

# 数値シミュレーションを用いた 弱重力レンズ解析 による宇宙論研究

白崎正人 (国立天文台)

第6回観測的宇宙論ワークショップ

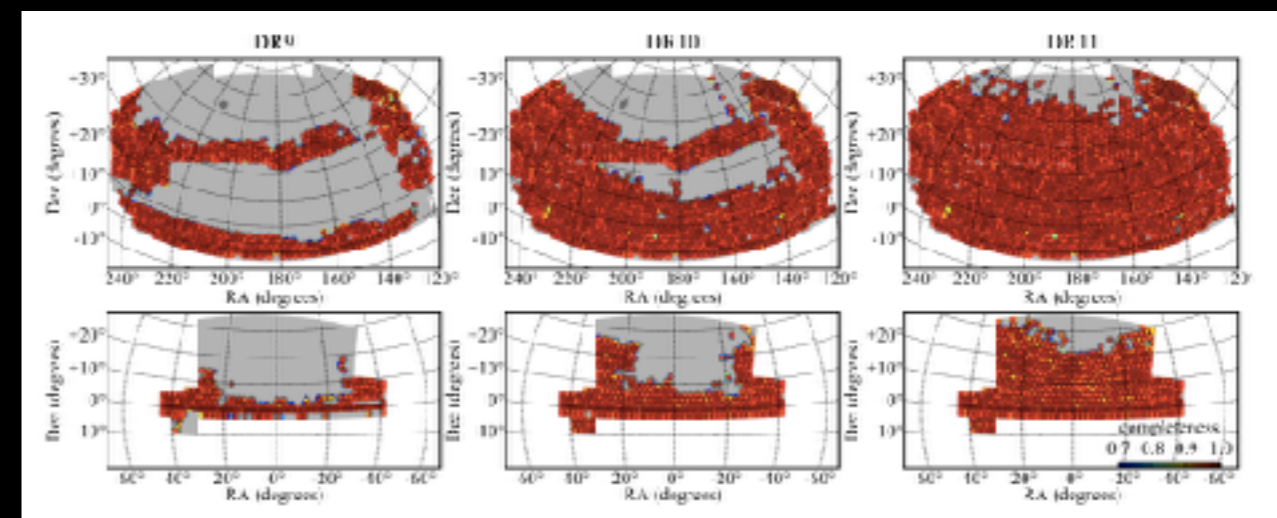
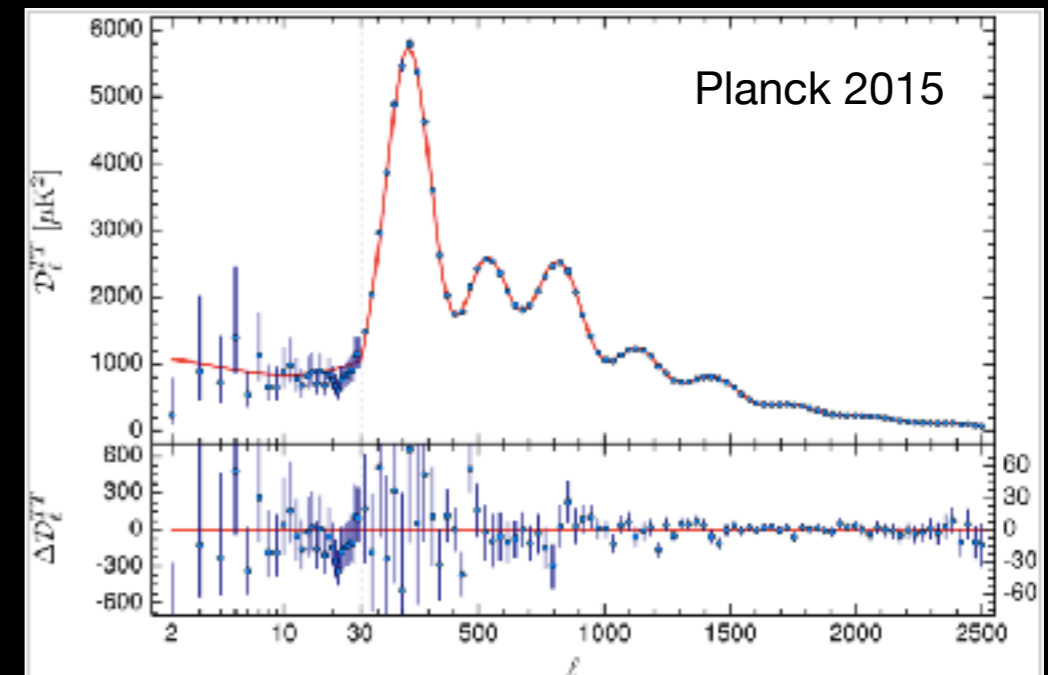
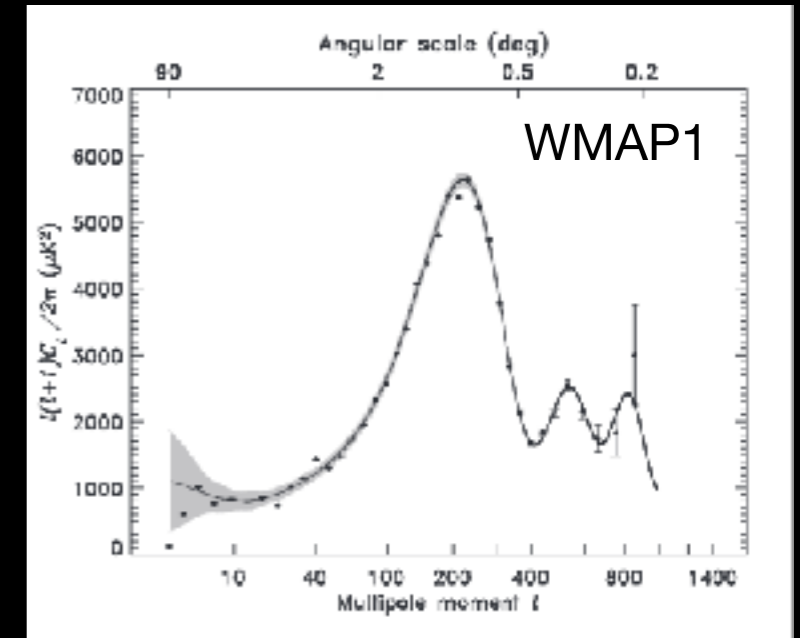
2017年10月25日 於 弘前大学

