

# 重力レンズシミュレーションを 用いた増光率分布

高橋龍一(弘前大学・理工)

with 大栗真宗、浜名崇(国立天文台)、佐藤正典(名大)



## 国立天文台 計算機利用

タイトル:

「大規模銀河サーベイに向けた銀河擬似カタログの作成  
--バリオン音響振動を用いたダークエネルギーへの制限--」

カテゴリ: XT4A

# イントロ & 動機 1

- ★非一様宇宙の中を伝播する光源から出た光は  
重力レンズ効果により明るさ  $L$  が増光率  $\mu$  倍変化する

$$L \rightarrow \mu L \quad (\mu_{\min} \leq \mu)$$

- ★遠方になればなるほど重要になる

現在見つかっている最遠方銀河

IOK-01  $z=6.96$  Subaru (Iye+ 2006)

$z \sim 10$  candidates HST (Bouwens+ 2009; Yan+ 2009)

将来の遠方銀河探査

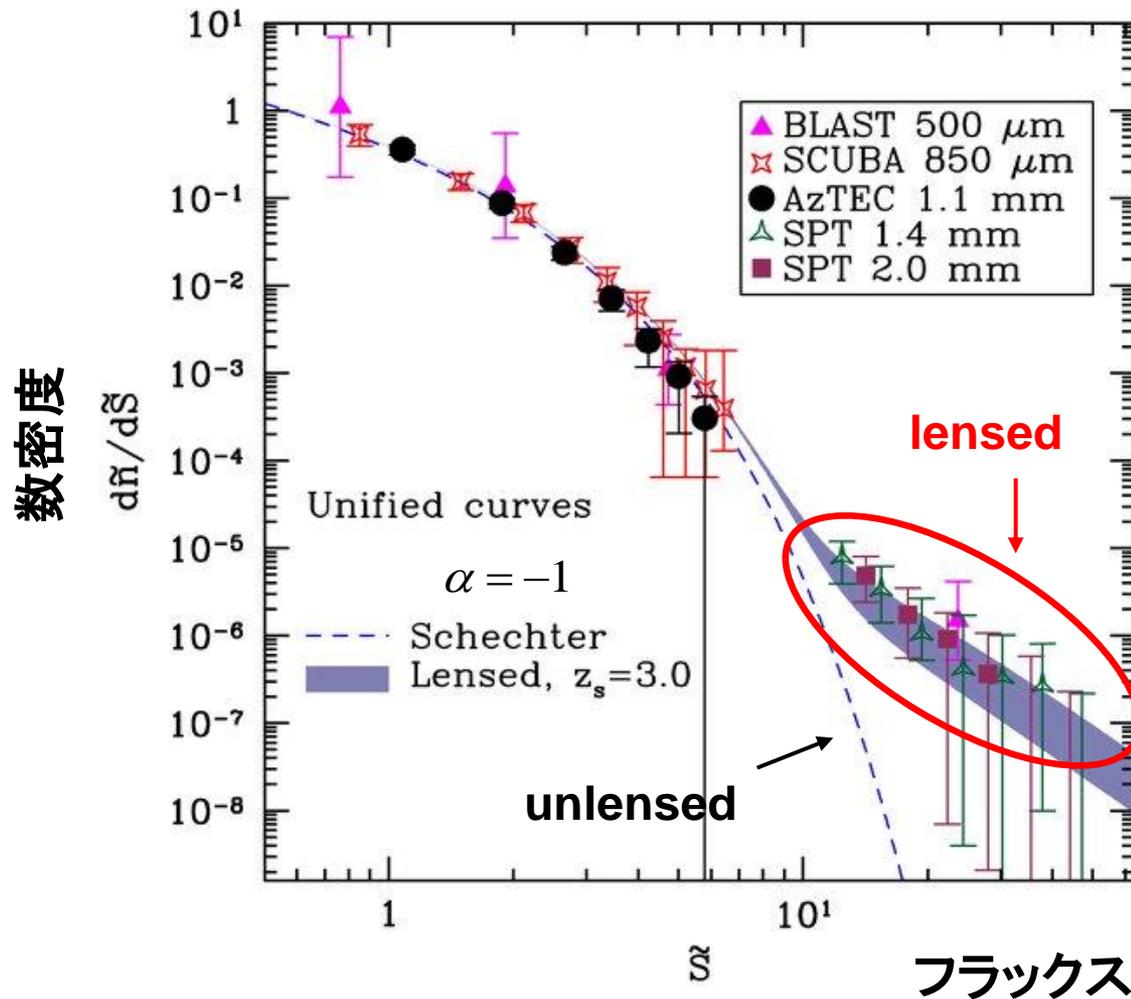
HSC deep/ultra-deep survey

TMT (thirty meter telescope)

standard candle/siren への影響

# サブミリ銀河の光度関数への影響

## ハローモデル(解析的)を用いた銀河団による重力レンズ効果



## イントロ & 動機 2

★我々は非一様宇宙を伝播する光のレイトレーシング  
シミュレーションを行う

以前 佐藤君+ (名大 2009-)

