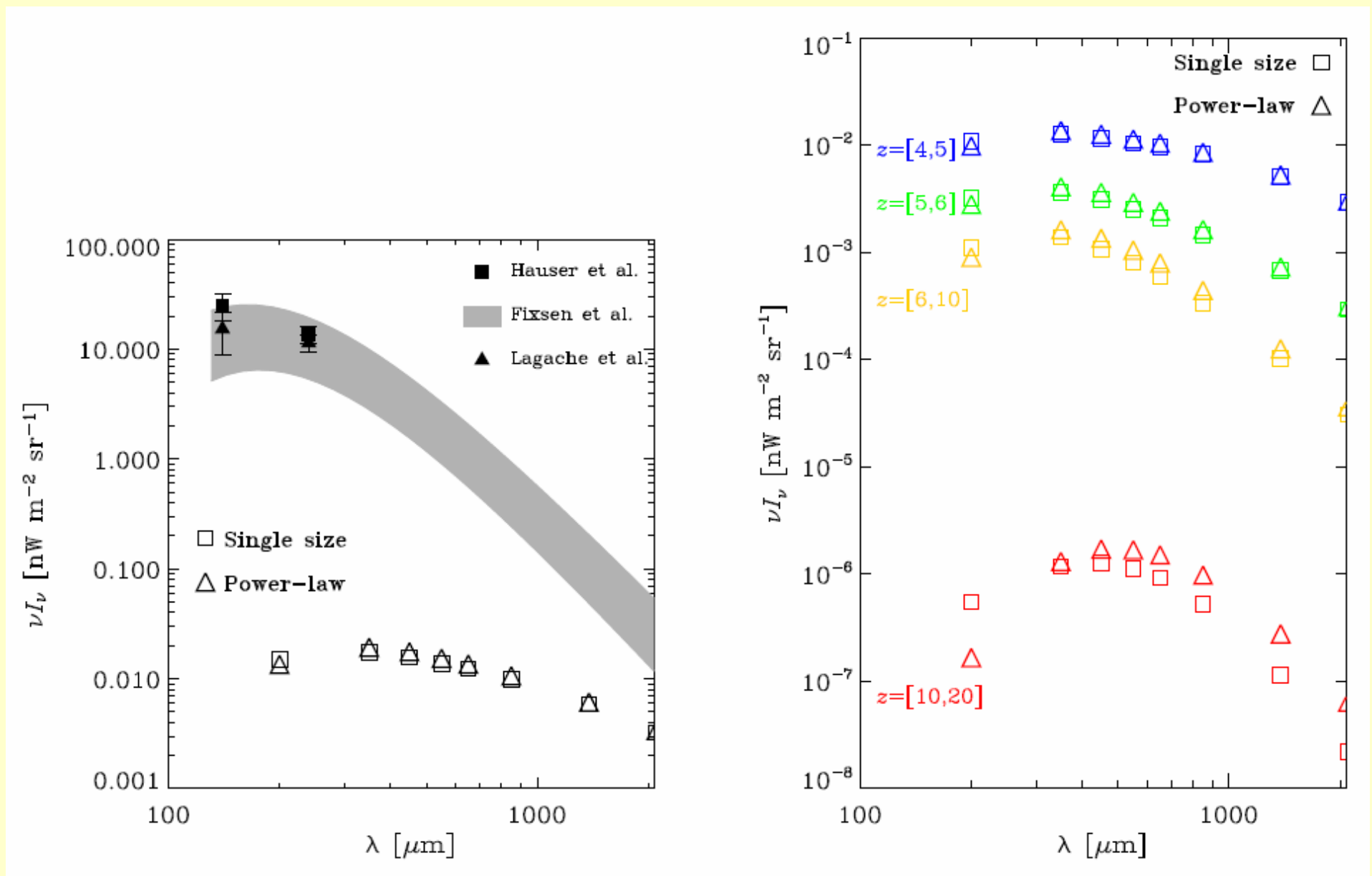
§ 4. Results

*Number Count of forming galaxies at $5 < z < 20$



power lawはsingle sizeに比べると、 \Rightarrow large scaleのdustもできる
 \Rightarrow small dustが相対的に減るので、短波長側で暗くなる

