

Precise measurement  
of number-count distribution function  
of SDSS galaxies

福永健介

東京大学理学系研究科物理学専攻

宇宙理論研究室

博士1年

# 宇宙の大規模構造研究の意義

## 理論

- 質量全体[暗黒物質(CDM)+バリオン]の密度揺らぎ

$$\delta(\vec{x}, t) = \frac{\rho(\vec{x}, t) - \bar{\rho}(t)}{\bar{\rho}(t)}$$

## 観測

- 銀河の数密度揺らぎ(赤方偏移サーベイ)

$$\delta_g(\vec{x}, t) \equiv \frac{n_g(\vec{x}, t) - \bar{n}_g}{\bar{n}_g}$$

- 密度揺らぎの統計量

1点統計

2点相関関数

パワースペクトル

高次統計

理論と観測の比較からCDMモデルを検証

# 宇宙の大規模構造の形成過程

インフレーションが  
原始揺らぎを形成



重力非線形進化



現在の質量密度揺らぎ  
(宇宙の大規模構造)

ほぼGauss統計に従う



非線形領域では  
Gauss分布から  
かなりズレている

# 密度揺らぎの1点統計

- Gauss統計からのズレを表す指標:  $S_3 \equiv \frac{\langle \delta^3 \rangle}{\langle \delta^2 \rangle^2}$ ,  $S_4 \equiv \frac{\langle \delta^4 \rangle - 3\langle \delta^2 \rangle^2}{\langle \delta^2 \rangle^3}$   
skewness(歪度)                      kurtosis(尖度)

- 密度揺らぎの確率分布関数:  $P(\delta)$                       ある1点の座標の密度揺らぎが  
(Probability Distribution Function; PDF)                       $\delta$ である確率の分布関数

$S_3$ や $S_4$ だけでなく任意の高次モーメントを含む

+

1点統計であるので、

より広く調べられている2点統計やそれ以上の高次統計量

と相補的に情報を提供

理論、N体シミュレーション、観測の観点から幅広く調べられてきた

本研究では観測的に銀河のPDFを測定

$\delta^{\text{primordial}}$

↓ 重力非線形進化

$\delta^r$  (CDM:実)



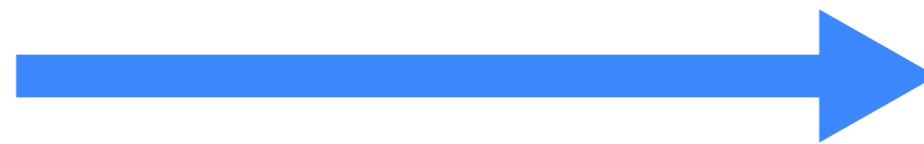
$\delta^s$  (CDM:赤)

赤方偏移歪み



銀河バイアス

$\delta_g^r$  (銀河:実)



$\delta_g^s$  (銀河:赤)

# 銀河バイアス

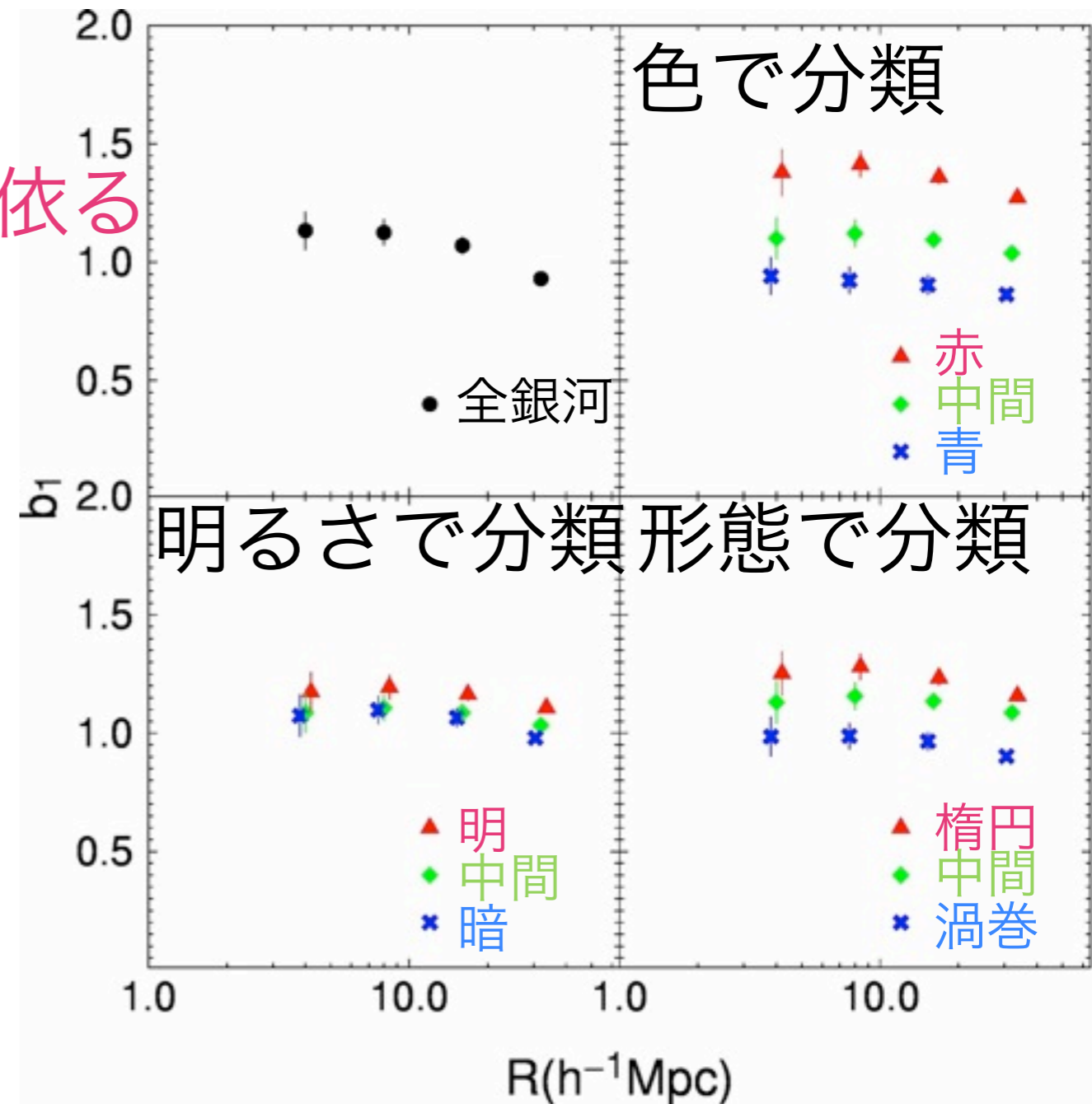
銀河はダークマターのトレーサーにすぎない  $\delta_g \neq \delta$