HSC cosmic shear 用 擬似カタログ  
視野  $5 \times 5 \text{ deg}^2$   $z \leq 3$

今回 より深く狭いシミュレーション

視野  $1 \times 1 \text{ deg}^2$   $z \leq 20$

★増光率 $\mu$  ← 光源の大きさ、分解能に強く依存

本研究では銀河サイズ ( $< 10 \text{ kpc}/h$ ) まで分解

# イントロ&動機 3

## ★外部資金

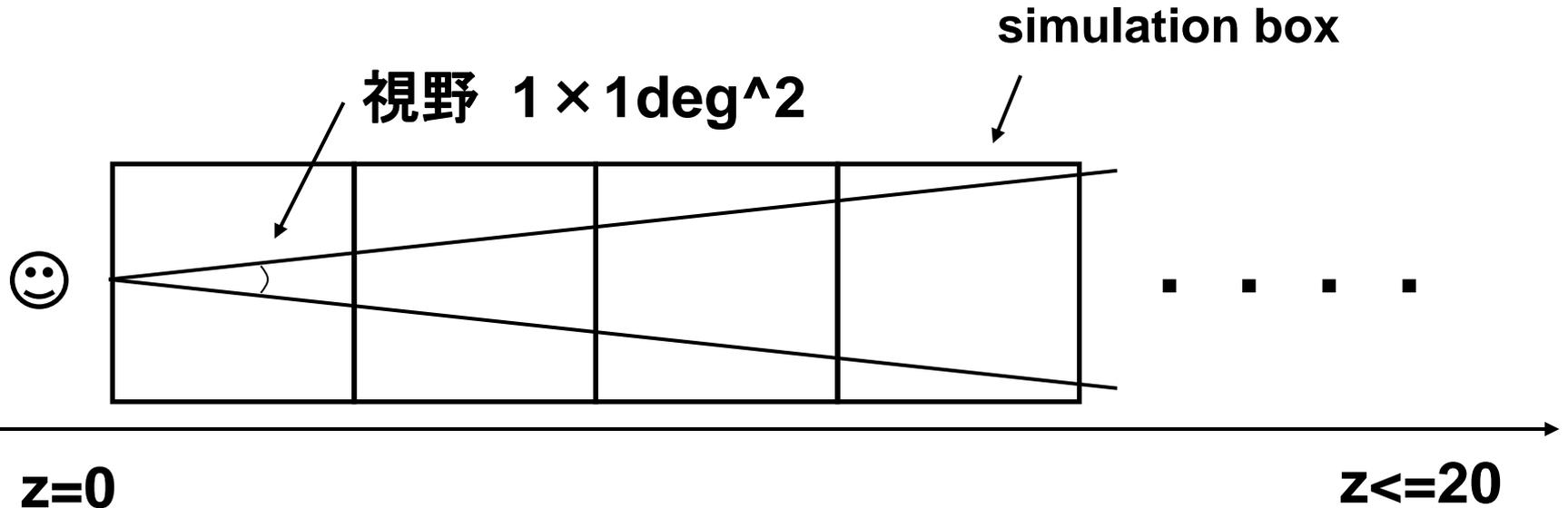
国立天文台 委託研究「HSCに向けた光のレイシューティングシミュレーション」

特定領域研究「銀河分布を用いたダークエネルギーの研究」

新学術領域研究「光のレイシューティングシミュレーションを用いた重力レンズ起源の偏光ゆらぎの見積もり」

# Ray-tracing simulation

大規模構造中を伝播する光の経路を計算



視野が狭くて深い

N-body simulation : Gadget2 (Springel)

Ray-tracing simulation : Raytrix (Hamana)

publicly available codes を使用<sup>7</sup>

# Ray-tracing simulation

We use freely publicly available codes :

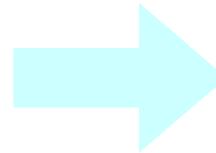
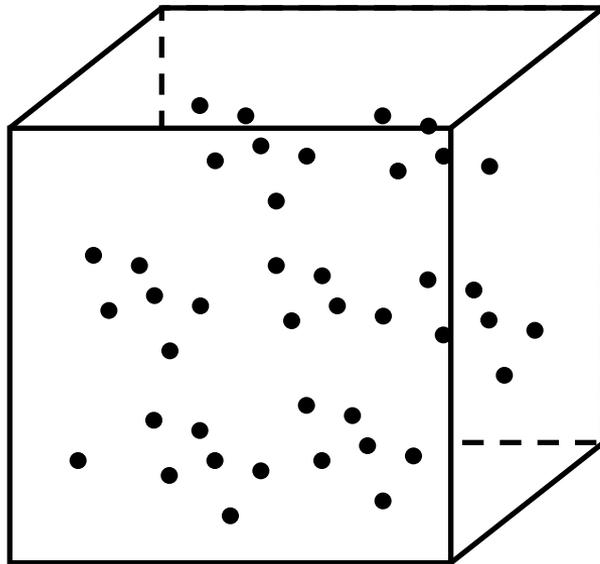
1. N-body simulation code of Gadget2 (Springel)

evaluate non-linear gravitational evolution of dark matter particles

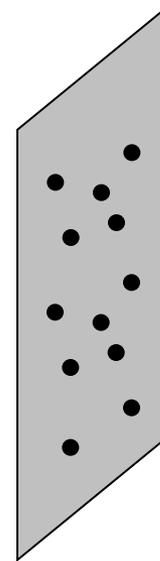
2. Ray-tracing simulation code of Raytrix (Hamana)

calculate light ray path in inhomogeneous mass distribution

**3D particle distribution is projected to 2D surface, and  
calculate the gravitational potential on the lens plane.  
(thin lens approximation)**