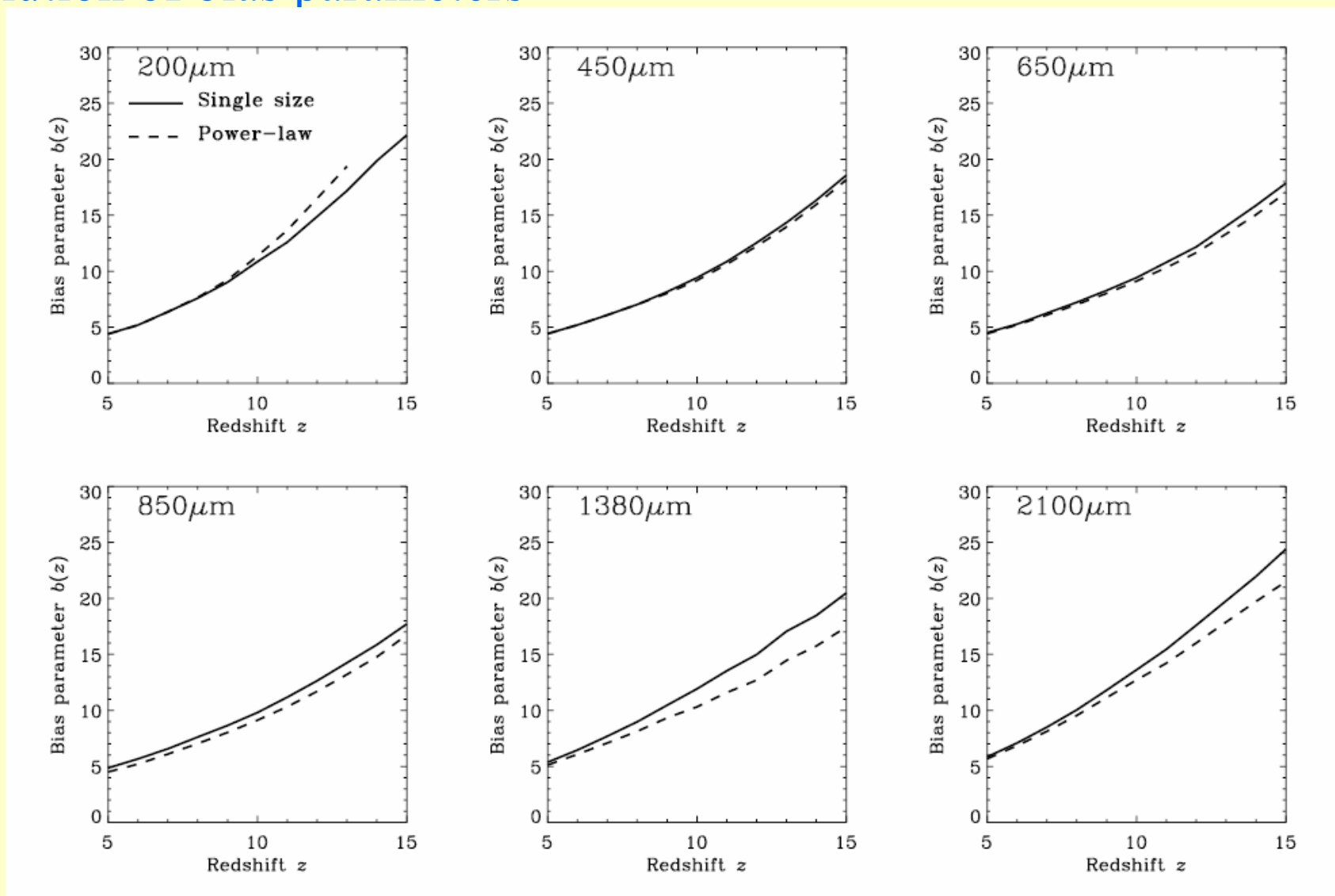
*CBR of forming galaxies at $5 < z < 20$