## 内容

1. 弱重力レンズ解析のイントロ
2. 弱重力レンズの基本
3. なぜシミュレーションが必要か
4. シミュレーションで何ができるか
5. 今後の課題

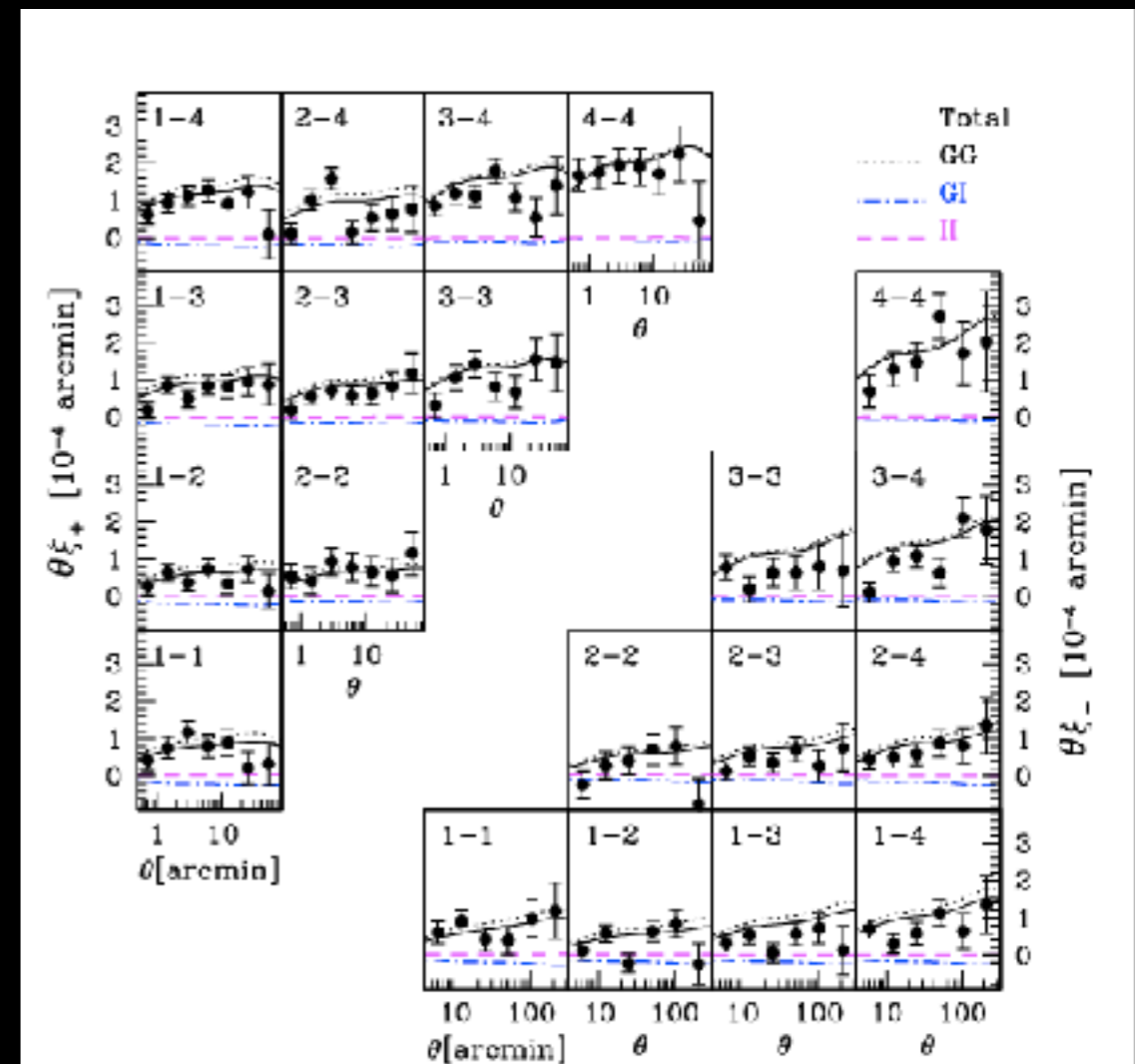
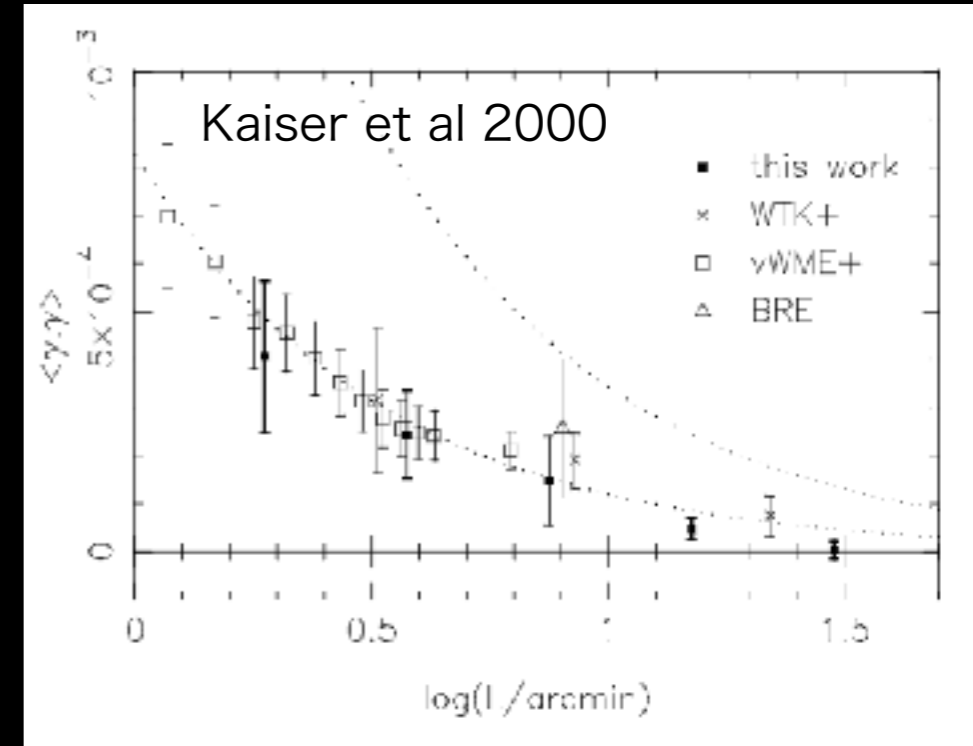
# 観測的宇宙論の15年

- 観測的宇宙論の二大勢力
  - CMB, galaxy clustering
- 21世紀初頭：WMAP1, SDSS DR1, 2dF
- 現在：Planck 2015, SPT/ACT, Polarbear, WiggleZ, SDSS IIIなど
- $\Lambda$ CDMの成功、CMB温度/偏光揺らぎの精密測定、BAOによる距離測定、赤方偏移歪み



# 弱重力レンズの15年

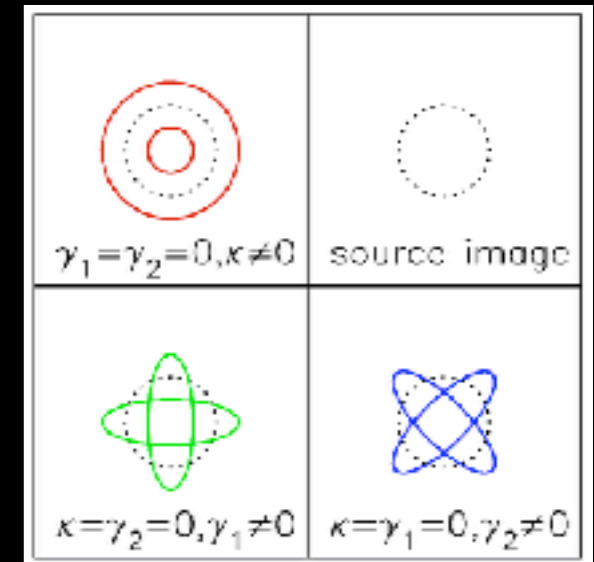
- $z < 1$  における大スケール物質分布の直接観測 (銀河バイアスなし)
- 2000年 : Bacon et al. 2000, Kaiser et al. 2000, Van Waerbeke et al. 2000, Wittman et al. 2000
- 2015年以降 : CFHTLenS, KiDS, DES and HSC!



Hildebrandt et al 2017

# Weak Lensing Basics

像の変形は 2つの量で特徴付けられる  
convergence と shear



$$\kappa(\boldsymbol{\theta}, \chi) = \int_0^{\chi_H} d\chi W(\chi) \delta(r(\chi)\boldsymbol{\theta}, \chi) \text{overdensity}$$

**Convergence**

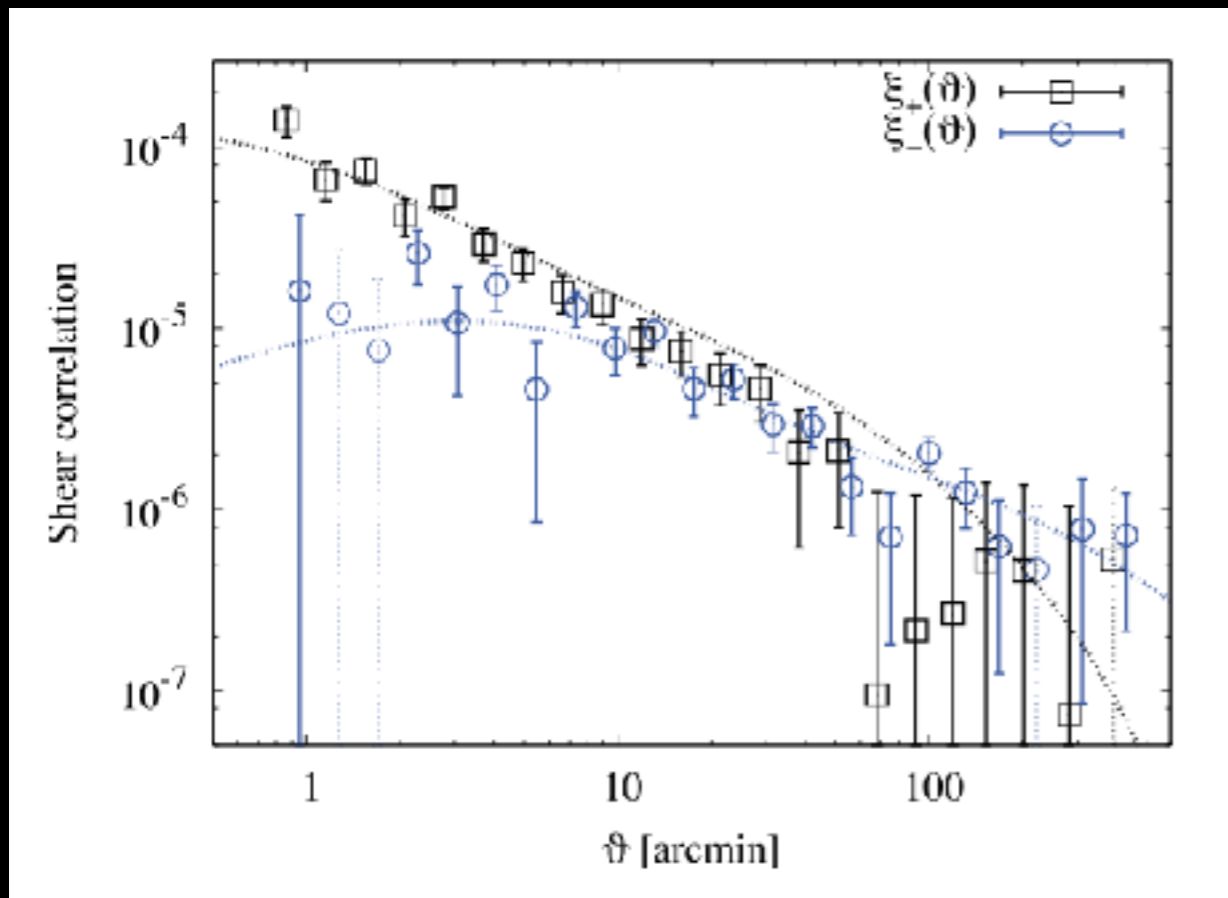
$$W(\chi) = \frac{3}{2} \left( \frac{H_0}{c} \right)^2 \Omega_{m0} \frac{r(\chi)}{a(\chi)} \int_{\chi}^{\chi_H} d\chi' p(\chi') \frac{r(\chi' - \chi)}{r(\chi')}$$

convergence と shear はともに重力ポテンシャルの二階微分に  
依存するので、ポアソン方程式を通じて変換できる

# Typical value of Lensing

大規模構造 (> 10 Mpc)