線形バイアス  $\delta_g = b_1 \delta$

線形バイアスは銀河のタイプに依る

当然本当はもっと複雑

- 非局所性
- 確率論的
- 非線形性

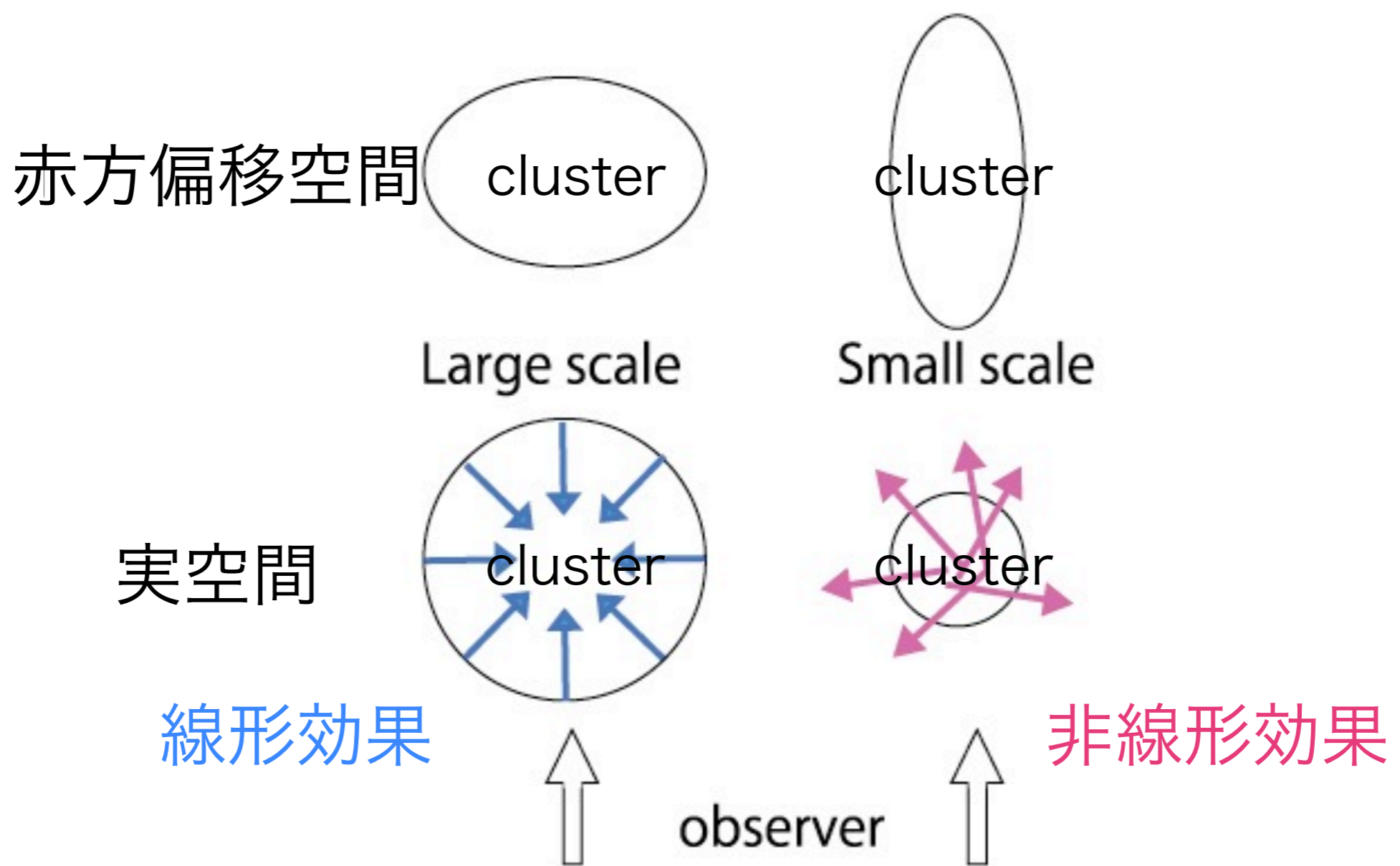


# 赤方偏移歪み

銀河の特異速度の影響で、分光観測される銀河の赤方偏移が見かけ上ずれる効果

Kaiser効果

Finger-of-God効果



# 先行研究と本研究の目的

- CDMのPDFは近似的にLNに従うことが知られている (eg.Coles & Jones 1991, Kayo et al. 2001)
- 最近、SDSS銀河のPDFがGQEDやNBDとよく一致することが指摘された(Yang & Saslaw 2010)

観測される銀河のPDFはどのようなものか？

CDMのPDFとどう違うのか？

1. 観測から銀河のPDFを精度よく求め、結果を経験的なモデルと比較する
2. 重力非線形進化、赤方偏移歪み、銀河バイアスの影響を考慮して構築したモデルと実際の銀河のPDFを比較する



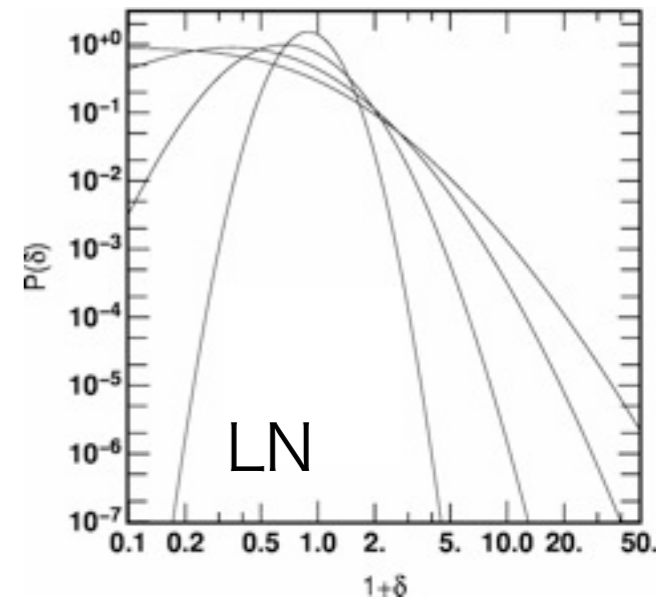
# 経験的モデル

## 1. Log-Normal function (LN)

変数の対数が正規分布する場合、その変数の従う分布  
初期速度場が正規分布ならば、密度揺らぎはLN

(Coles & Jones 1991)

\*以下では離散性の影響を取り入れて比較

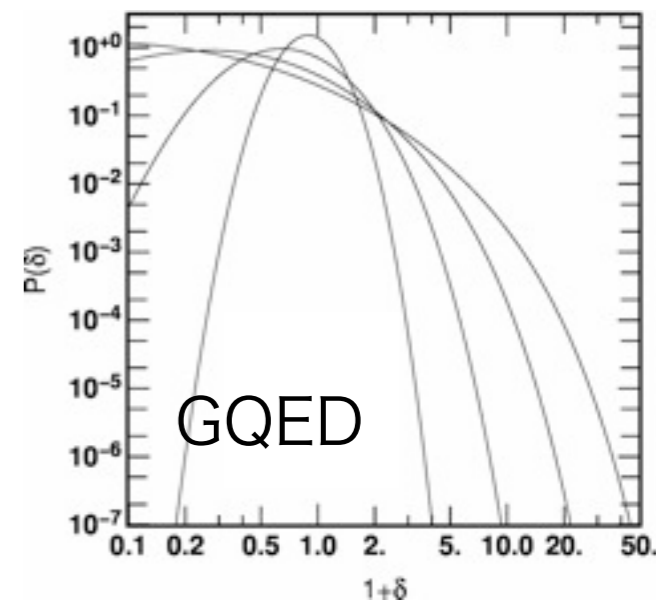


## 2. Gravitational Quasi Equilibrium Distribution (GQED)

熱力学・統計力学的視点から導出されたモデル

(Saslaw & Hamilton 1984)

仮定：銀河のクラスタリングは準平衡状態  
を通じて時間発展する

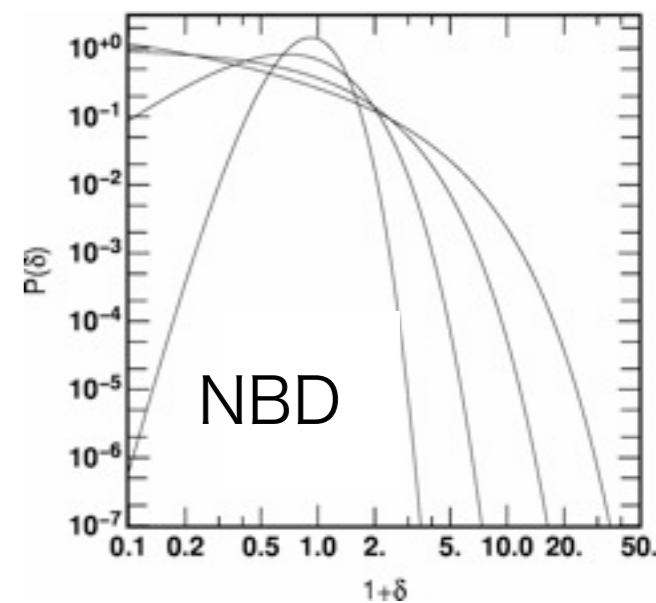


## 3. Negative Binomial Distribution (NBD)

多数の箱に銀河を重力を考え、1つずつ  
詰めていくプロセスを記述するモデル

(Elizalde & Gaztanaga 1992;

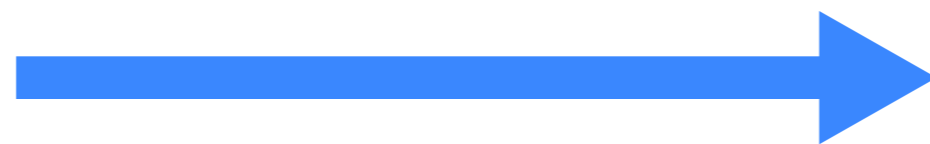
Gaztanaga & Yokoyama 1993)



$\delta^{\text{primordial}}$

↓ 重力非線形進化

$\delta^r$  (CDM:実)



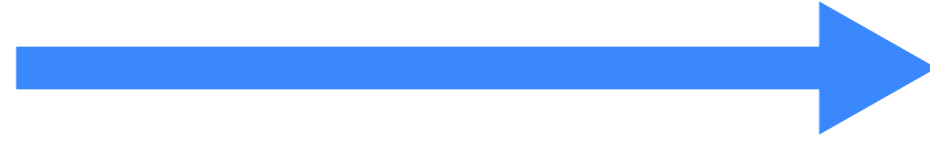
$\delta^s$  (CDM:赤)

赤方偏移歪み



銀河バイアス

$\delta_g^r$  (銀河:実)



LN?  
GQED?  
NBD?