CBRへの、Forming galaxies からの寄与はほとんど無い。

*Clustering of forming galaxies at $5 < z < 20$

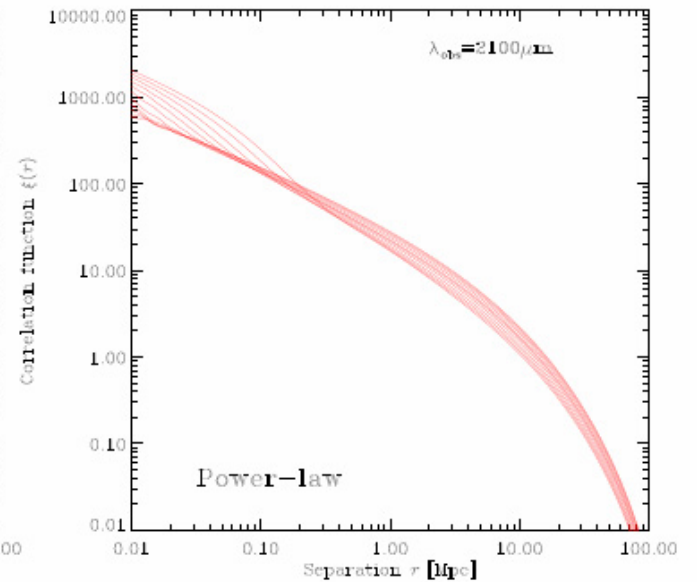
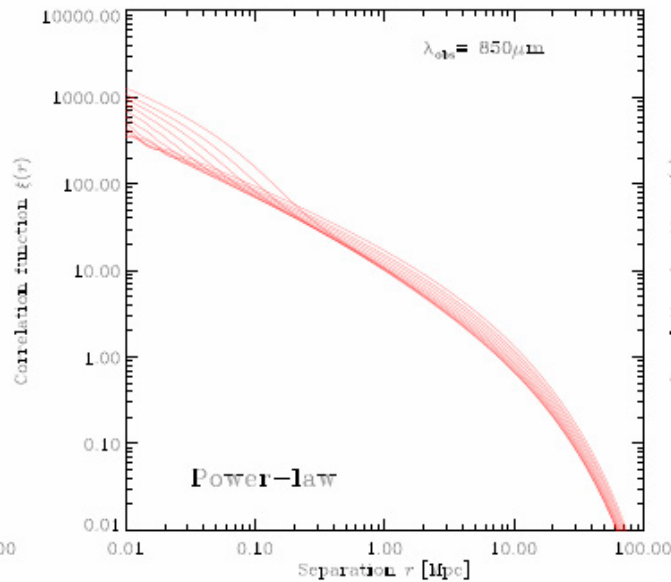