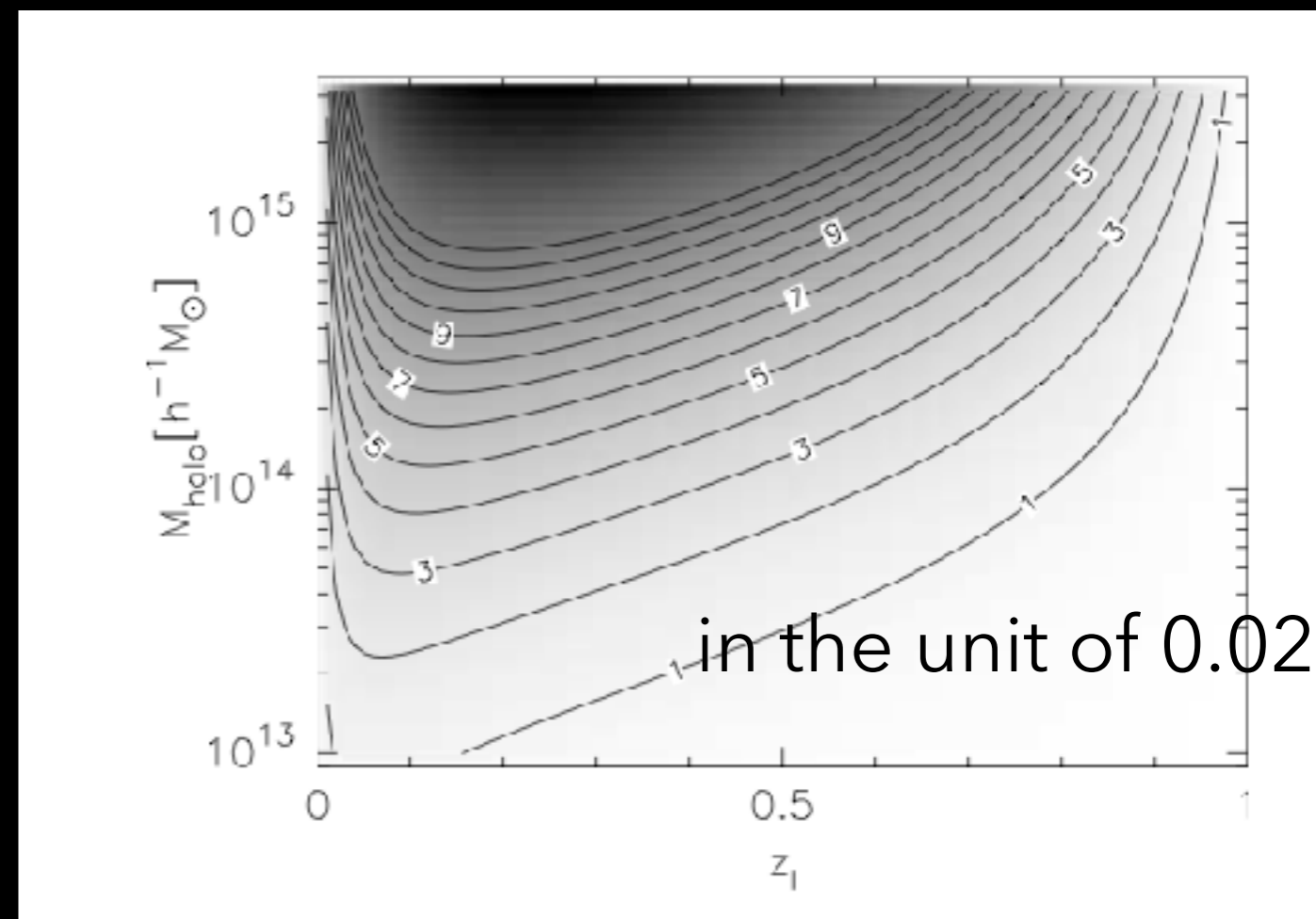
銀河団 (1-10 Mpc)



Kilbinger et al. 2013

→ Large-Scale Structure

**0.001-0.01**



Hamana et al. 2004

→ Clusters ( $10^{14} M_{\text{sun}} @ z=0.3$ )

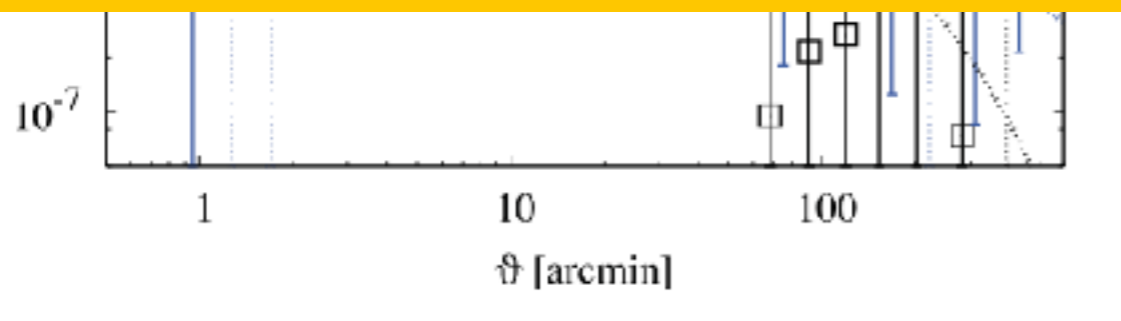
**~0.1**

# Typical value of Lensing

大規模構造 (> 10 Mpc)

銀河団 (1-10 Mpc)

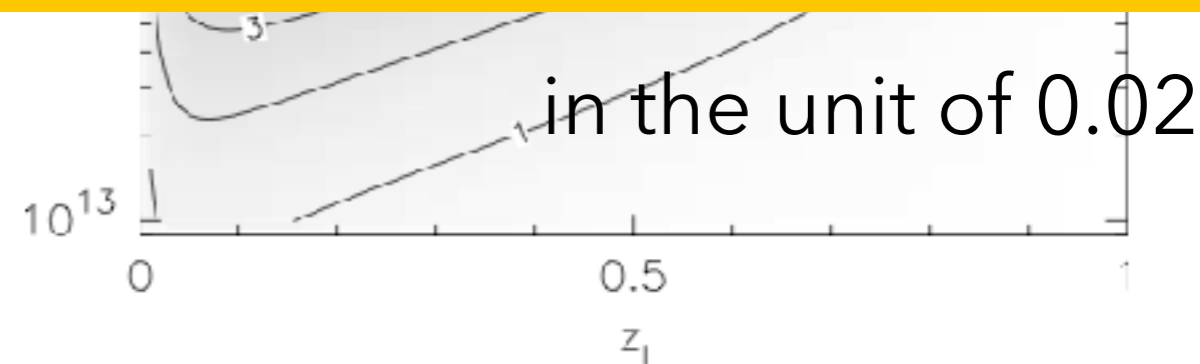
Intrinsic ellipticity of galaxy ( $\sim 0.4$ )  $\gg$  lensing signal  
Statistical analysis is essential  
(more source galaxies, better analysis)