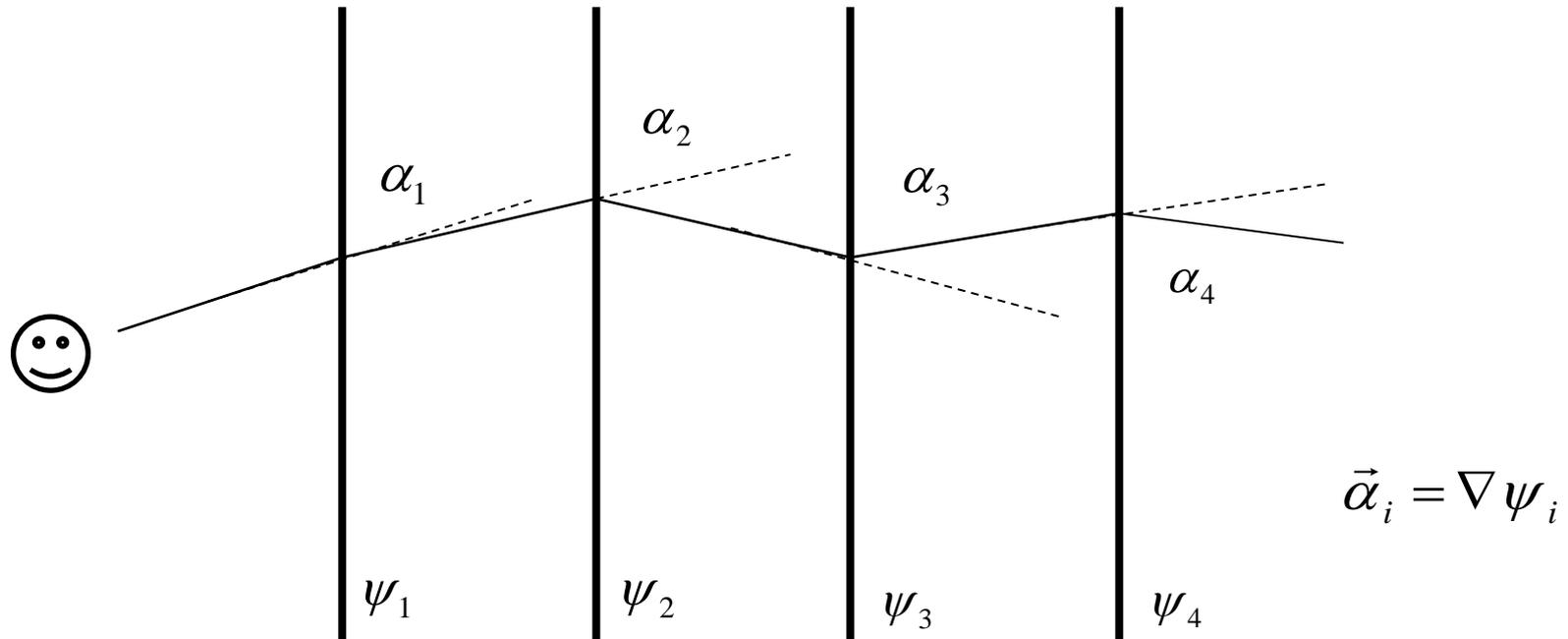


**lens plane**



$$\psi(\vec{x})$$

# Lens planes



**A light ray emitted from the observer is deflected at each lens plane**

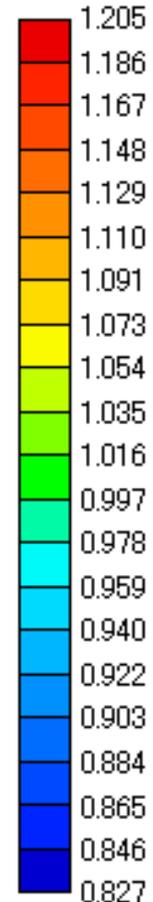
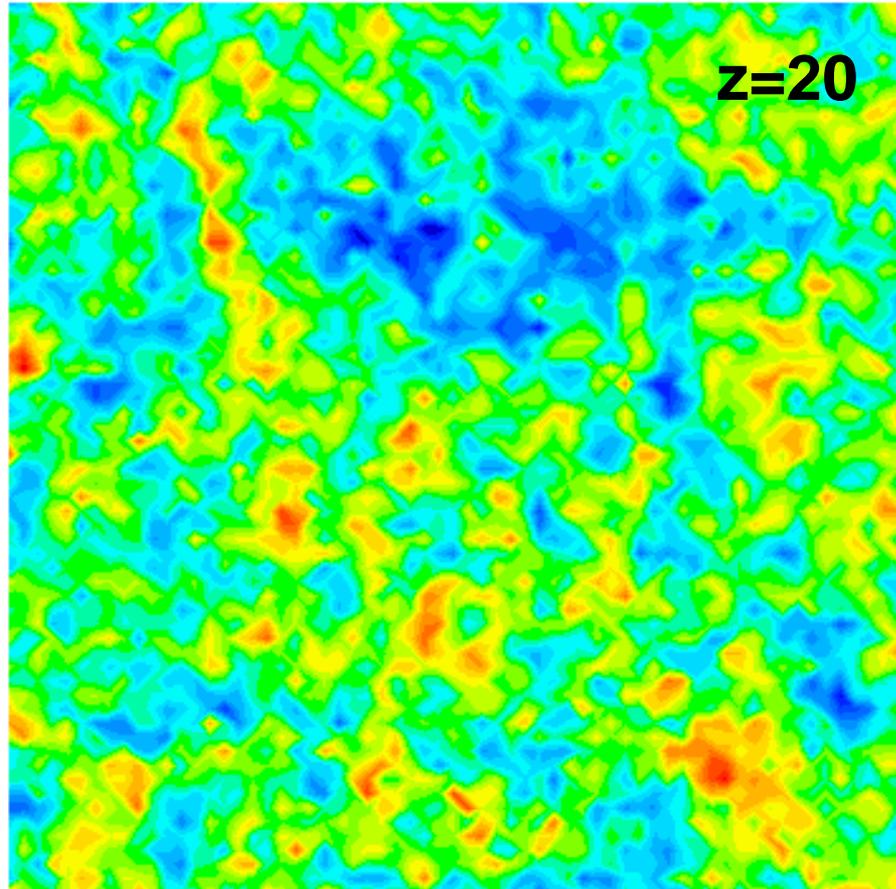
**calculate the ray path up to the source plane**