$\delta_g^s$  (銀河:赤)

# SDSS銀河サンプル

## Sloan Digital Sky Survey (SDSS) Data Release 7

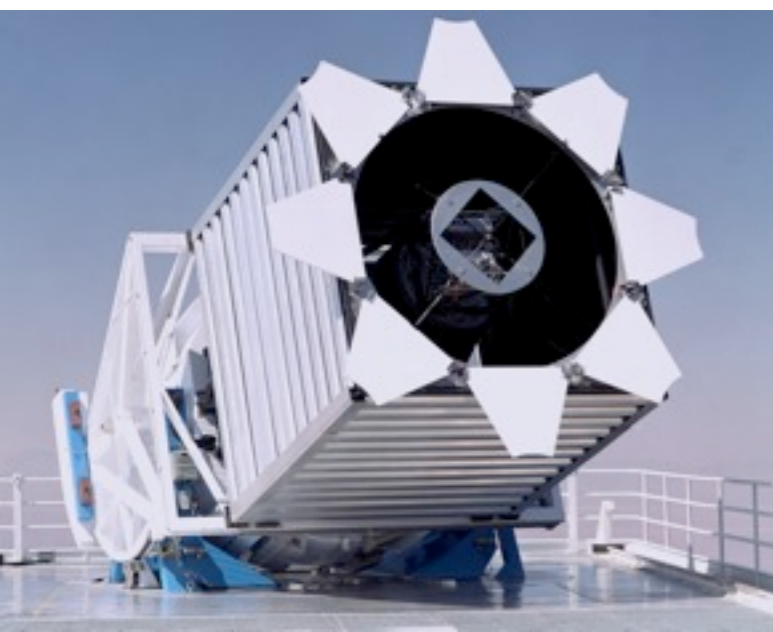
- 2008年に観測の終了した

赤方偏移サーベイ

(3次元的な宇宙の大構造を調べる観測)

- 約93万個の銀河を観測した

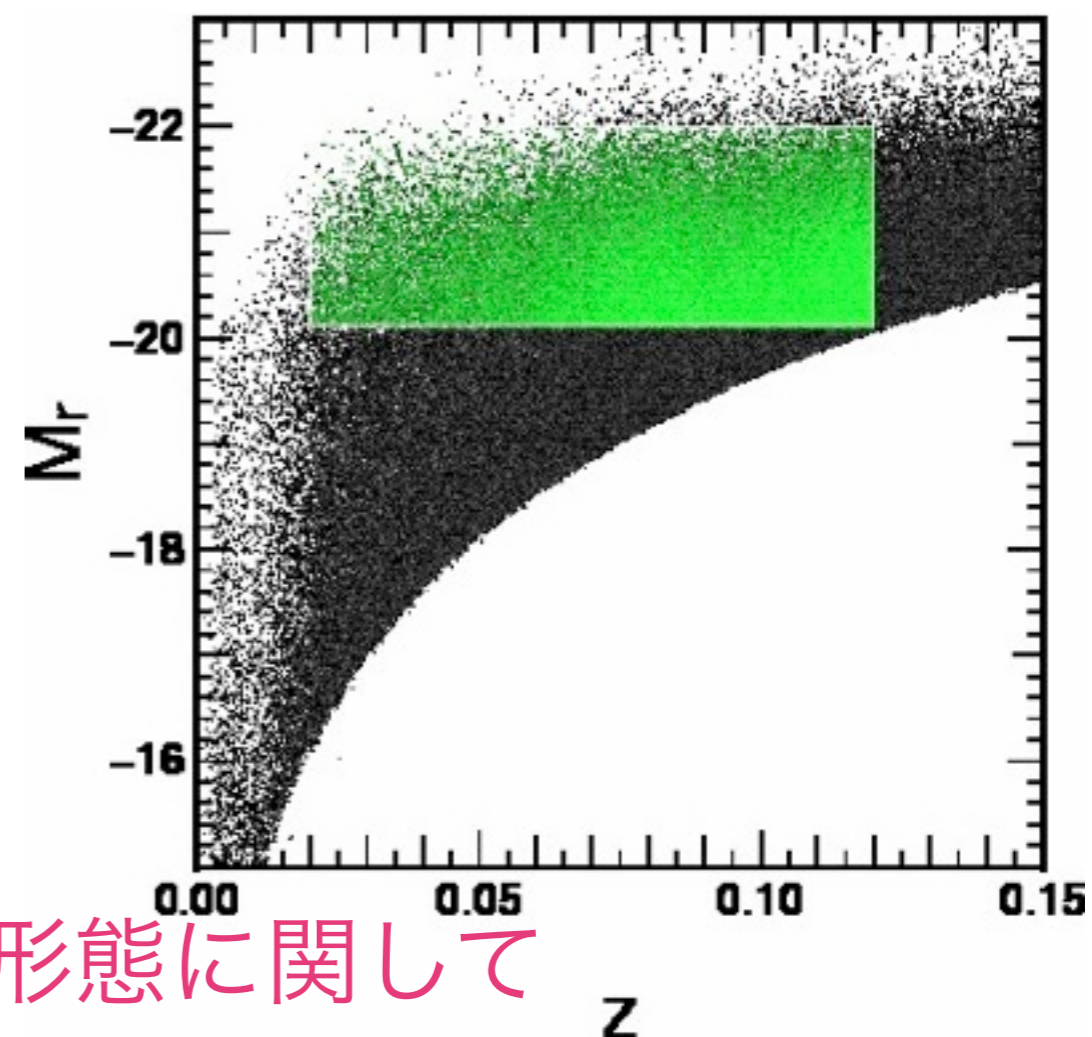
現在最大の赤方偏移カタログ



<http://www.sdss.org>

分光銀河:593,514

今回使う銀河:146,888  
(volume-limitedサンプル)