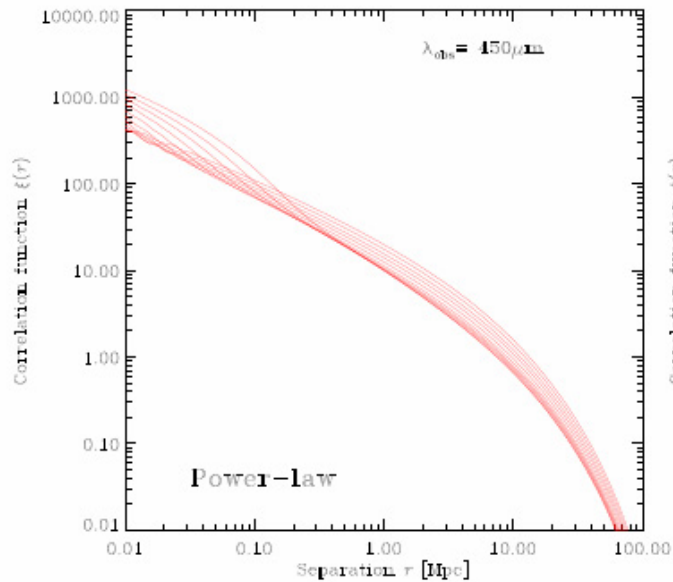
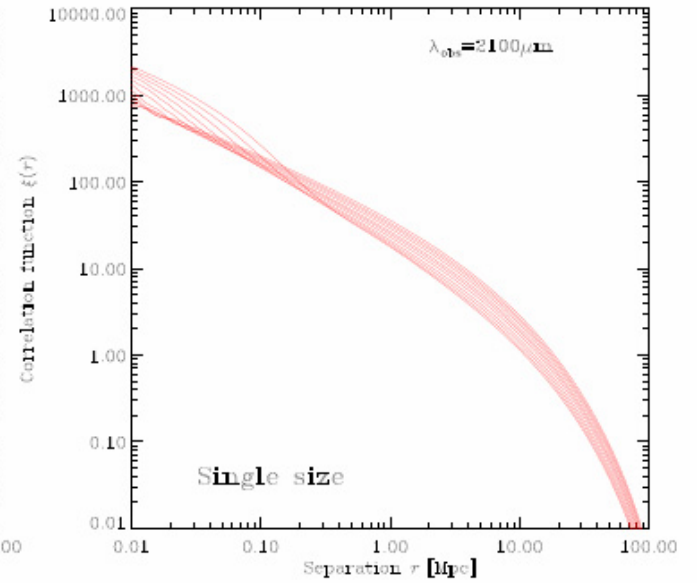
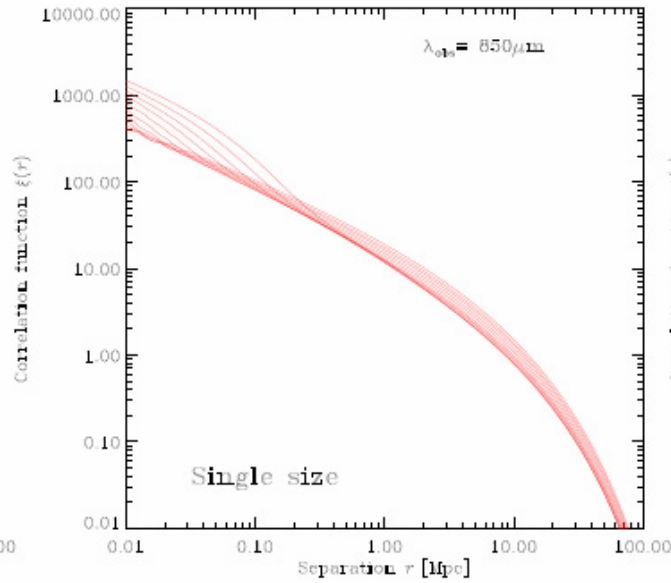
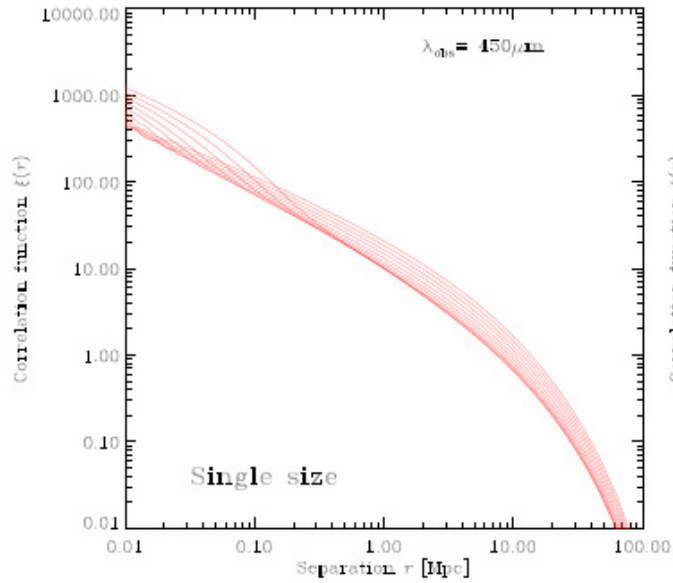
Evolution of bias parameters