# Example 1 Contour map of convergence $\kappa$ at $z=20$

$$1 + \kappa$$

convergence  $\kappa$ :  
projected surface  
mass density

2 deg



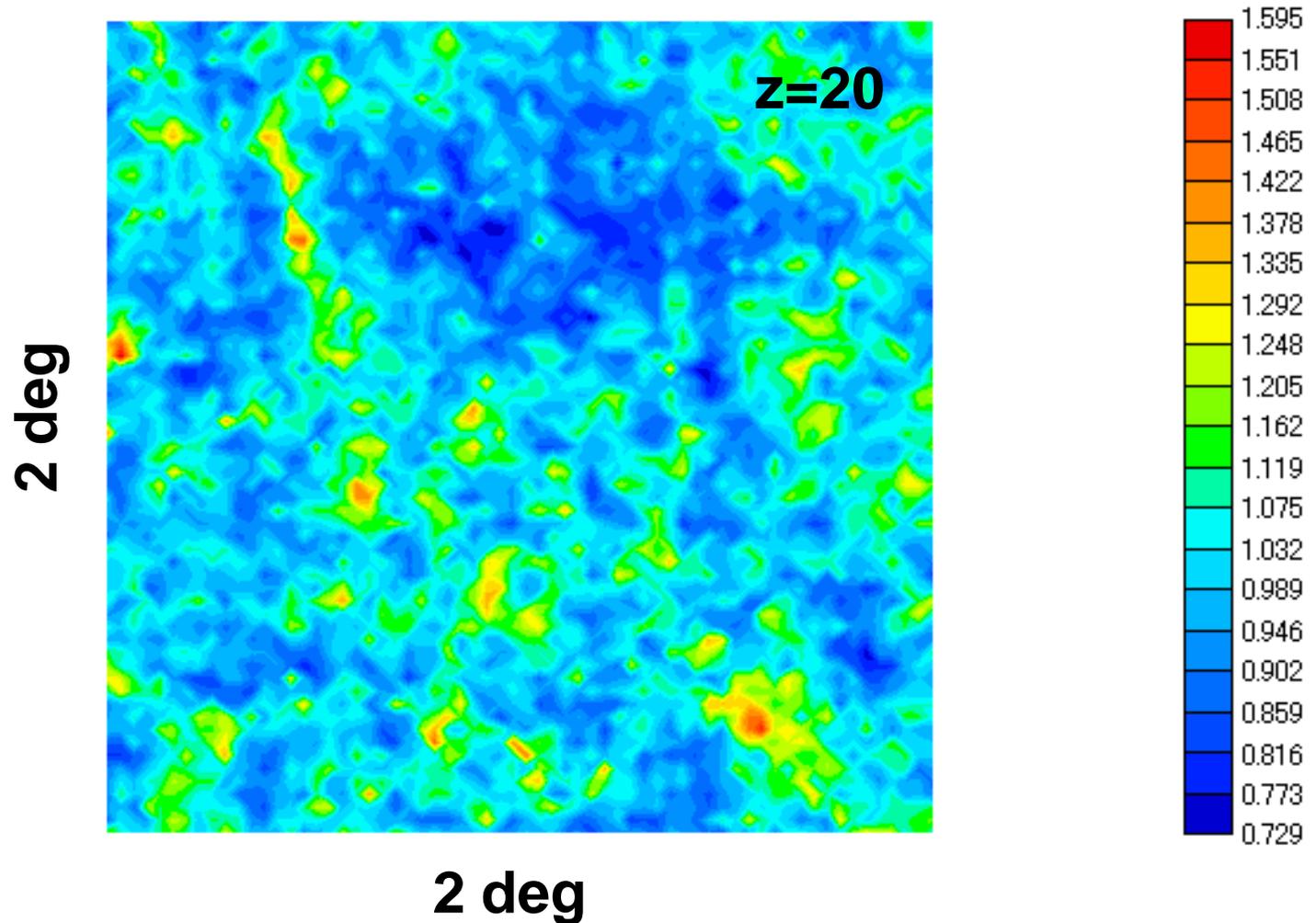
2 deg

(RT, Oguri, Hamana  
Sato, in preparation)

grid size of gravitational potential =  $0.8 \frac{\text{Mpc}}{h}$   
angular resolution = 2 arcmin

## Example 2

## Contour map of magnification at $z=20$



grid size of gravitational potential =  $0.8 \text{ Mpc}/h$   
angular resolution = 2 arcmin

# Ray-tracing simulation

3つの場合を比較 (違う realization を並べる)

分解能 & ボックス長の依存性を議論

	ボックス長	粒子数	粒子質量	ソフトニング
A.	50Mpc/h	$256^3$	$6e+8M_{\text{sun}}/h$	8kpc/h
B.	100Mpc/h	$512^3$	$6e+8M_{\text{sun}}/h$	8kpc/h
C.	50Mpc/h	$512^3$	$7e+7M_{\text{sun}}/h$	4kpc/h

A と B : 分解能は一緒 ボックス長が違う

A と C : 分解能は違う ボックス長は同じ

# Ray-tracing simulation

Raytrix ← 観測者から一様に光を飛ばす

Image plane での確率分布  $dP_I(x)/dx$

Source plane での確率分布  $dP_S(x)/dx$

$$\frac{dP_S(x)}{dx} = \frac{1}{\mu} \frac{dP_I(x)}{dx}$$

$$x = \mu, \kappa, \gamma, \dots$$

## 過去の研究：特に分解能が高いシミュレーション

### Wambsganss, Cen, Ostriker (1990s)

box size	# of particles	分解能 (PM sim.)
5Mpc/h	$250^3$	10kpc/h

多重像の確率、 $P(\mu)$ 、SNIa を使った  $q_0$  決定への影響

### Hilbert, White, Schneider, Hartlap (2000s)

#### Millennium Simulation

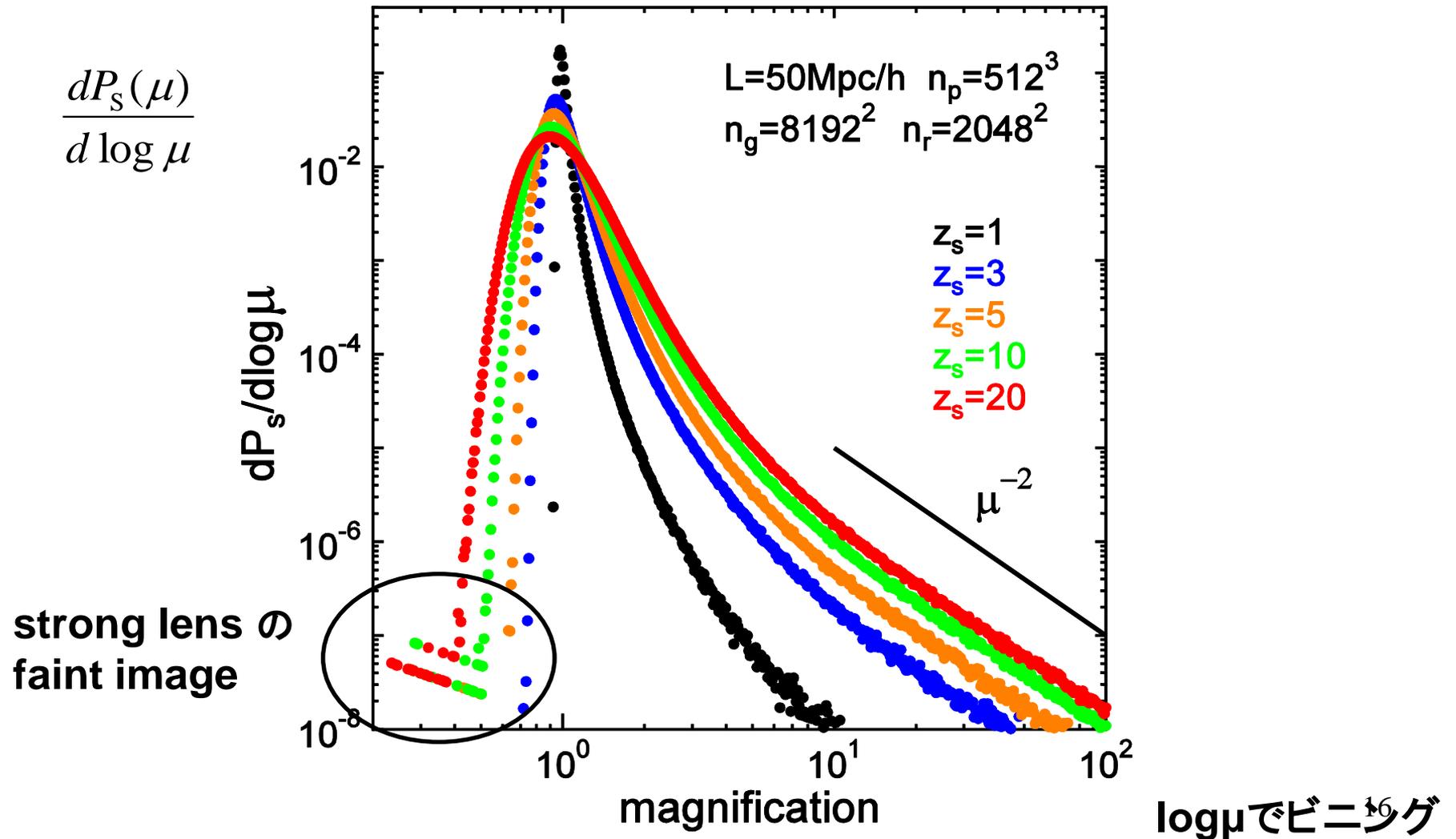
box size	# of particles	softening
500Mpc/h	$2160^3$	5kpc/h