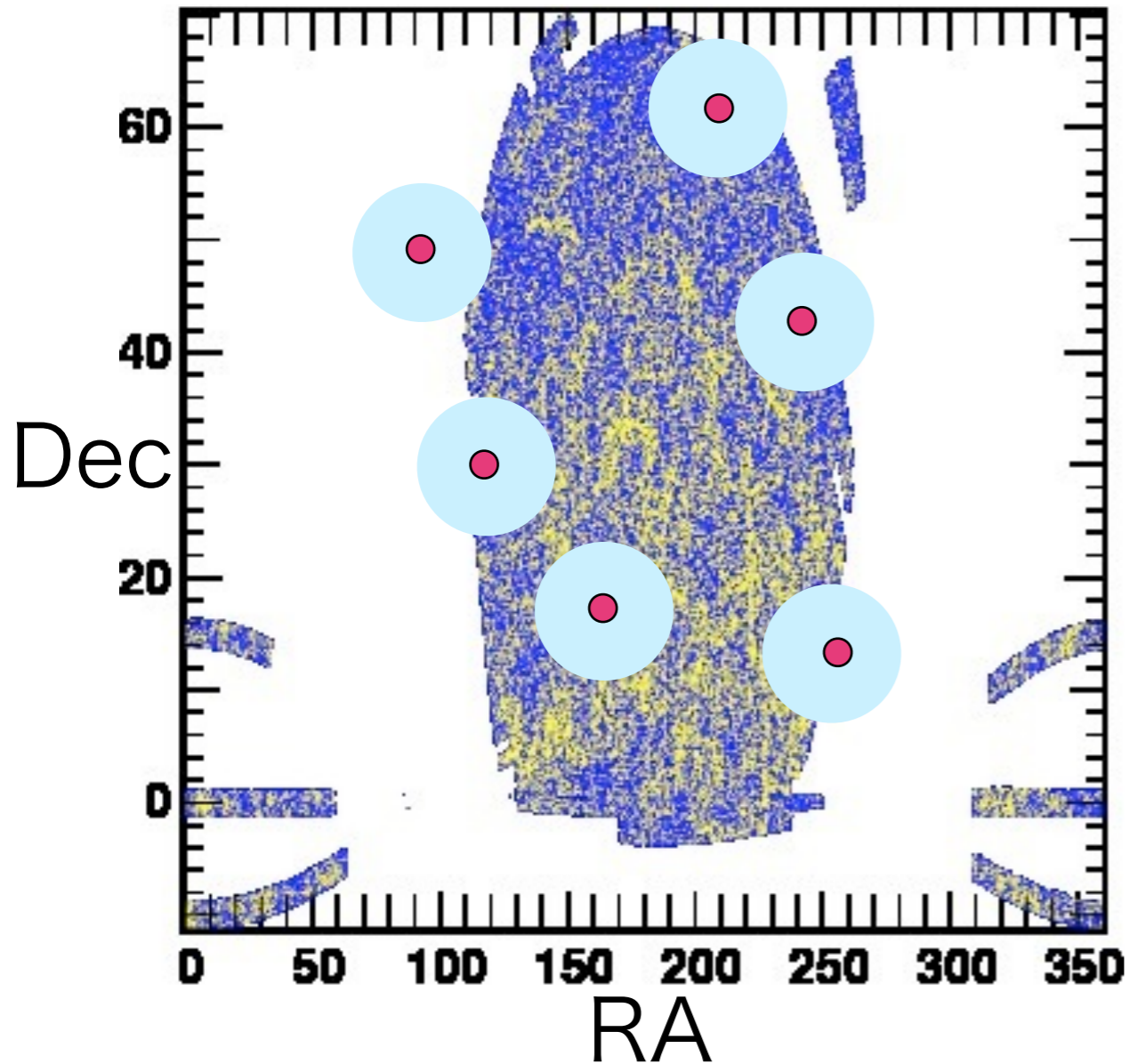


色・光度・形態に関して  
subsampleを作成

# カウントインセル解析

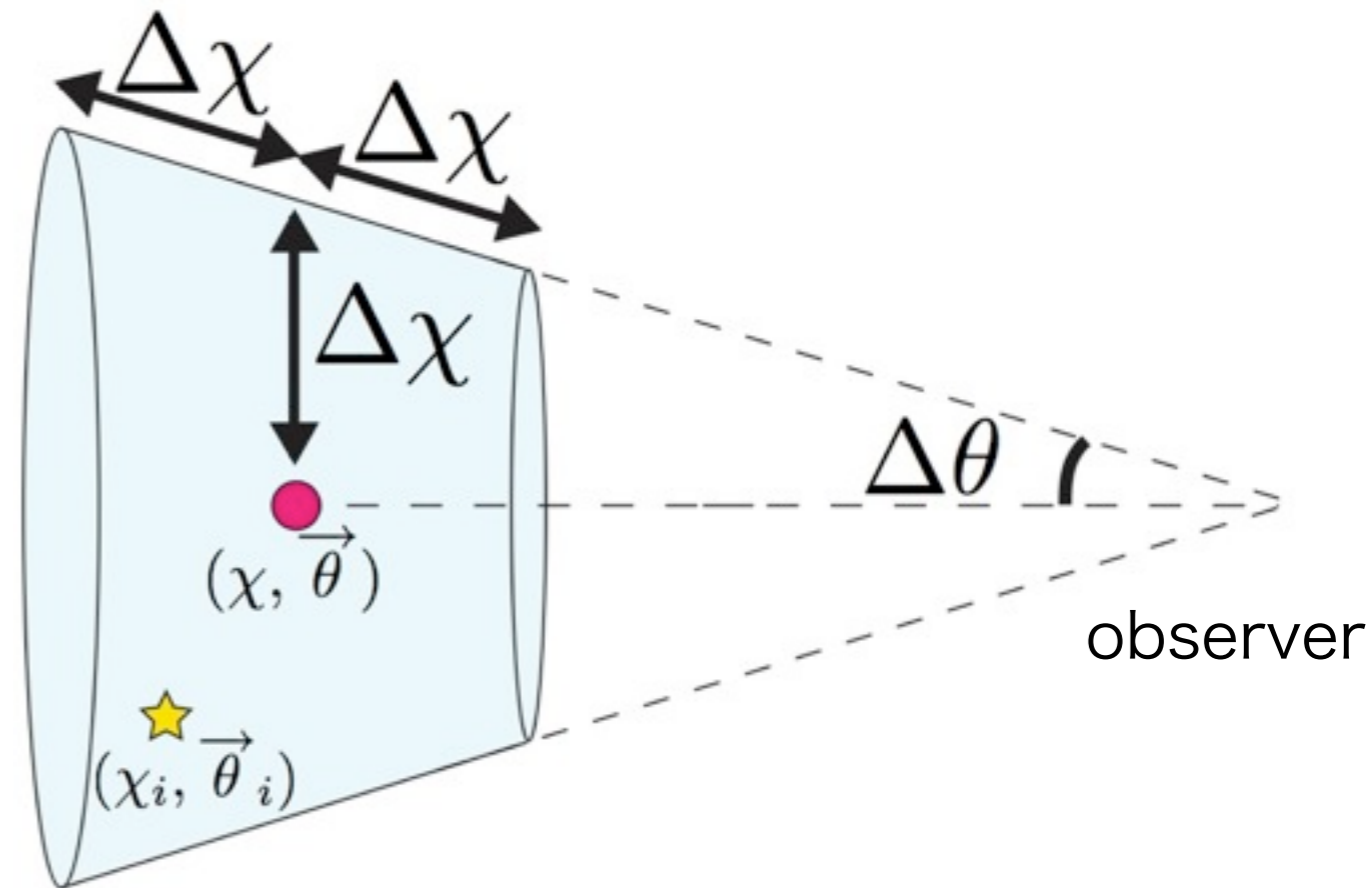
blue:サーベイ領域

yellow:銀河



use:completeness>0.8

#cell=100,000



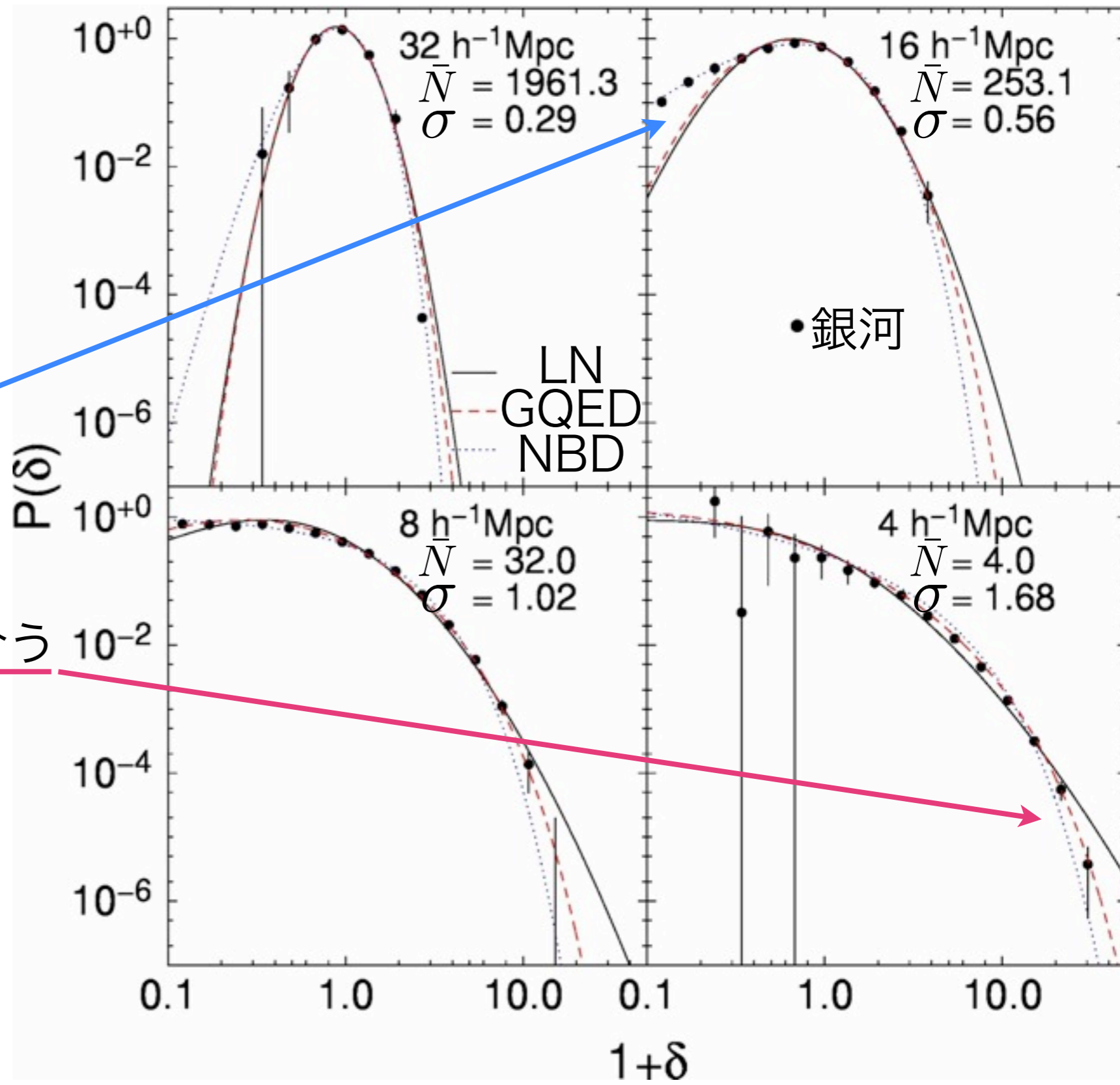
セルの大きさを4通りに変えて

PDFを測定

# 結果：銀河のPDFvs経験的モデル

- NBDがよく合う  
( $16h^{-1}\text{Mpc}$ )