power lawはsingle sizeに比べると、 \Rightarrow large scale のdustもできる
 \Rightarrow small dust が相対的に減るので、短波長側で暗くなる

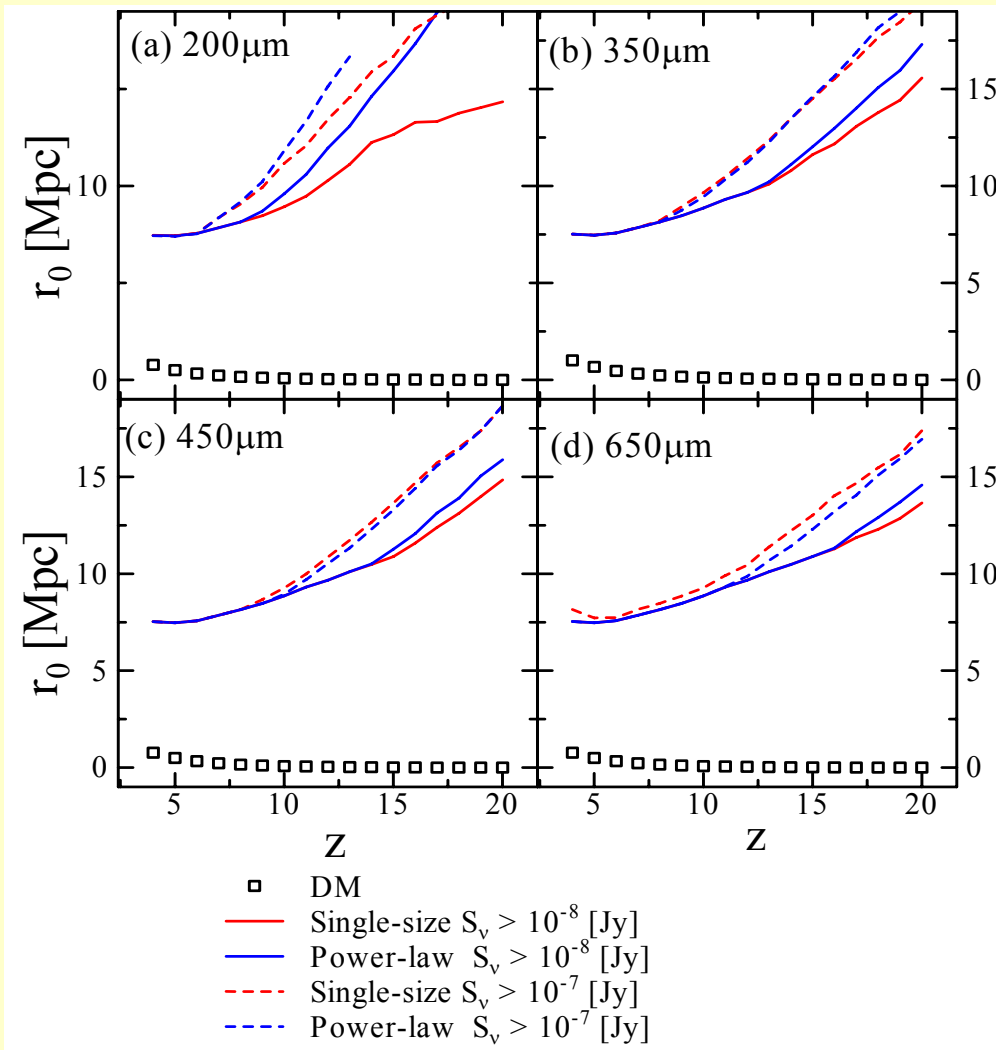
*Clustering of forming galaxies at $5 < z < 20$