Kilbinger et al. 2013

→ Large-Scale Structure

**0.001-0.01**



Hamana et al. 2004

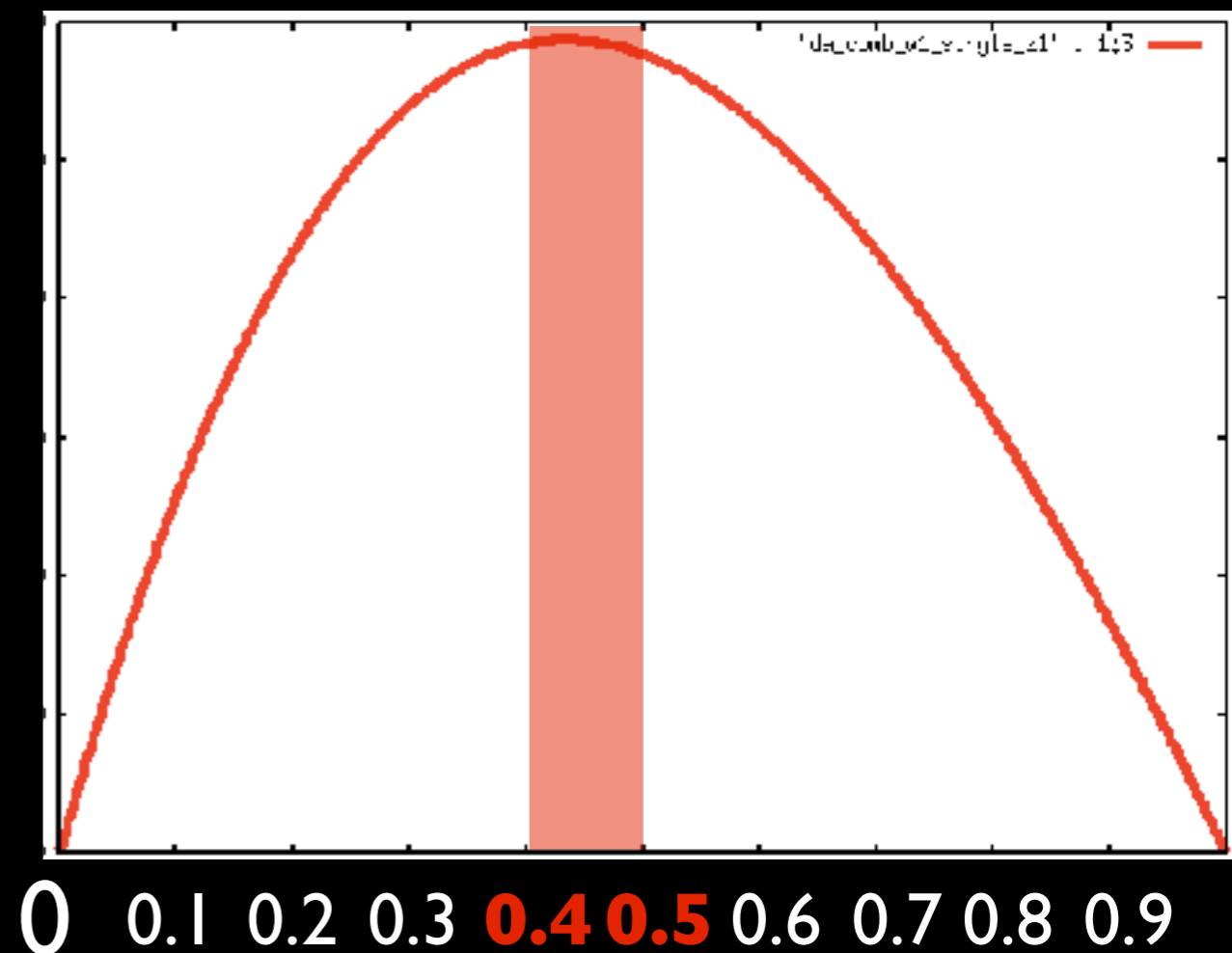
→ Clusters ( $10^{14} M_{\text{sun}} @ z=0.3$ )

**$\sim 0.1$**

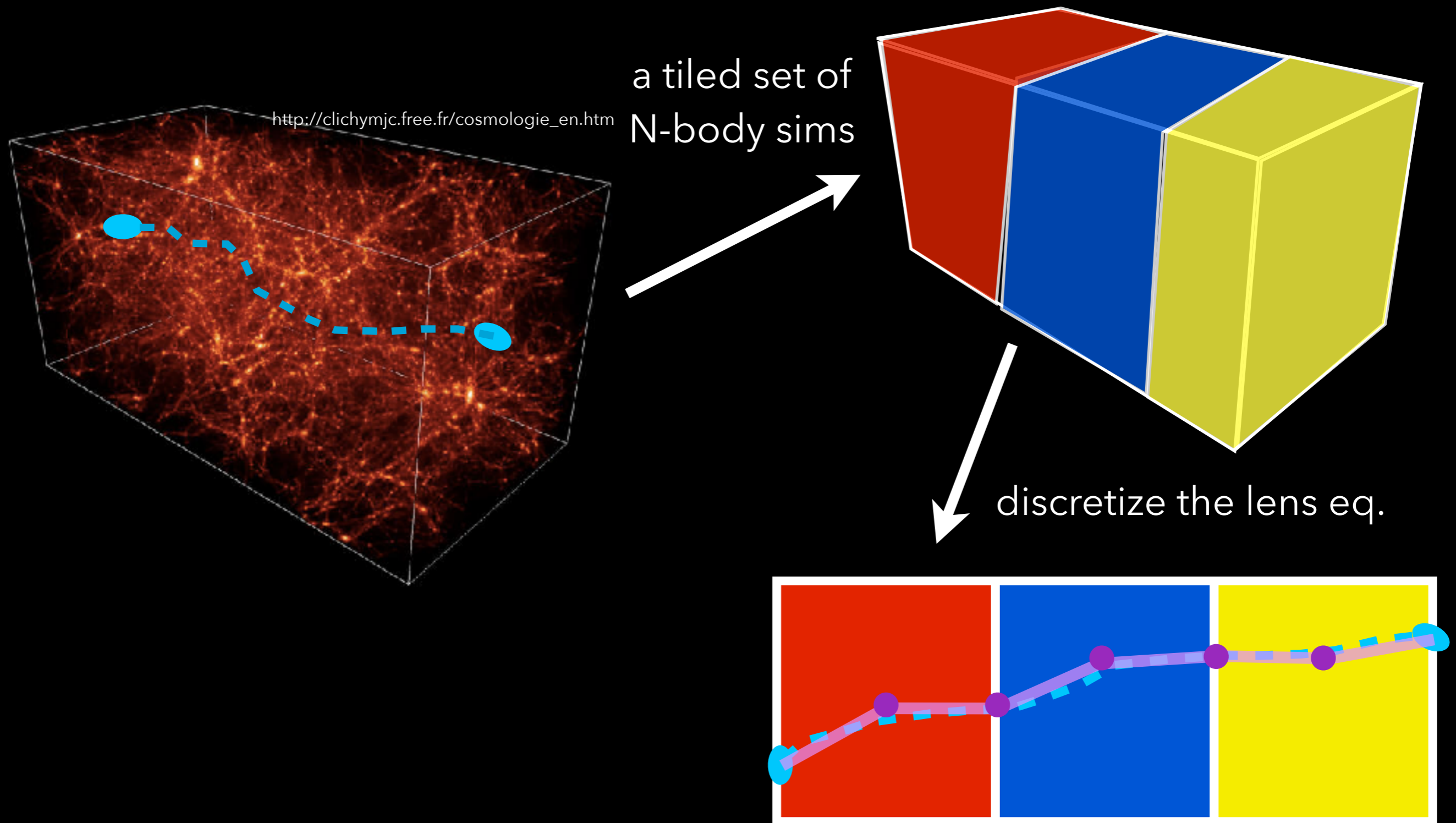
# シミュレーションがなぜ必要？

- 重力非線形成長
- $z=0.4-0.5 \rightarrow$  Radial comoving distance  $\sim 1 \text{ Gpc}/h$ ,  $10' \sim 3 \text{ Mpc}/h$
- 物質分布  $\delta$  の非ガウス性：統計的な性質は2点統計だけでは決まらない
- **Ray-Tracing Simulation of Gravitational Lensing**