$P(\mu)$ 、 $P(\kappa)$ 、多重像の確率、バリオン成分の影響、  
standard candle/siren に対する重力レンズ起源の分散の除去

➡ 我々はこれまでに最も高分解能 & 高赤方偏移の計算を行う

# 増光率 (magnification) の確率分布

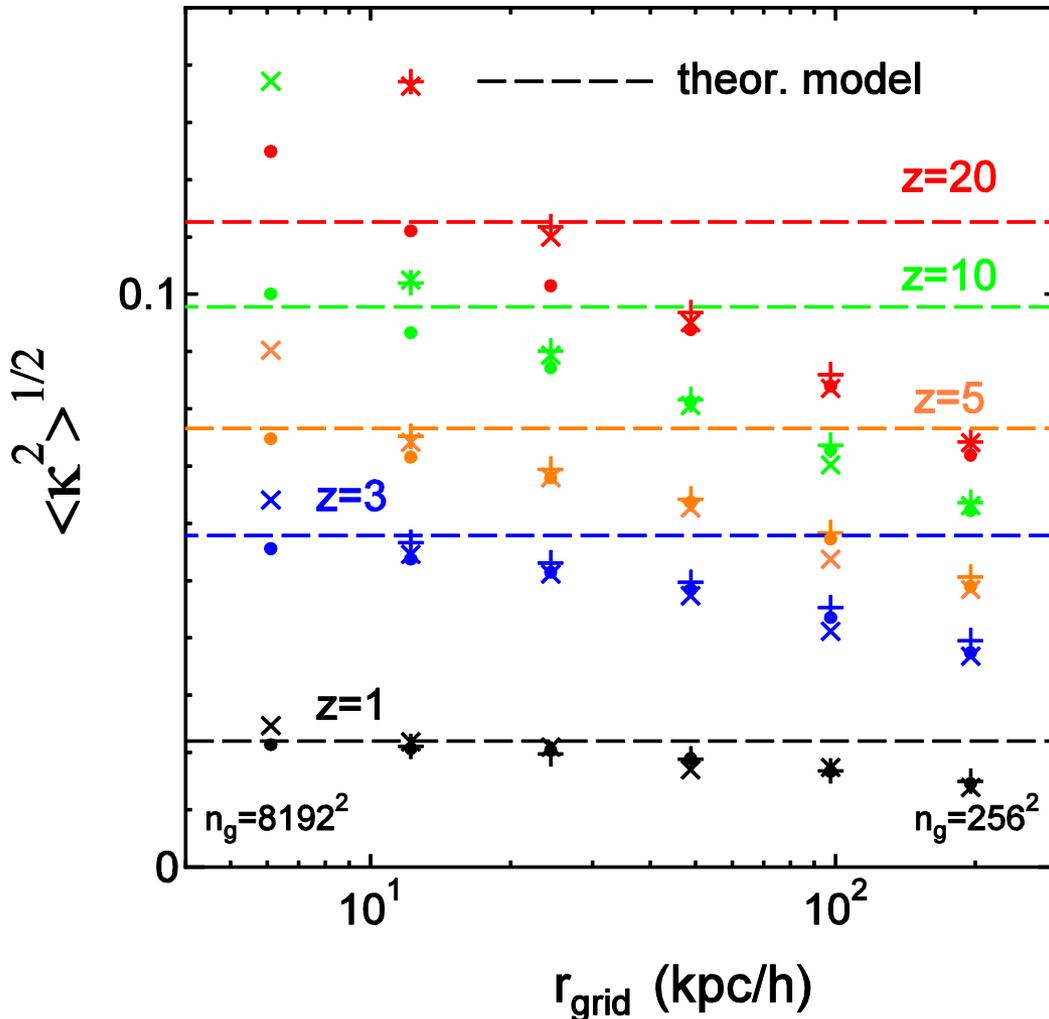
2次元grid  $n_g=8192^2 \rightarrow 6\text{kpc}/h$



# Convergence の r.m.s (root-mean-square)

- × L=50Mpc/h  $n_p=256^3$
- L=50Mpc/h  $n_p=512^3$
- + L=100Mpc/h  $n_p=512^3$        $n_r=1024^2$