- GQEDやNBDがよく合う  
( $4, 8h^{-1}\text{Mpc}$ )



$\delta^{\text{primordial}}$

N体計算 ↓ 重力非線形進化

$\delta^r_{\text{(CDM:実)}}$



$\delta^s_{\text{(CDM:赤)}}$

赤方偏移歪み



銀河バイアス



$\delta_g^r_{\text{(銀河:実)}}$



$\delta_g^s_{\text{(銀河:赤)}}$

$\delta^{\text{primordial}}$

↓ 重力非線形進化

$\delta^r_{\text{(CDM:実)}}$

N体計算



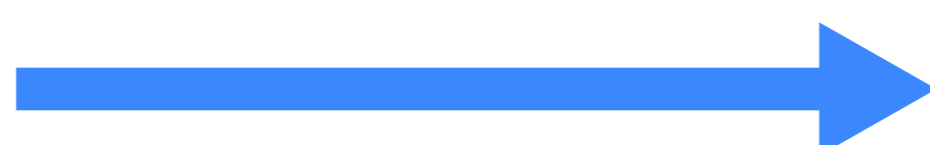
$\delta^s_{\text{(CDM:赤)}}$

赤方偏移歪み



銀河バイアス

$\delta^r_g_{\text{(銀河:実)}}$



$\delta^s_g_{\text{(銀河:赤)}}$

# CDMのPDF@実空間

Box Size=(250Mpc/h)<sup>3</sup>

128<sup>3</sup> particles

(Nishimichi et al. 2009)

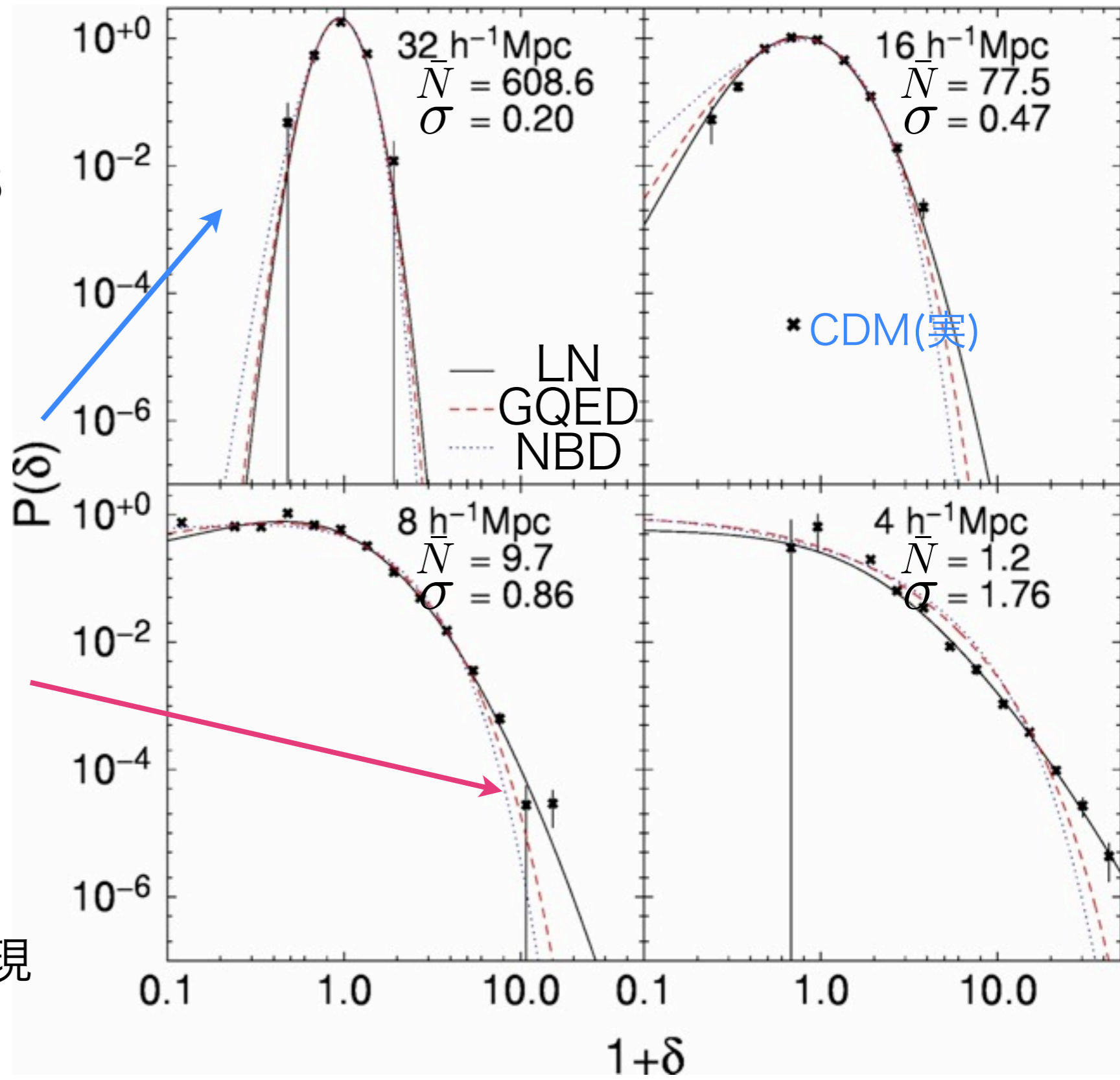
銀河の場合と等体積の  
立方体型のセルを使用

LNがやはり最も良く合う



重力の非線形性を最もよく再現

(e.g;Kayo et al. 2001)