ソース銀河が $z=1$ にいると  
仮定した時のLensing Kernel



# Ray-Tracing Simulation of Gravitational Lensing





# Various Extensions

*New physics*

Modified Gravity

Primordial non-Gaussianity

Dynamical Dark Energy

non-Cold Dark Matter

ガウスの  
初期密度ゆらぎ

一般相対論  
による重力

$\Lambda$ +CDM  
宇宙膨張

Flat Sky  
近似

Gas+Star Formation

Curved Sky

**Known effects**

# やったことあるやつ

2016

## *New physics*

Modified Gravity

2012

Primordial non-Gaussianity

2012

Dynamical Dark Energy

non-Cold Dark Matter

2013

ガウスの  
初期密度ゆらぎ

一般相対論  
による重力

$\Lambda$ +CDM  
宇宙膨張

2012-2017

Flat Sky  
近似

Gas+Star Formation

Curved Sky

2015

**Known effects**

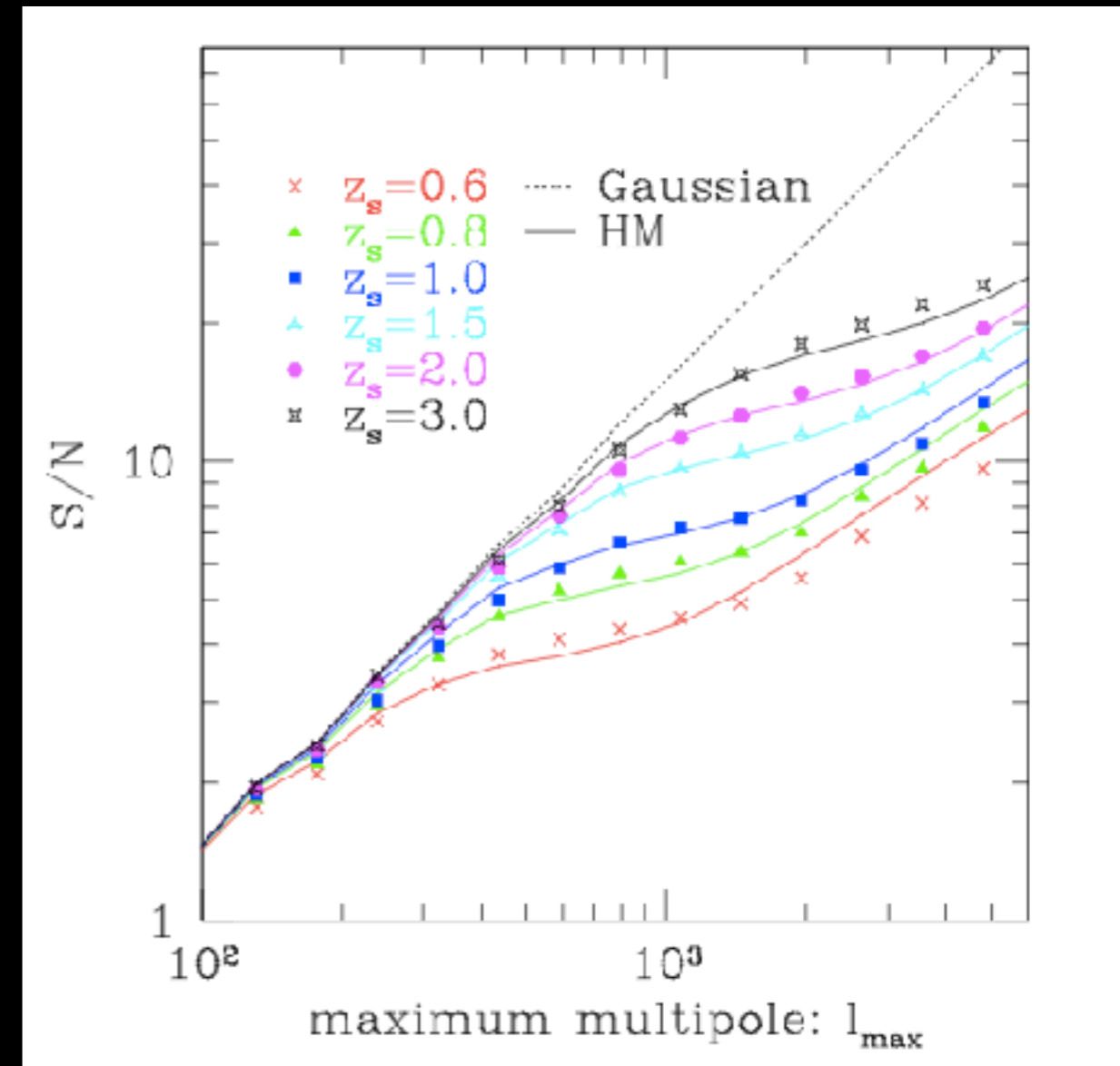
# シミュレーションを 使ってできること

- ・ 開発された理論計算や手法の詳細なテスト
  - ・ 非線形重力成長、プロジェクション効果、バリオン物理の影響
  - ・ 統計解析でしばしば用いられる慣習的な方法を調べる
- ・ 実験的/発見的なアプローチ
  - ・ 二点相関以外の情報を引き出す可能性
  - ・ 標準ではない宇宙論の制限可能性
- ・ 統計量の精密なモデリング
  - ・ たくさんシミュレーションをやって、統計量のモデル化
  - ・ 統計量を解析的に予言するのが難しい時に有効

# 開発済み計算/手法のテスト1

## 非線形成長の重要性

- 非線形成長 → 異なるフリーモードのカップリング → 非ガウス性
- Gaussian covariance 近似の妥当性, covariance を物理モデルで理解する
- Sato et al. 2009, 2010, Li et al 2014など

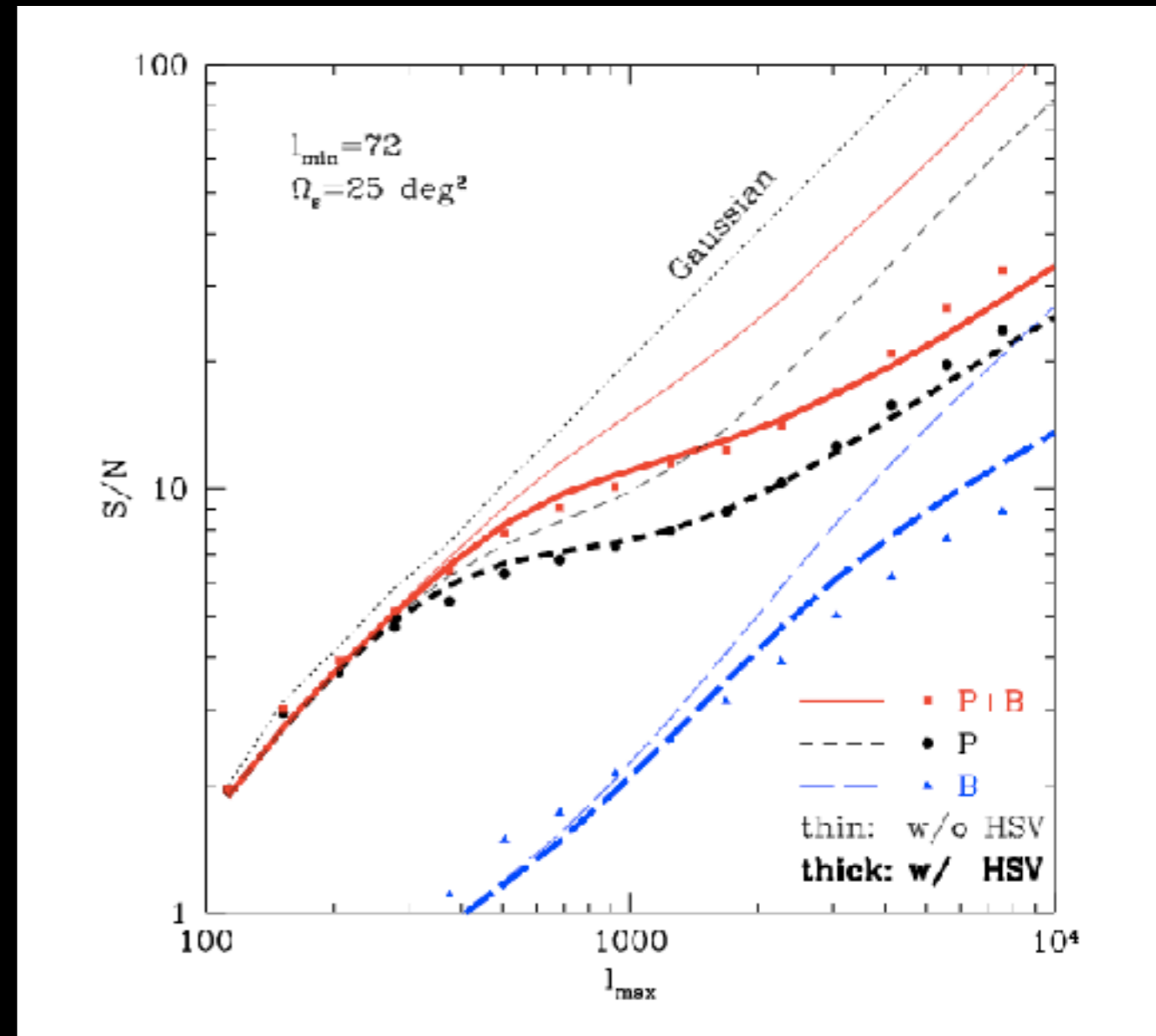


Sato et al 2009

# 開発済み計算/手法のテスト1

## 非線形成長の重要性

- ・ 非線形成長 → 異なるフーリエモードのカップリング → 非ガウス性
- ・ 三点相関：lowest non-Gaussian info in clustering
- ・ Corey & Hu 2001, Pen et al 2003, Takada & Jain 2003, Valageas et al 2012, Kayo et al 2013, Sato & Nishimichi 2013 など