- : high resolution
- × + : low resolution



low resolution では shot noise が効いてる

ボックスサイズの影響なし

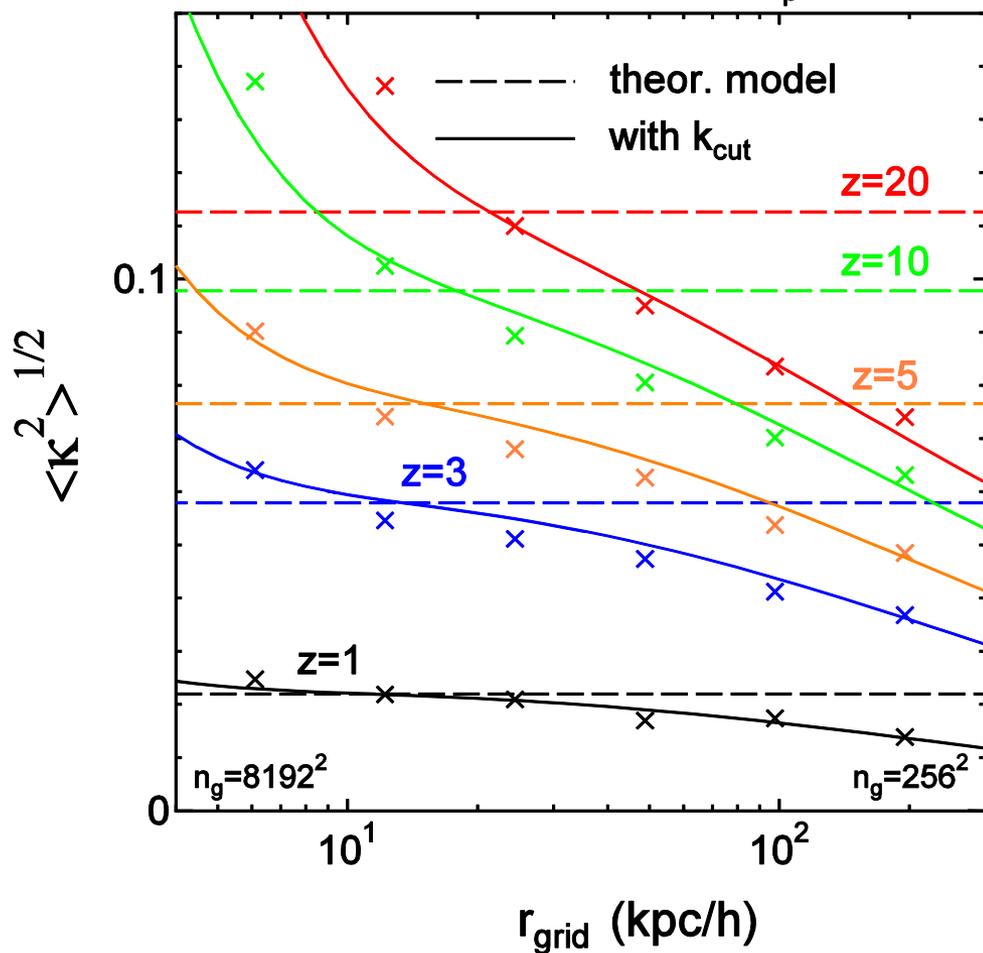
2次元重力ポテンシャルのグリッド

$$r_{\text{grid}} = 50 \text{ Mpc/h} / n_g$$

# 分解能を考慮 下図の実線

$$\langle \kappa^2 \rangle = \frac{9}{8\pi} H_0^4 \Omega_m^2 \int \frac{dz}{H(z)} (1+z)^2 \left[ \frac{r(z) r(z, z_s)}{r(z_s)} \right]^2 \int dk k \left[ P(k) + \frac{1}{n} \right] e^{-\underline{\underline{(k/k_{cut})^2}}}$$

× L=50Mpc/h n<sub>p</sub>=256<sup>3</sup>



波数積分にカットオフ  
(Gaussian smoothing)

$$k_{\text{cut}} = \alpha \frac{2\pi}{r_{\text{grid}}}$$

$$\alpha \approx 0.2$$

## 光度関数への影響

$$L_{\text{obs}} = \mu L$$

$$\begin{aligned}\Phi_{\text{obs}}(L_{\text{obs}})dL_{\text{obs}} &= \Phi(L)dL \\ &= \frac{1}{\mu} \Phi(L_{\text{obs}}/\mu) dL_{\text{obs}}\end{aligned}$$

$$\Phi_{\text{obs}}(L_{\text{obs}}) = \int d\mu \frac{1}{\mu} \frac{dP_s(\mu)}{d\mu} \Phi(L_{\text{obs}}/\mu)$$

---

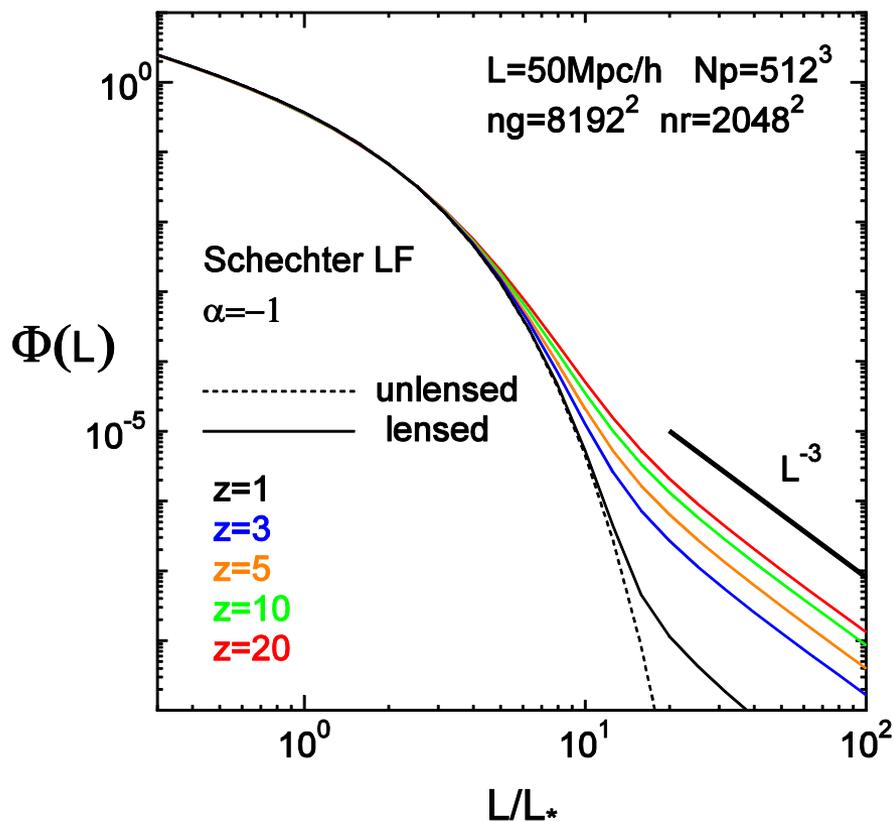
**Schechter function**  $\Phi(L) \propto L^\alpha \exp(-L/L_*)$