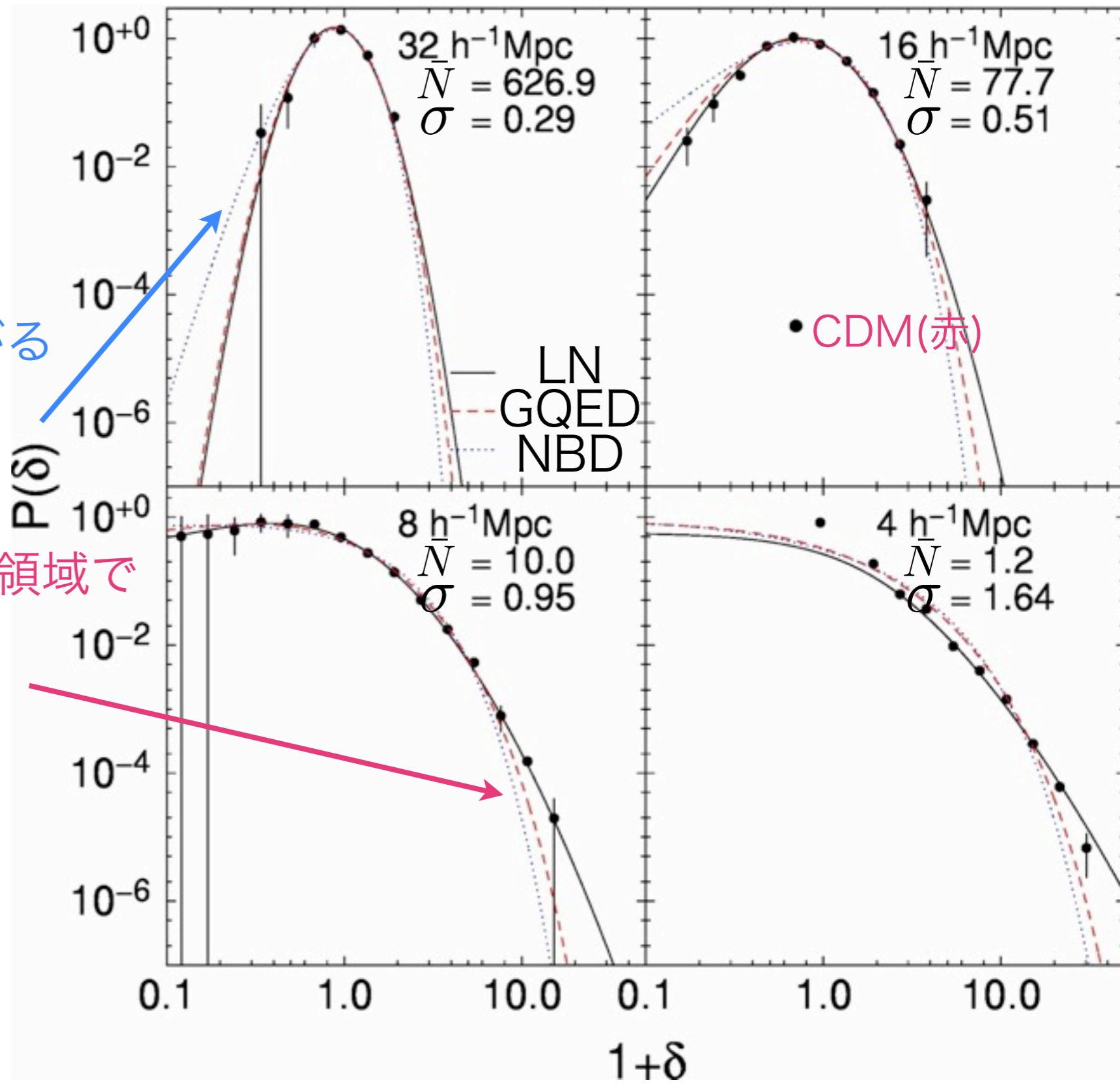


# CDMのPDF@赤方偏移空間

- Kaiser効果で分布が広がる  
(大スケール)

- Finger-of-Godで高密度領域で  
PDFが小さくなる  
(小スケール)

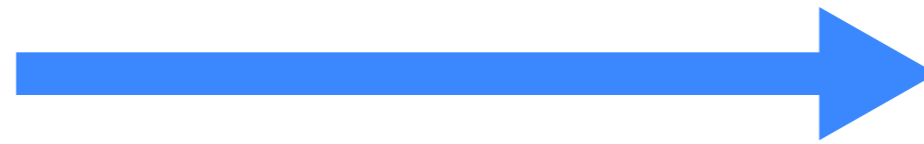
- 小スケール高密度では  
LNが最も良く合う



$\delta^{\text{primordial}}$

↓ 重力非線形進化

$\delta^r$  (CDM:実)



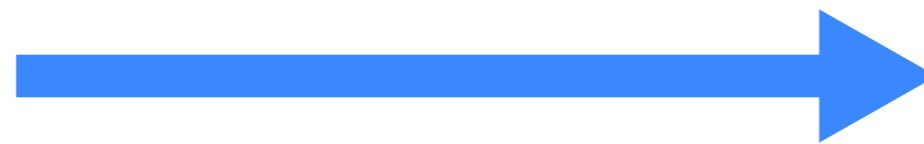
$\delta^s$  (CDM:赤)

赤方偏移歪み



銀河バイアス

$\delta_g^r$  (銀河:実)



非線形バイアス  
モデル(摂動論)

$\delta_g^s$  (銀河:赤)

# 摂動論による非線形バイアスモデル

$$\text{仮定: } \delta_g^s = b_1 \delta^s + \frac{b_2}{2} [(\delta^s)^2 - \sigma^2] + \frac{b_3}{6} [(\delta^s)^3 - S_3 \sigma^4]$$

$$\text{確率の保存: } P_g^{\text{pert}}(\delta_g^s) d\delta_g^s = P(\delta^s) d\delta^s$$

$$\text{摂動論的關係式: } S_{g,3} = \frac{S_3 + 3b_2/b_1}{b_1}$$

$$S_{g,4} = \frac{S_4 + 12b_2/b_1 S_3 + 4b_3/b_1 + 12(b_2/b_1)^2}{b_1^2}$$

(Fry & Gaztanaga 1993)

銀河とCDMの

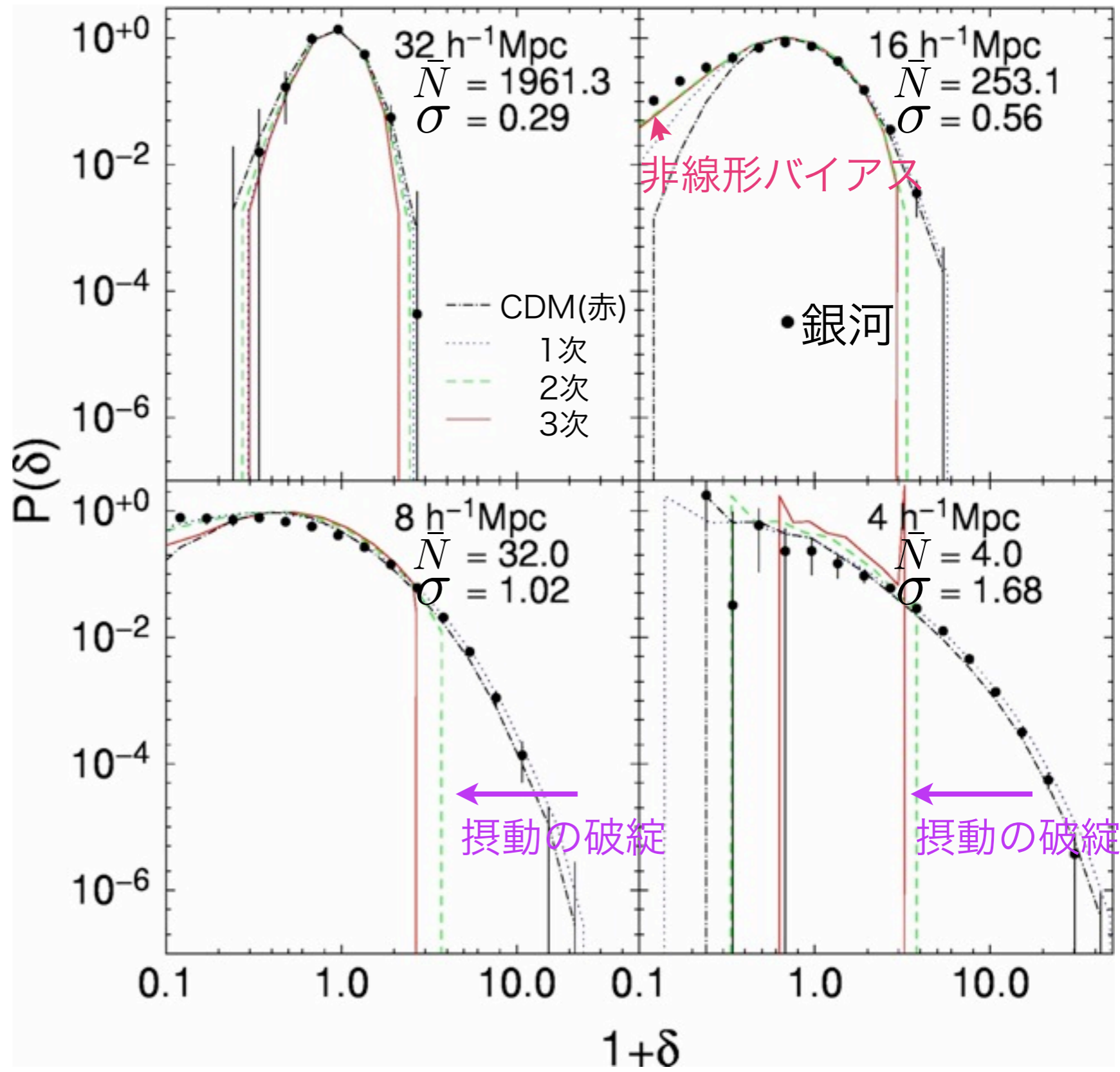
skewnessとkurtosisを測定

→ 銀河のPDFのモデリング

# 素過程を考慮したモデルvs銀河のPDF

-1 <  $\delta_g^s$  < 1の範囲では、  
非線形バイアスで、  
2次までの摂動論で  
銀河のPDFの振る舞い  
を説明できる！

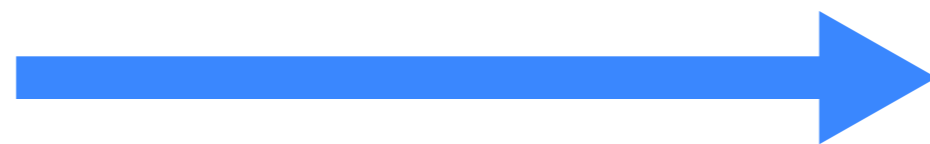
$$b_2 < 0$$



$\delta^{\text{primordial}}$

↓ 重力非線形進化

$\delta^r$  (CDM:実)



$\delta^s$  (CDM:赤)