Evolution of correlation functions



*Clustering of forming galaxies at $5 < z < 20$

Evolution of correlation length



*dust size 分布

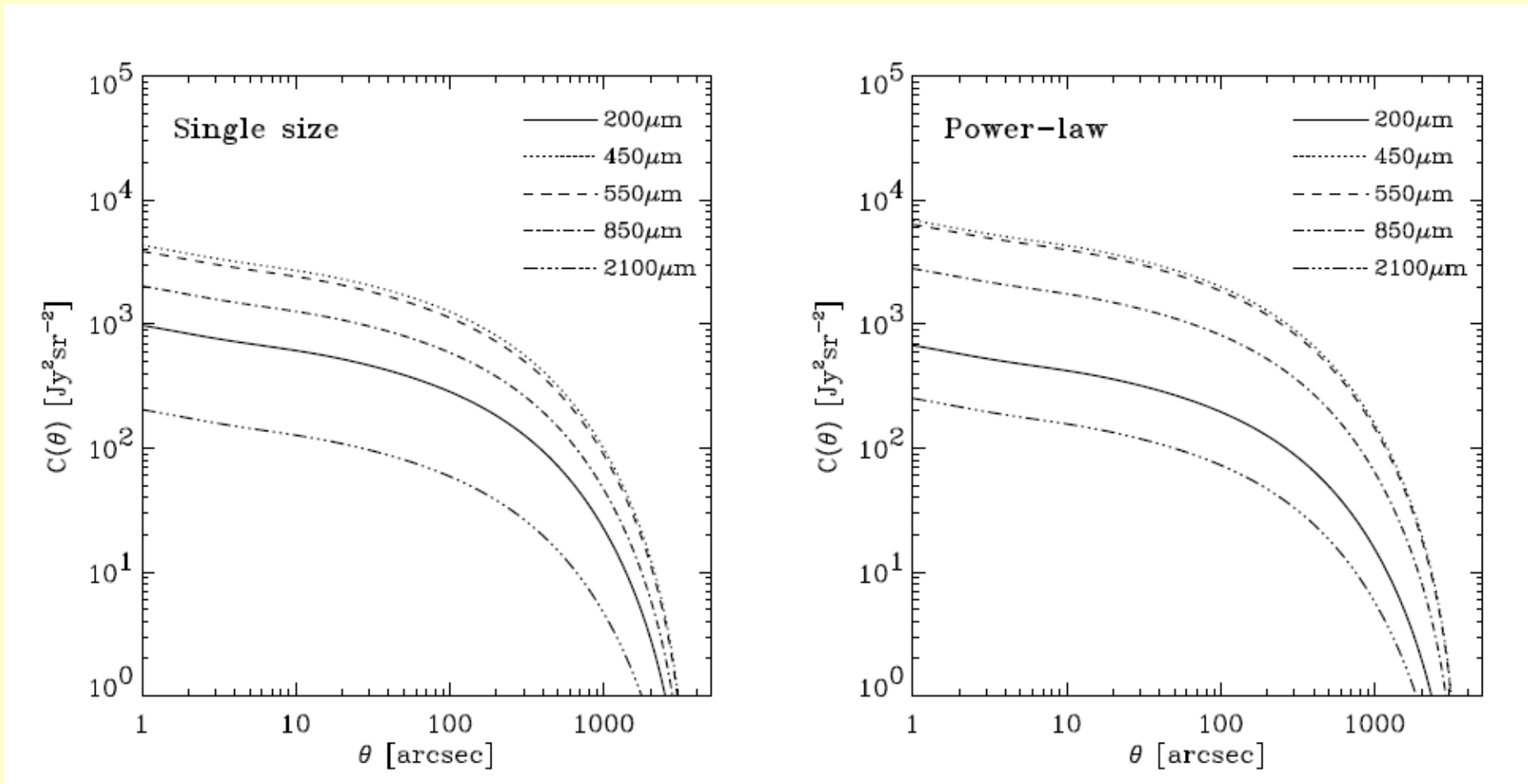
power law は
single size に比べると、

⇒ large scale の dust もできる

⇒ small dust が相対的に減るので、
短波長側で暗くなる

⇒ 短波長側の相関がより強くなる。