# Schechter Luminosity Function

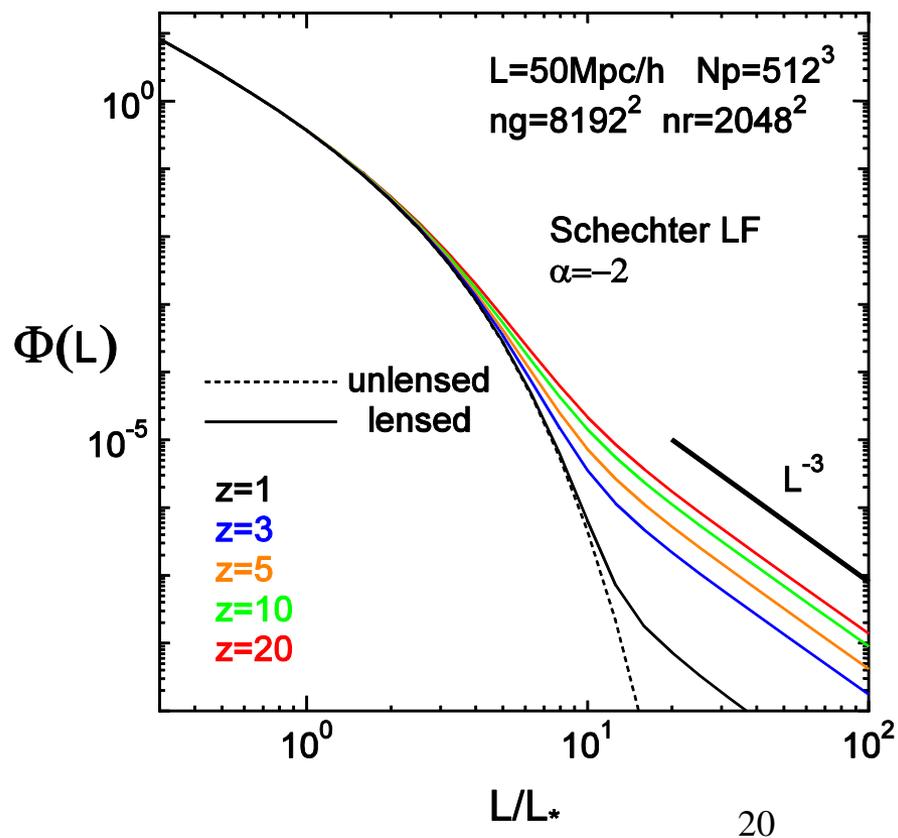
$$\Phi(L) = \Phi_* \left( L/L_* \right)^\alpha e^{-L/L_*} \xrightarrow{\text{lens}} \propto L^{-3} \text{ for } L \gg L_*$$