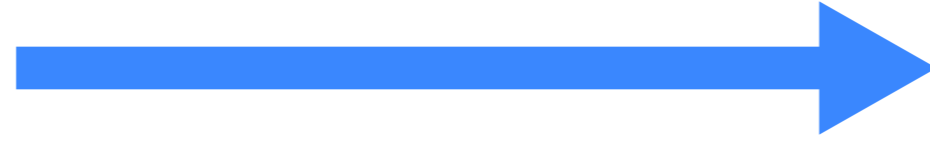
赤方偏移歪み



非線形バイアス  
モデル(摂動論)

銀河バイアス  
(Watts & Taylor 2001)

$\delta_g^r$  (銀河:実)



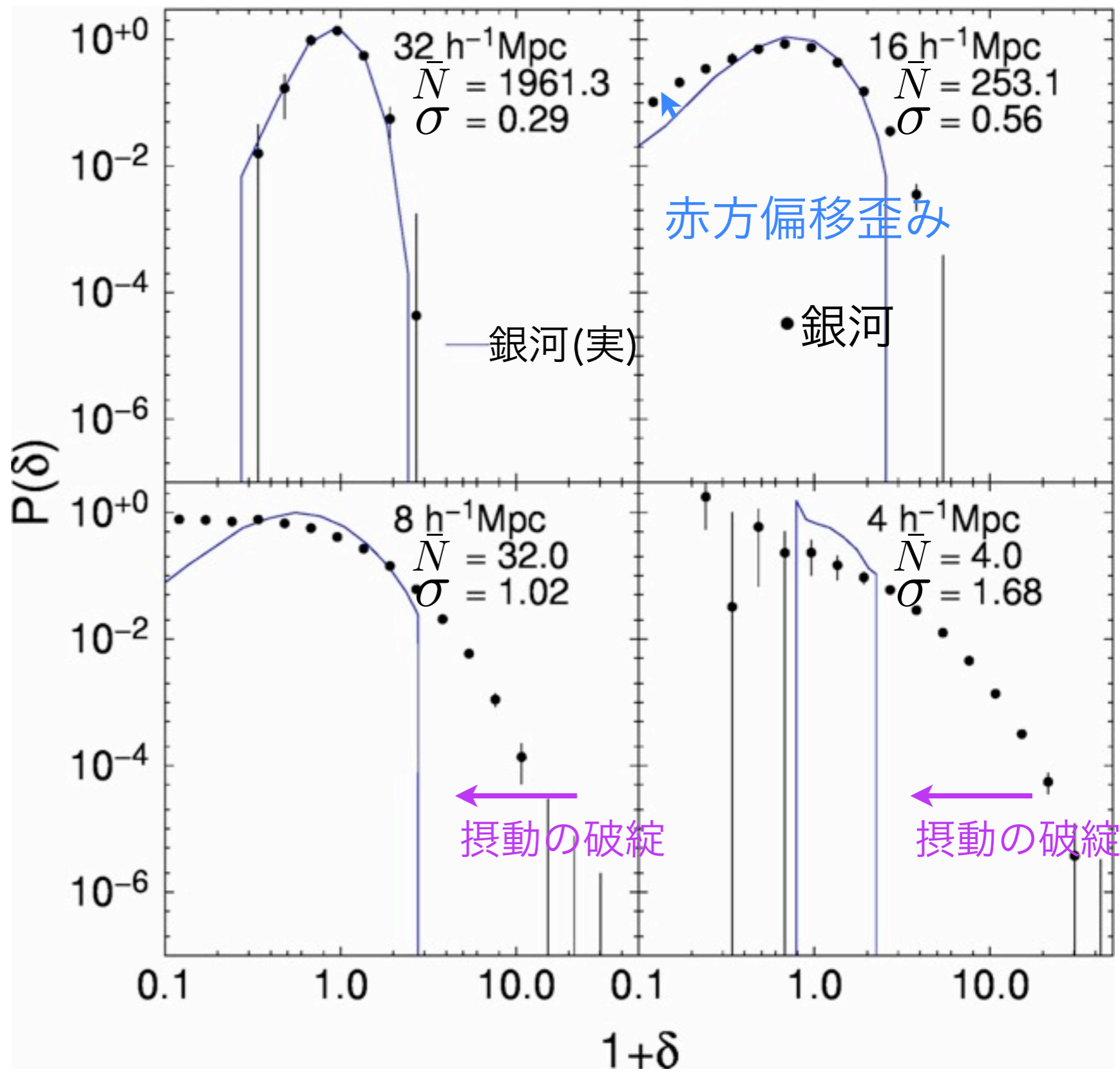
$\delta_g^s$  (銀河:赤)



# 実空間の銀河のPDFの再構築

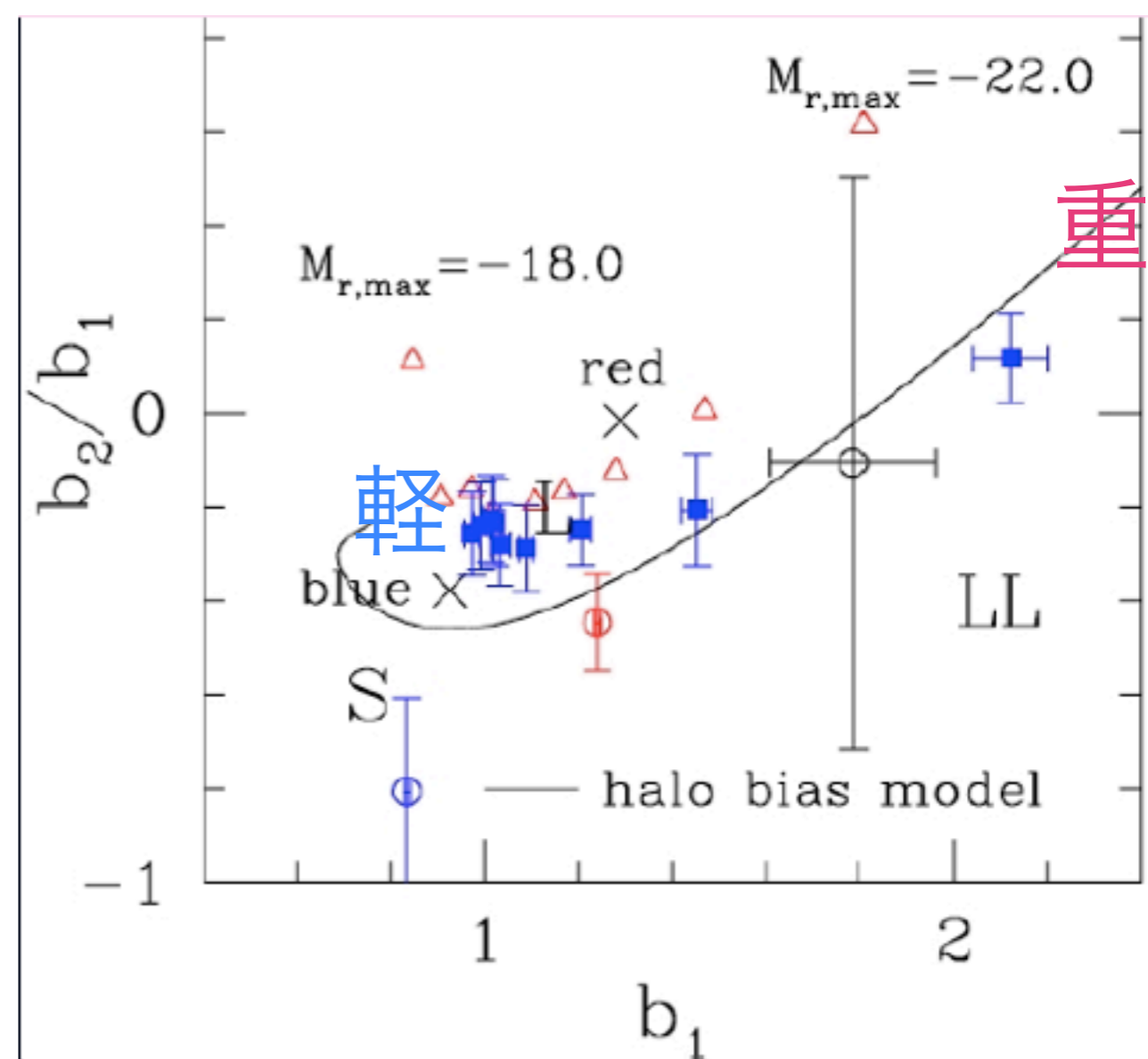
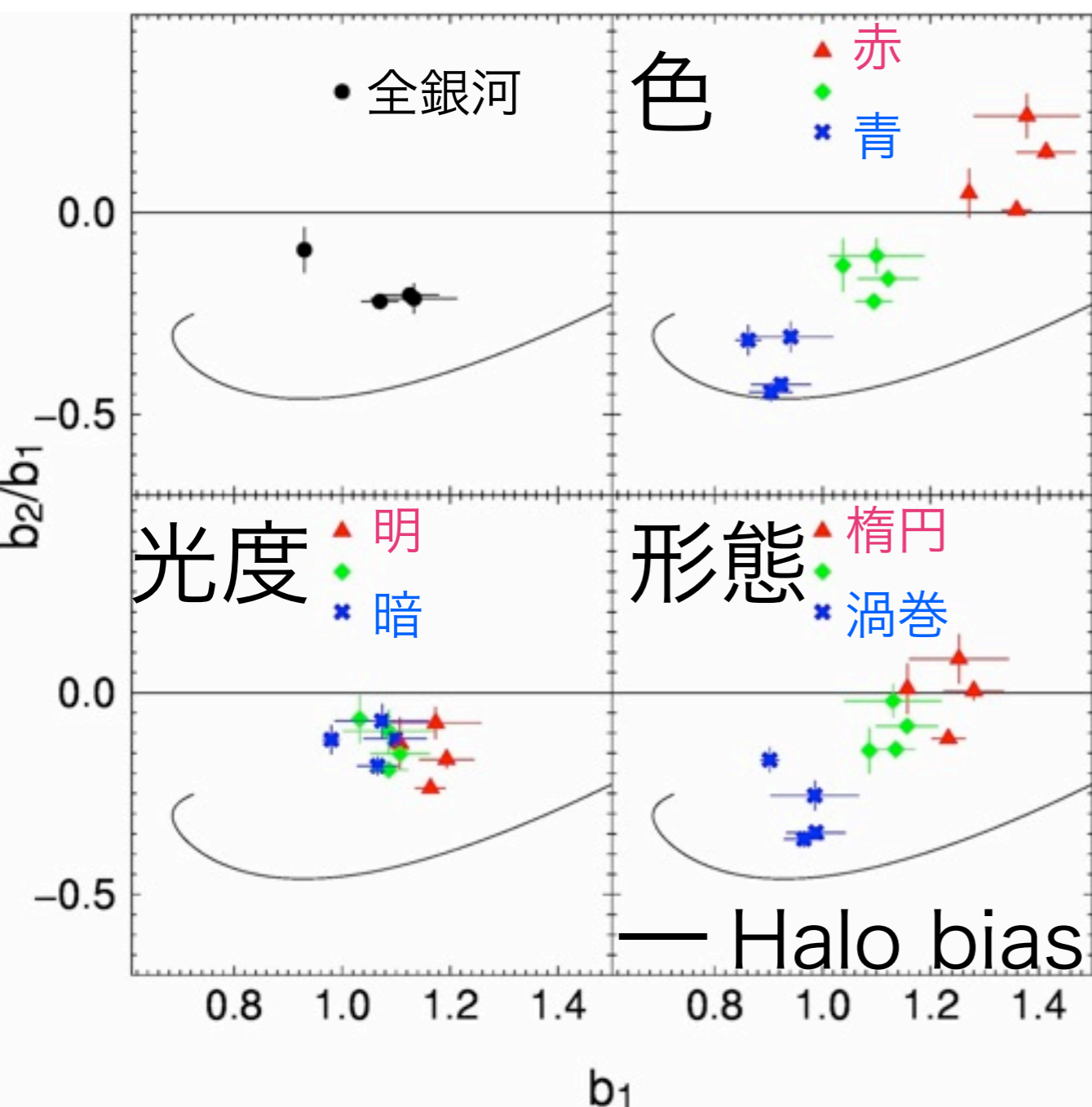
摂動論(2次)の枠内で、  
 実空間の銀河のPDFにも  
 CDMのPDFと同程度の  
 赤方偏移歪みの影響  
 が見られる