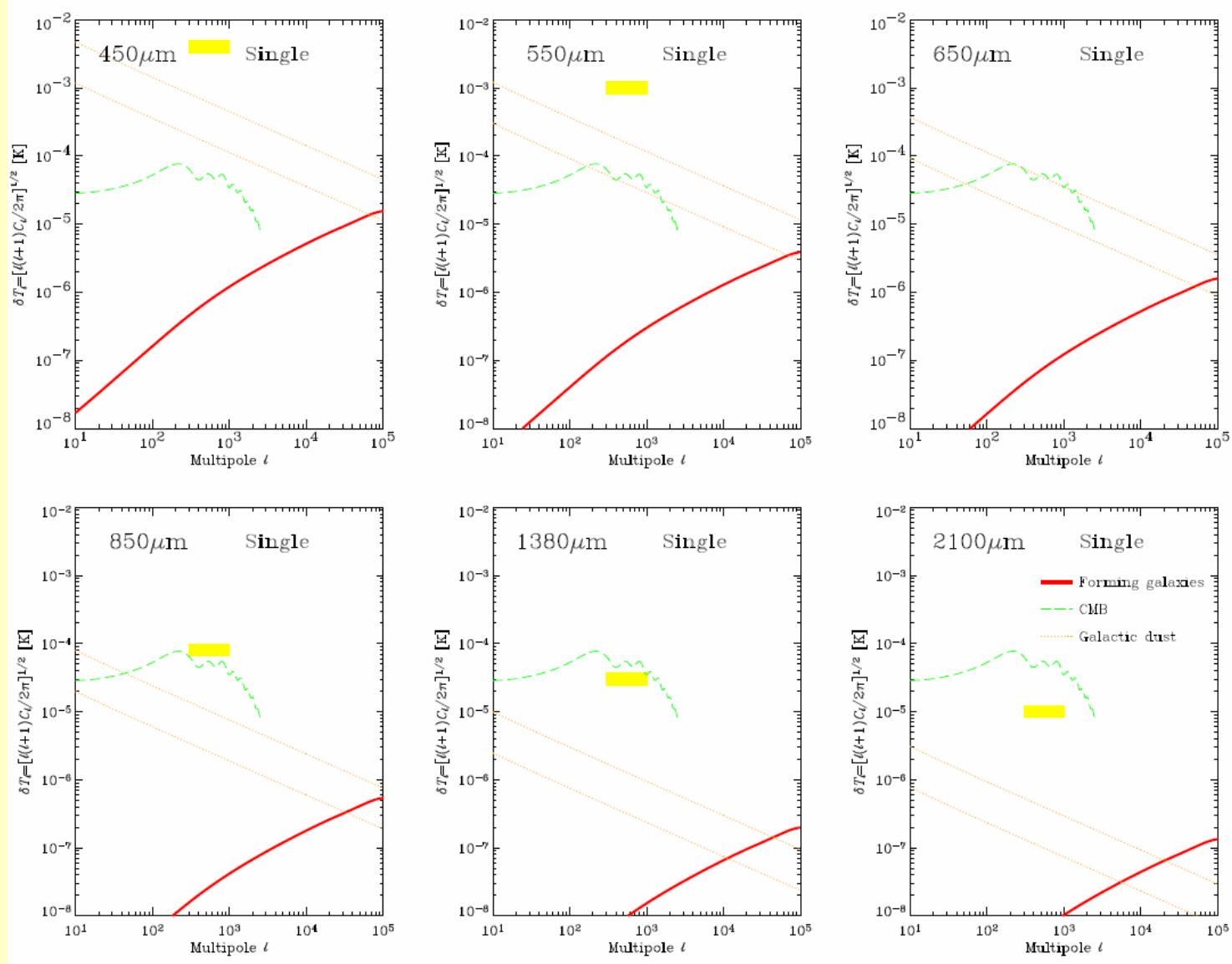
* Correlation function of the CBR contribution from forming galaxies at $5 < z < 20$



Forming galaxies の $C(\theta)$ の形は SCUBA 天体の $C(\theta)$ と似ているが、強度は弱い。しかし、波長依存性は異なる。

*Power spectrum of the fluctuation of the CBR temperature contribution from forming galaxies at $5 < z < 20$