**independent of  $\alpha$**

$\alpha = -1$

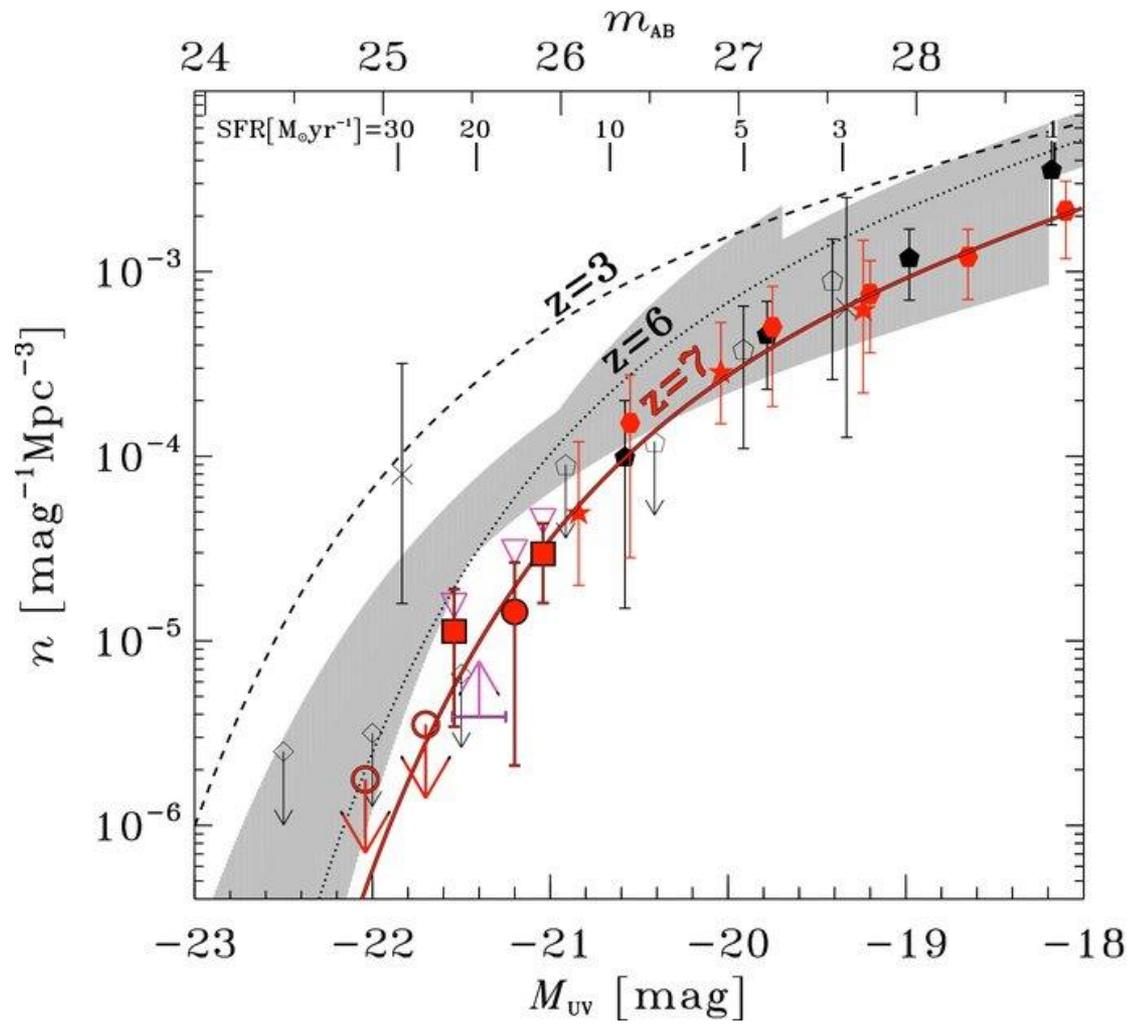


$\alpha = -2$



# UV luminosity function of z-dropout galaxies

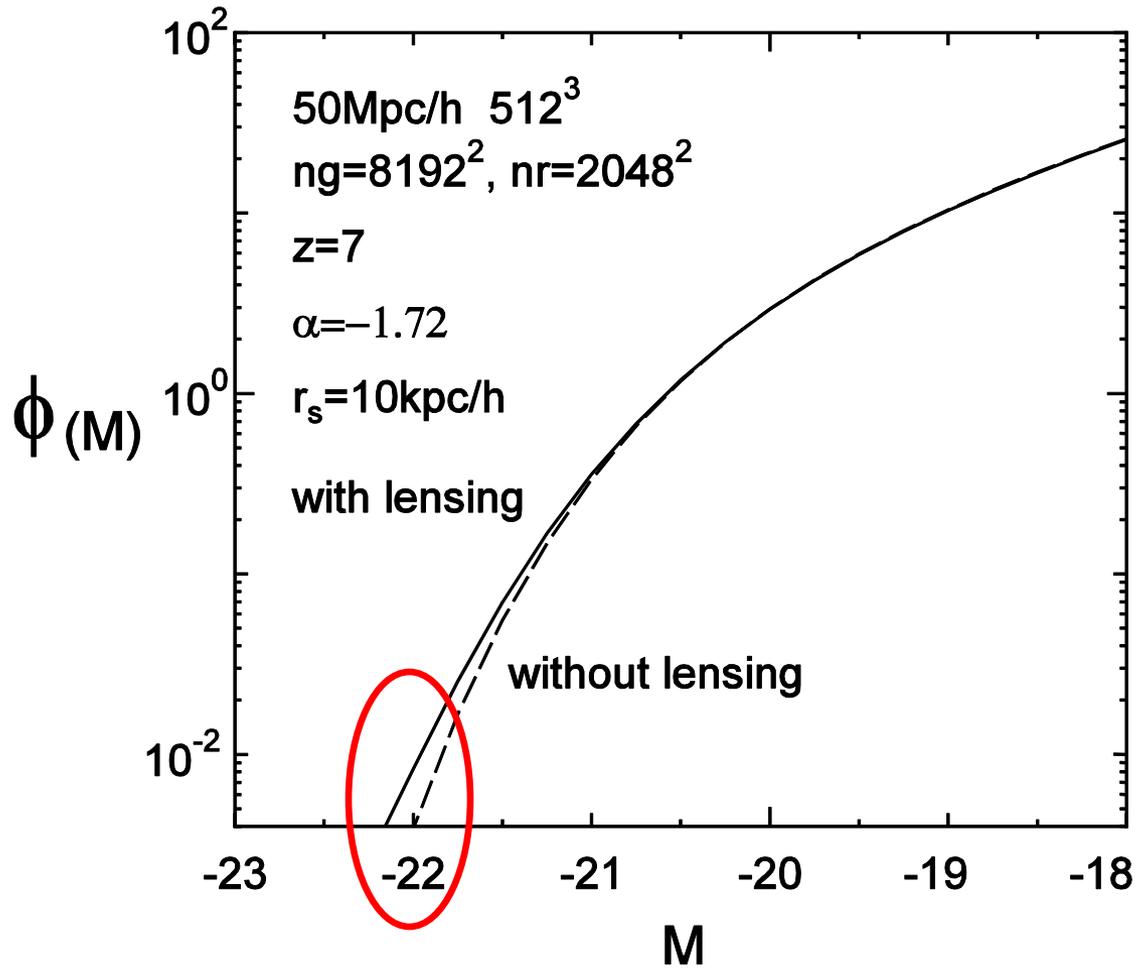
(Ouchi+ 2009)



Schechter func.

$$\alpha = -1.72$$

$$M^* = -20.1$$



**factor 2 倍違う**

## まとめ

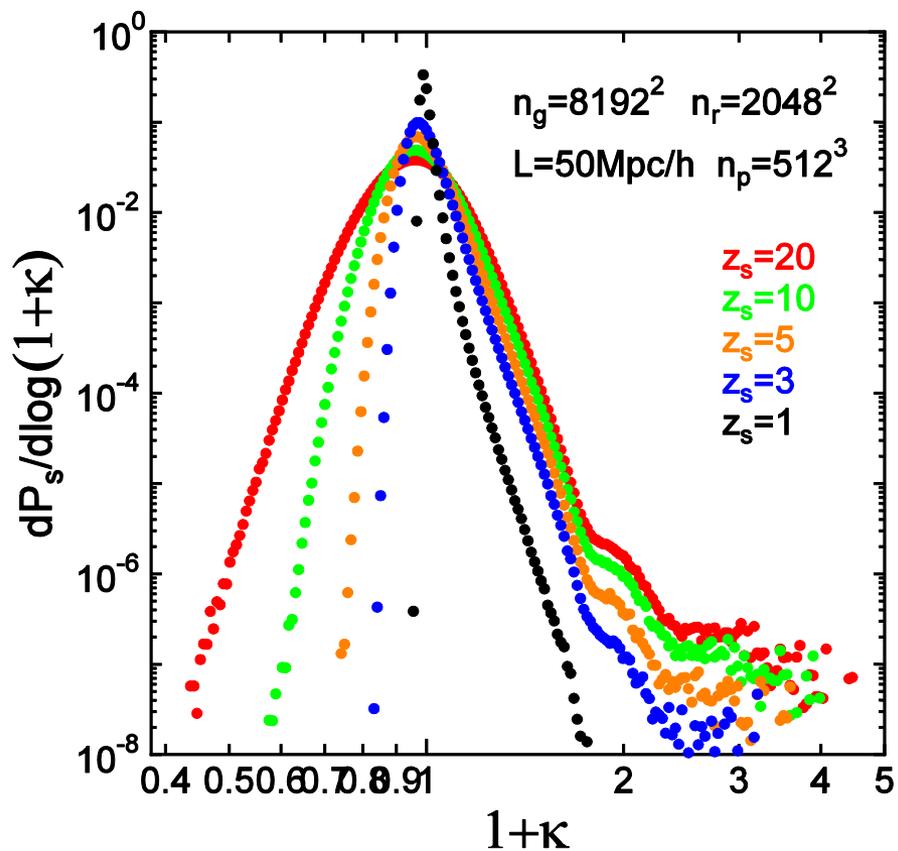
★光の Ray-tracing simulation を用いて  
増光率 (magnification) の確率分布を得た

これまでで最高の分解能 (銀河スケール a few kpc)  
これまでで最遠の光源 ( $z \leq 20$ )

★magnification, convergence, shear の確率分布は  
いずれ web 公開

★バリオン効果加わるので、我々の計算結果は下限

## convergence の確率分布



## shear の確率分布