$$b_2^r < 0$$



# $b_1 - b_2$ の相関とハローモデルの予言

赤方偏移空間 先行研究

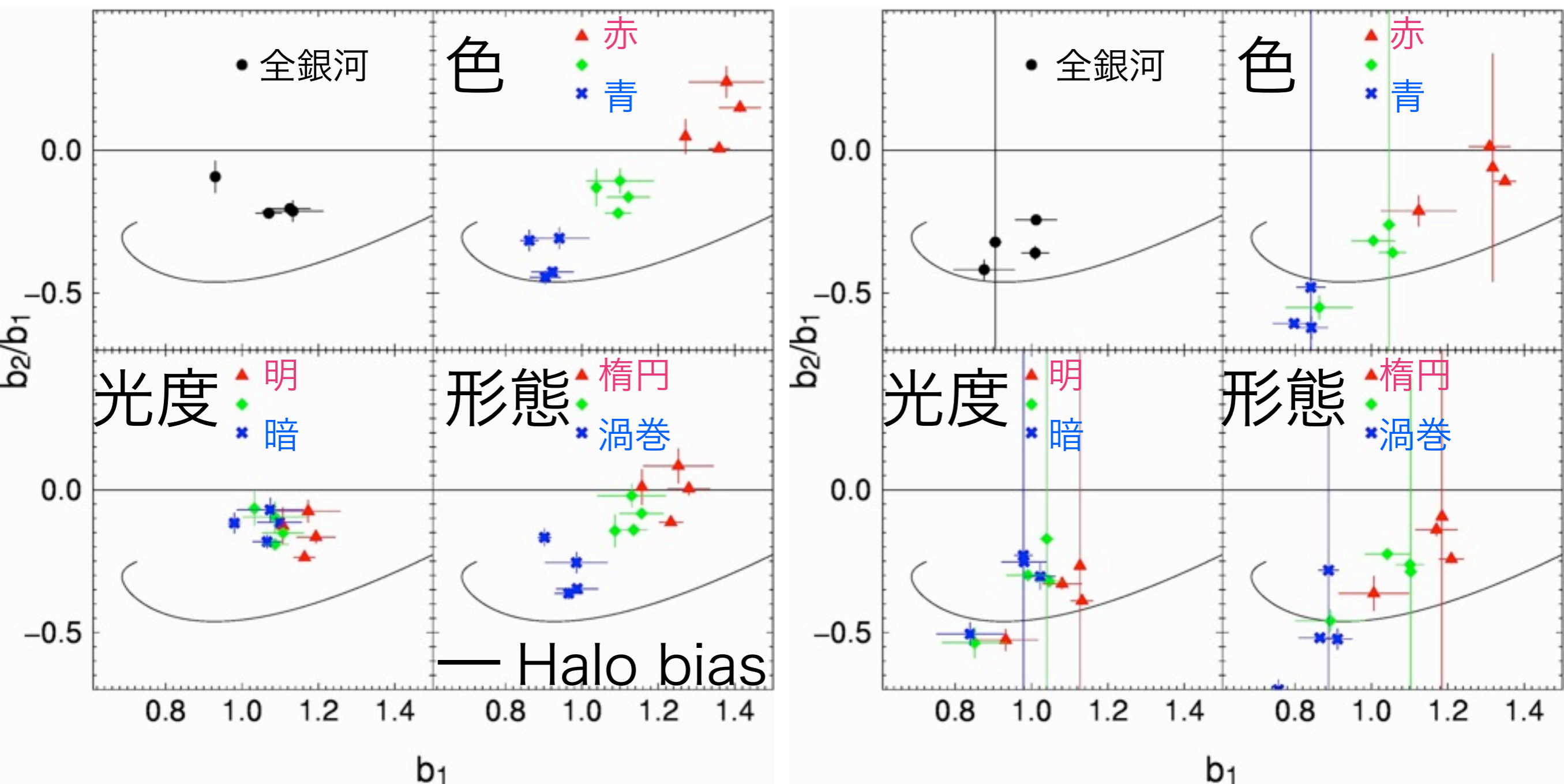


(Nishimichi et al. 2007)

先行研究に見られるようなgenericな相関が $b_1$ と $b_2$ に見られる

# $b_1 - b_2$ の相関とハローモデルの予言

赤方偏移空間 実空間



実空間の $b_1$ と $b_2$ の値の相関は、赤方偏移空間のそれよりもハローバイアスモデルが予言するものに近い



# まとめと結論

- 強非線形領域を除けば、銀河のPDFは経験的なモデル(LN,GQED,NBD)で基本的に良く近似できる
- CDM(実)と銀河(赤)のPDFの違いは、2次までの摂動論の枠内で、非線形バイアスと赤方偏移歪みを用いて理解することができる

SDSS銀河のクラスタリングは  
ハローモデルで定性的に説明できる