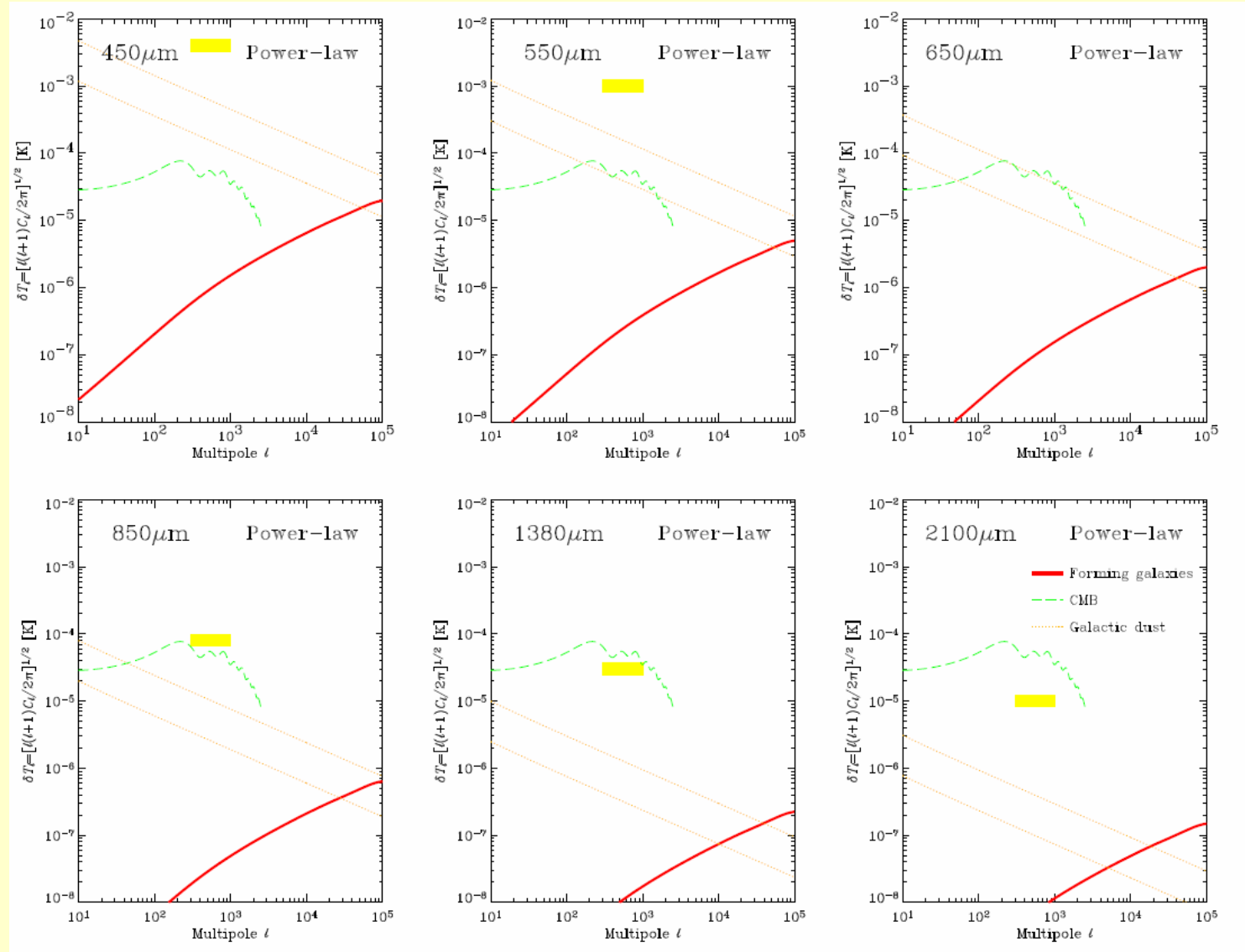
Single-size



長波長 ($\lambda > 450 \mu\text{m}$) の high- l ($l \sim 10^4 - 10^5$) で forming galaxies の寄与が銀河系内ダストの寄与をなんとか超える

*Power spectrum of the fluctuation of the CBR temperature contribution from forming galaxies at $5 < z < 20$

Power-law



長波長 ($\lambda > 450 \mu\text{m}$) の high- l ($l \sim 10^4 - 10^5$) で forming galaxies の寄与が銀河系内ダストの寄与をなんとか超える

§ 5. Discussion

* Observational strategy

High- z にある銀河からの赤外線輻射
⇒ IR-submmで観測される

揺らぎの観測

- ⇒ 銀河系内ダストの寄与より大きいスケール
- ⇒ high l ($l \sim 10^4 - 10^5$) [$\theta < 10''$]
- ⇒ 高分解能の観測が必要
- ⇒ 干渉計による観測が最適

干渉計によるdiffuse radiation の観測の感度

⇒ 波長/基線長で決まる → compact configuration が必要

1. 小口径のアンテナを使う (ALMA ACA)

* FOVは大

2. 単一鏡で空をmappingし基線長 ~ 0 のデータとして
使う (BIMA array, NRAO 12-m, VLA, BGT)

* CMBのsecondary anisotropy との比較

より長波長[ミリ波 (850 μm ~ 3mm) 領域]の方が観測可能性は高い？

今度はCMBのsecondary anisotropy と比較する必要がある。

- Thermal SZ effect が圧倒的

217 GHz (1382 μm)での寄与なし→これで差っ引ける。

- Kinetic SZ effects

$$\delta T_l \sim 3 \times 10^{-6} \text{ K at } 3000 < l < 10000 \quad (\text{Zhang et al. 2004})$$

- Inhomogeneous IGM reionization

$$\delta T_l \sim 10^{-6} \text{ K at } 3000 < l < 10000 \quad (\text{Salvaterra et al. 2004})$$

$\lambda > 1000\mu\text{m}$ だと、これらの効果が勝ってしまう。

でも、ダストからの放射はこれらの測定ノイズ源になる。