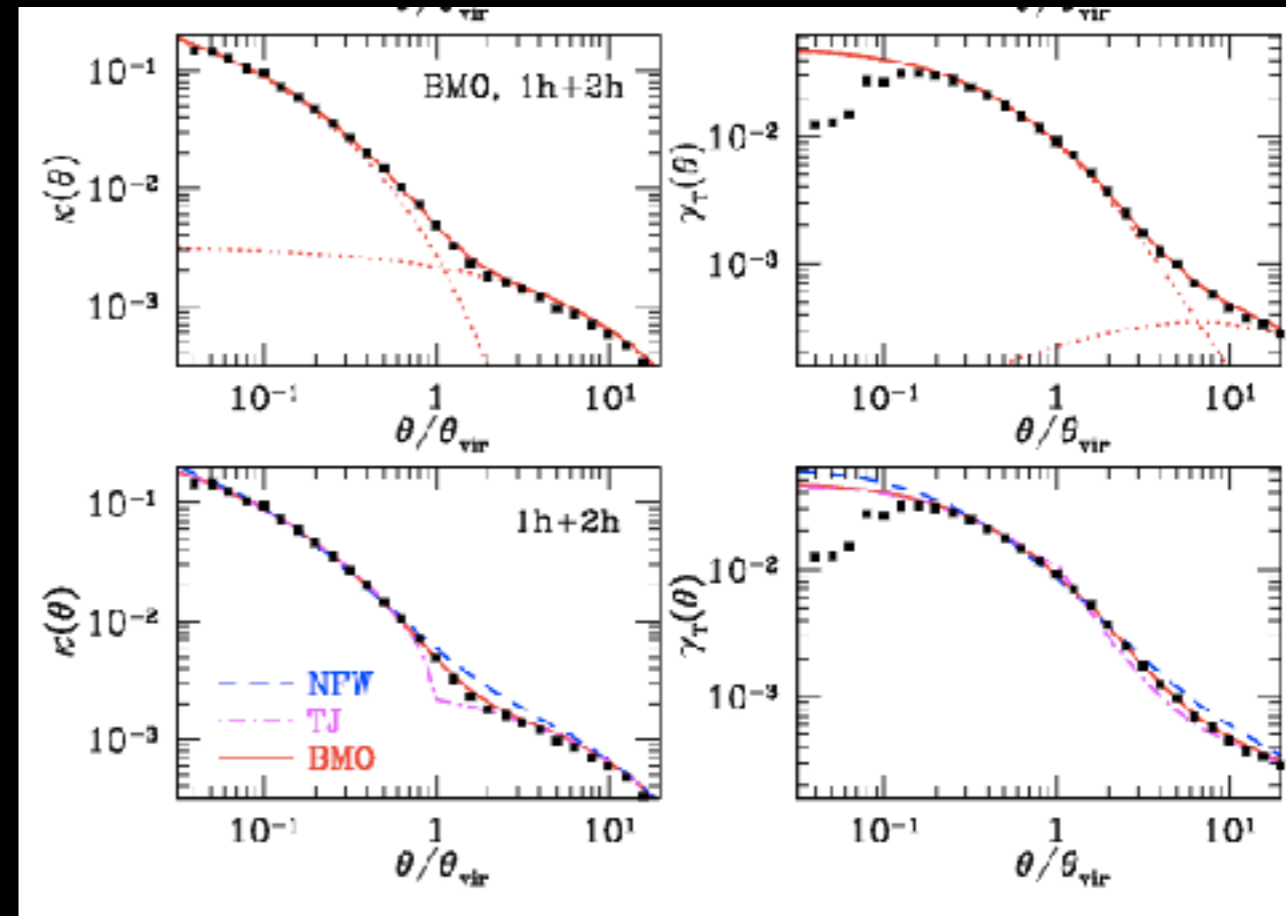
Kayo et al 2013

# 開発済み計算/手法のテスト2

## プロジェクトシヨン効果

- Cluster search based on weak lensing mass map
- Hamana et al 2004, Hennawi et al 2005, Maturi et al 2005, Fan et al 2010, Marian et al 2012, Hamana et al 2012
- 銀河団の質量推定, 銀河団外部/視線方向に並ぶLSSの影響
- Hoekstra et al 2003, 2011, Dodelson 2004, Becker & Kravtsov 2011, Oguri & Hamana 2011, Gruen et al. 2015

$$M_{\text{FOF}} = 10^{14} M_{\text{sun}}/h \quad z=0.4$$



Oguri & Hamana 2011

開発済み計算/手法のテスト2  
プロジェクト効果

# 弱重力レンズ(WL)効果

# スニアエフ・ゼルドビッチ(SZ)効果

	観測量への影響	関係する物理量	観測可能な物理量
<b>WL効果</b>	背景銀河像を歪める	銀河団内質量密度	$\gamma_+ \propto \Sigma(< R) - \Sigma(R)$ $\Sigma(\mathbf{x}) = \int d\ell \rho(\mathbf{x}, \ell)$
<b>SZ効果</b>	背景放射スペクトルを歪める	銀河団内ガス圧力	$y(\mathbf{x}) \propto \int d\ell P_e(\mathbf{x}, \ell)$

SZ効果→銀河団ガスの内部エネルギー

WL効果→銀河団質量

観測量Sと質量Mの関係  
 $P(S|M, z)$ の直接検証

## 弱重力レンズ(WL)効果

観測で得られる情報は、正確には  
projectionの影響を受けている

SZ-WLの同時観測から、本当に  
underlying  $P(S|M,z)$ を回復できるだろうか？

SZ効果	を歪める	ガス圧力	$y(x) \propto \int dx I_e(x, \ell)$
------	------	------	-------------------------------------

SZ効果→銀河団ガスの内部エネルギー

WL効果→銀河団質量

観測量Sと質量Mの関係  
 $P(S|M,z)$ の直接検証

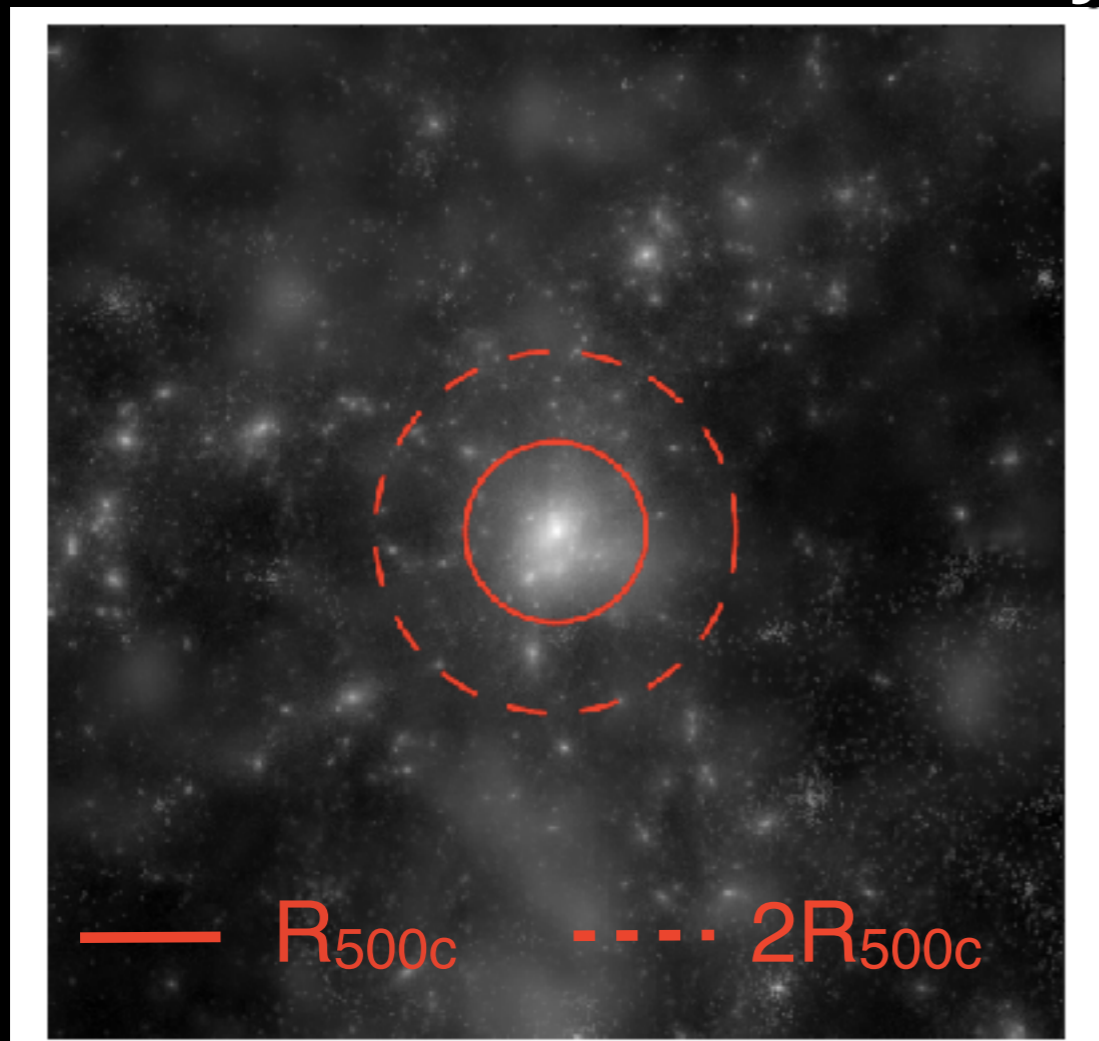


# SZ-WL 模擬觀測

Shirasaki et al  
2016

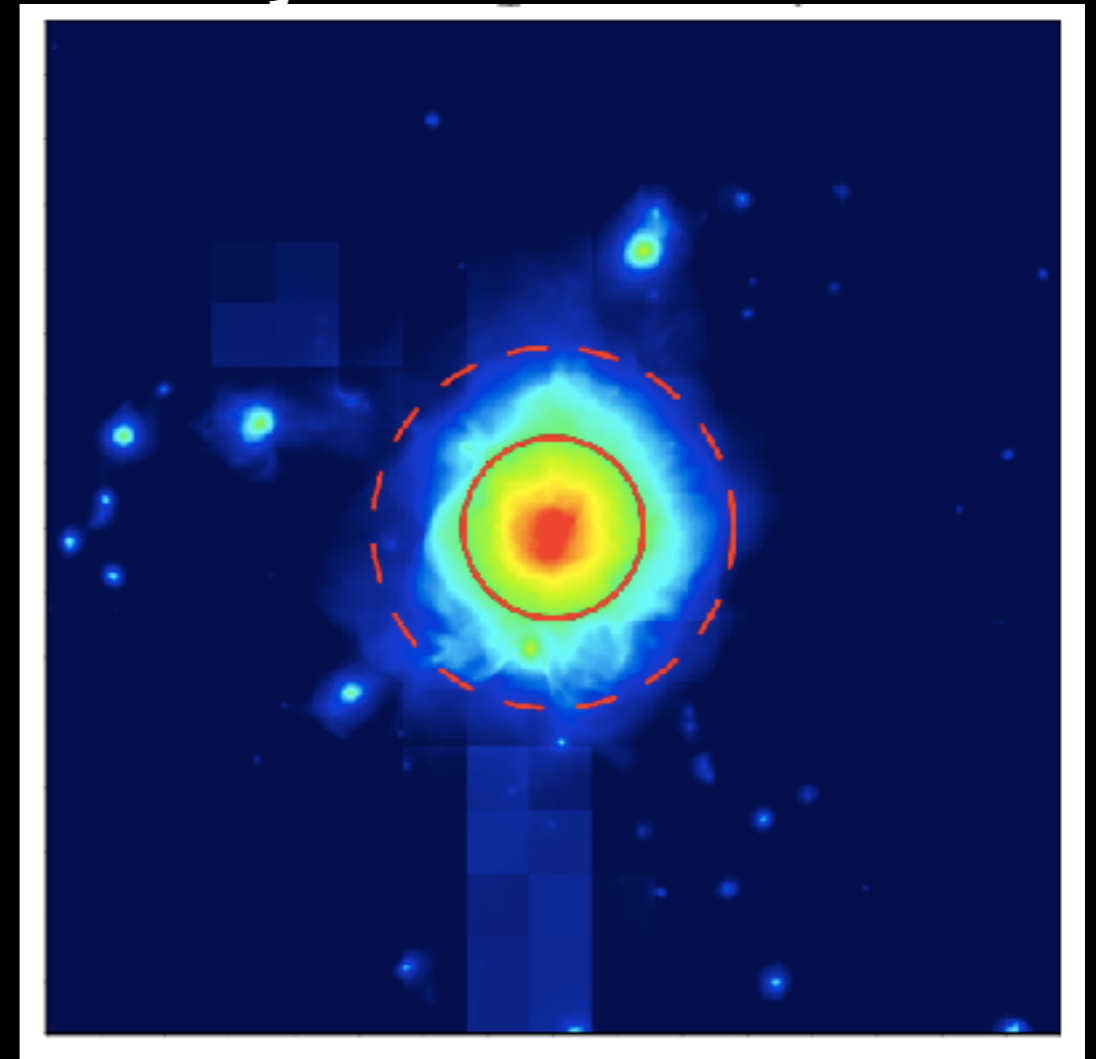
33 mass-limited clusters found in cosmological hydrodynamical simulation

## Surface mass density



→ mock data of cosmic shear

## Projected Pressure



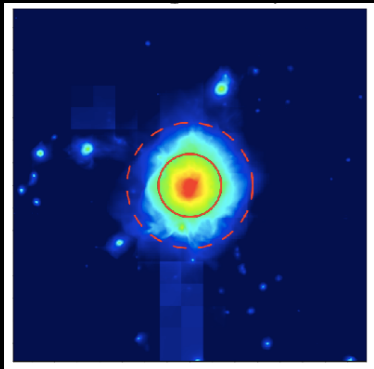
→ mock data of Compton  $y$

We properly take into account

large scale structure along LOS (depth of 500 Mpc/h)

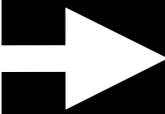
+ asphericity + substructure in DM halo

# Mock Observation of thermal SZ - Lensing Mass relation



Compton  
y profile

Profile  
Fitting



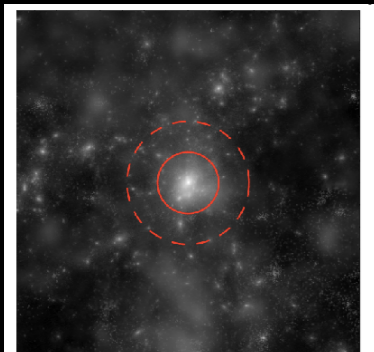
Integrated Compton Param.  $Y_{2D}$

generalized NFW pressure profile

$$P_e(r) = 1.88 \times E(z)^{8/3} \left( \frac{M_{500,p}}{10^{14} h^{-1} M_\odot} \right)^{0.787 + \alpha'_p (r/R_{500,p})} \times h^2 p(r/R_{500,p}) \text{ eV cm}^{-3},$$

NFW mass density profile

$$\rho_h(r) = \frac{\rho_s}{(r/r_s)(1 + r/r_s)},$$

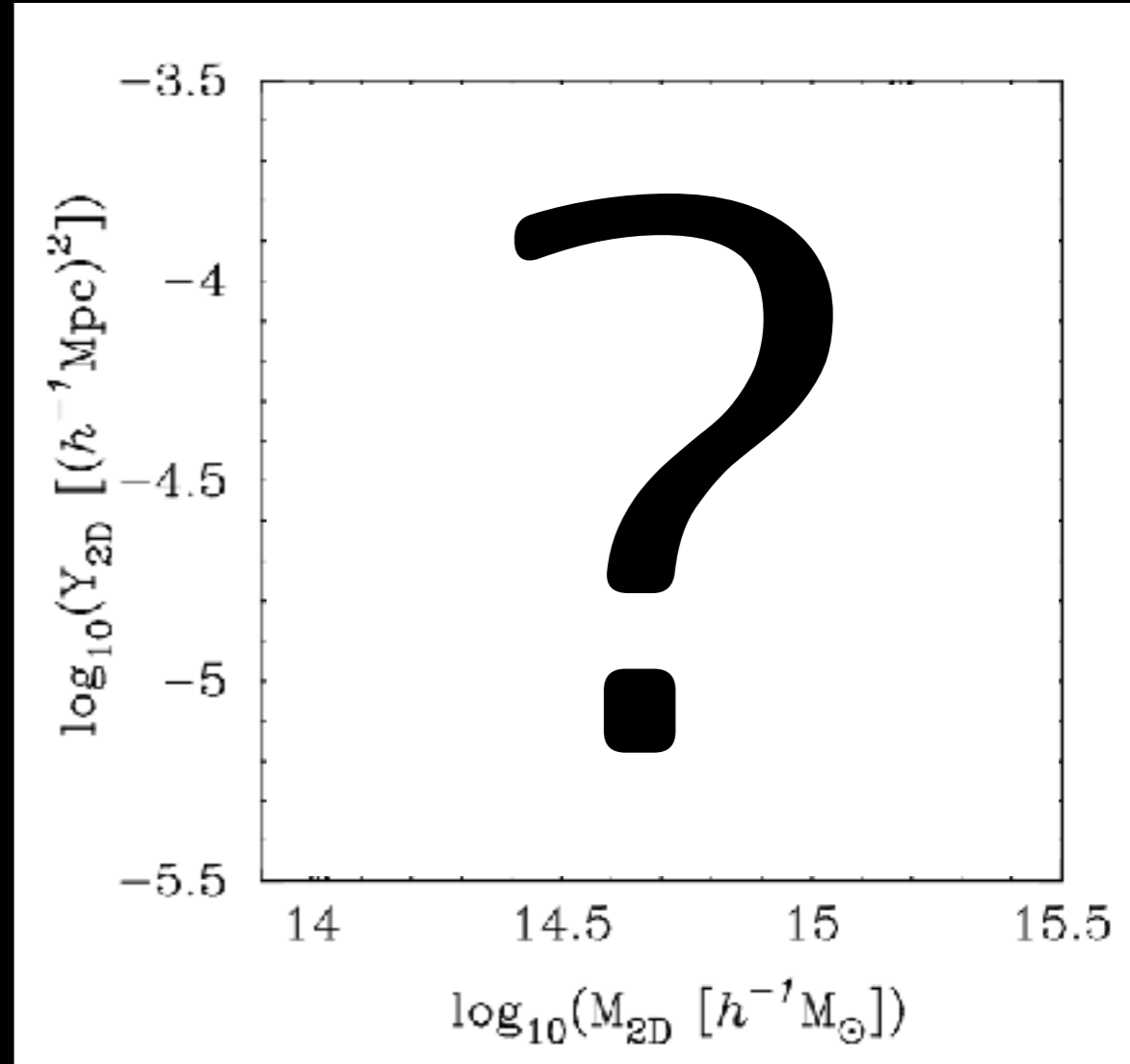


Tangential  
shear profile

Profile  
Fitting



Lensing Mass  $M_{2D}$

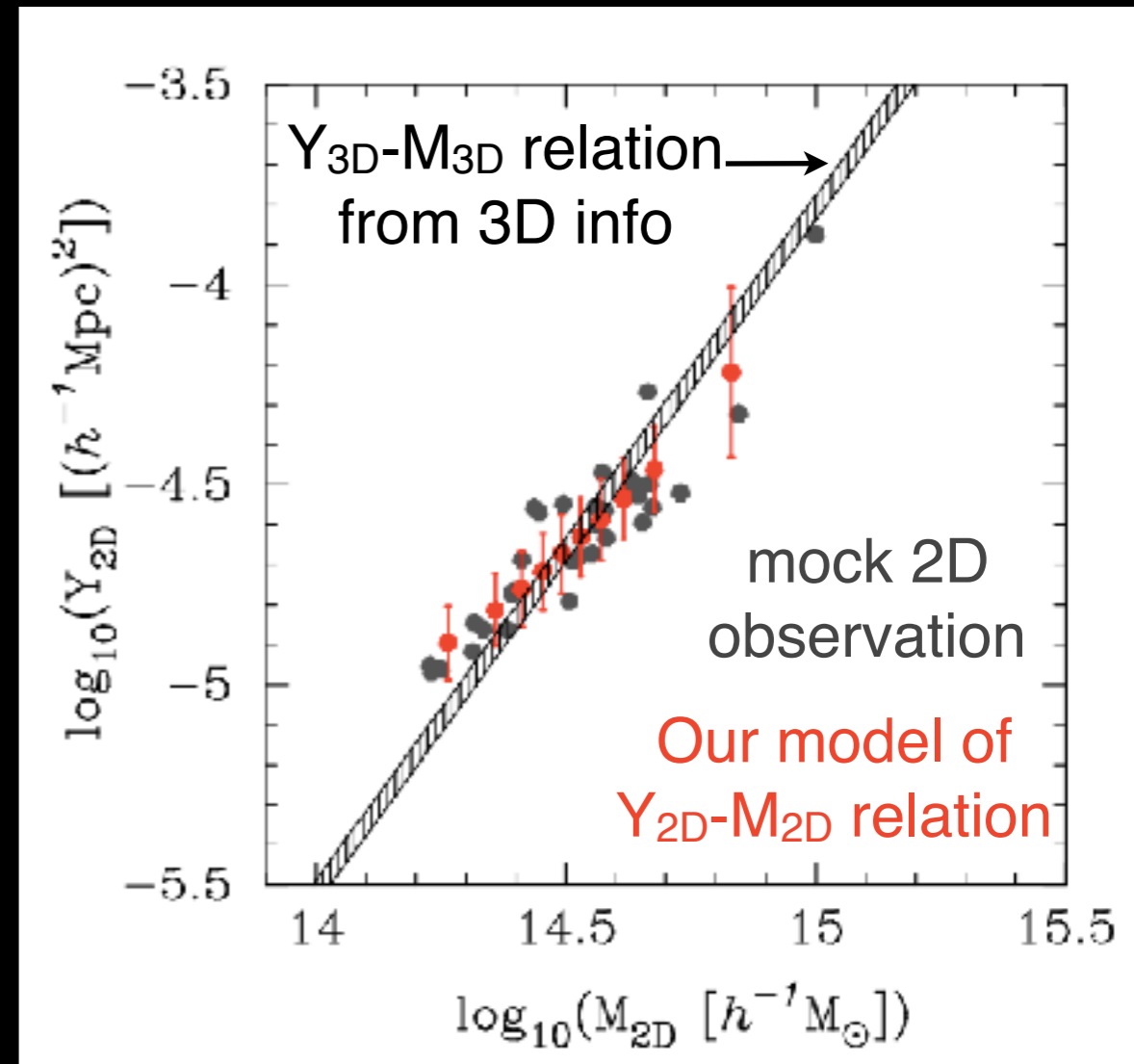


# Mock Observation of thermal SZ - Lensing Mass relation

Our main findings:

1.  $Y_{2D}$ - $M_{2D}$  relation would not be equivalent to  $Y_{3D}$ - $M_{3D}$  relation
2. The scatter in 2D relation would be larger than that in 3D relation

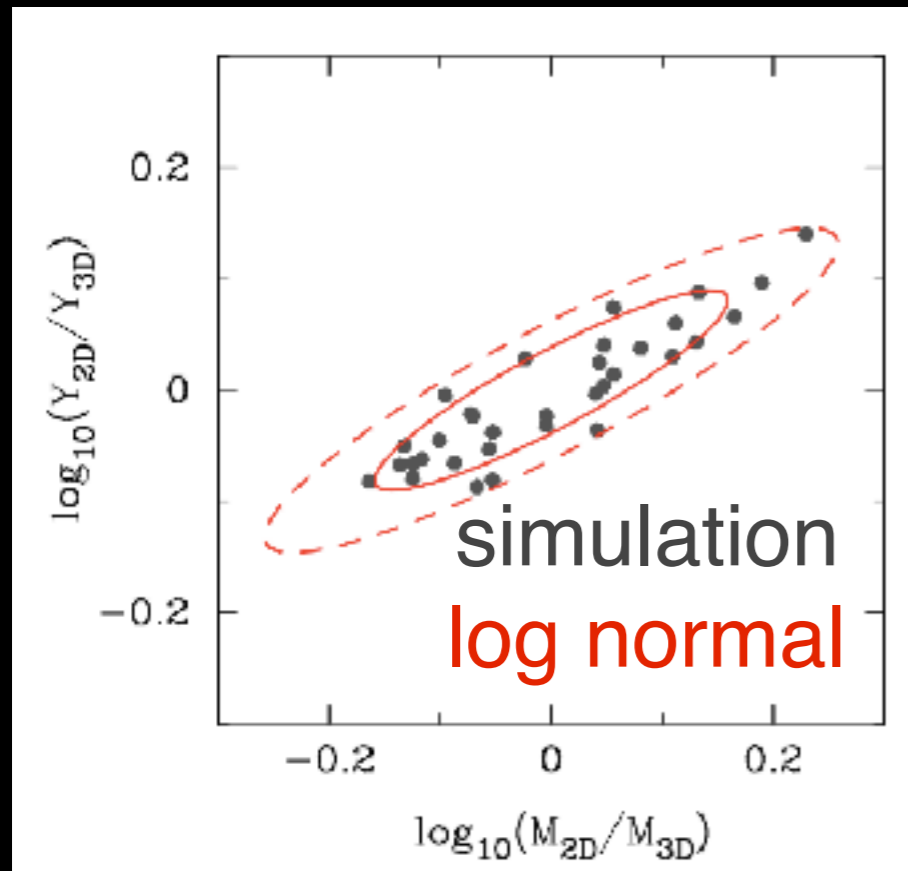
Integrated Compton Param.  $Y_{2D}$



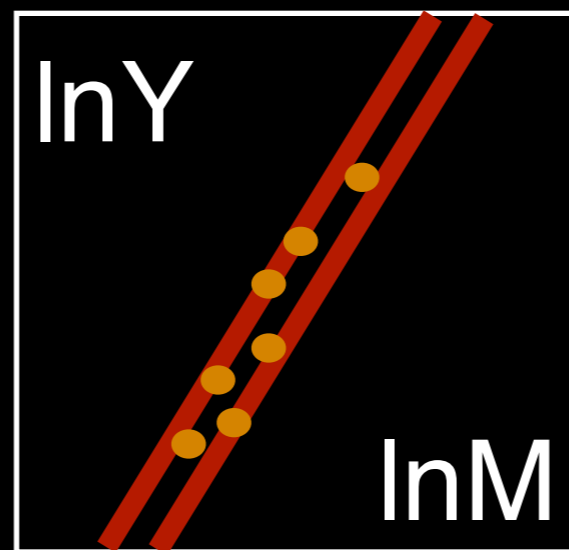
Lensing Mass  $M_{2D}$

# Correlated scatter in Y-M relation

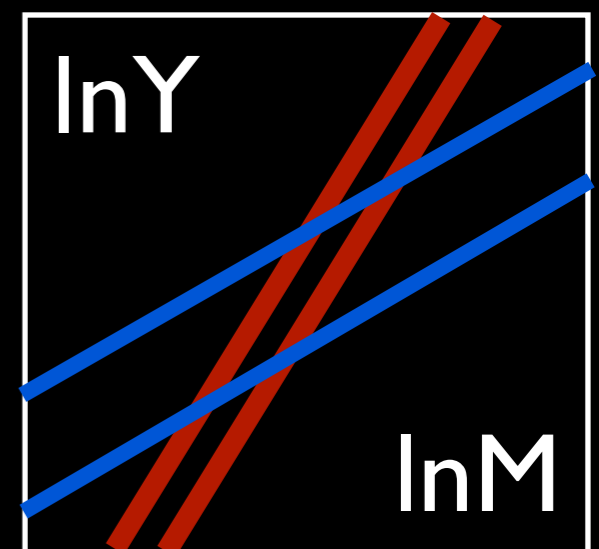
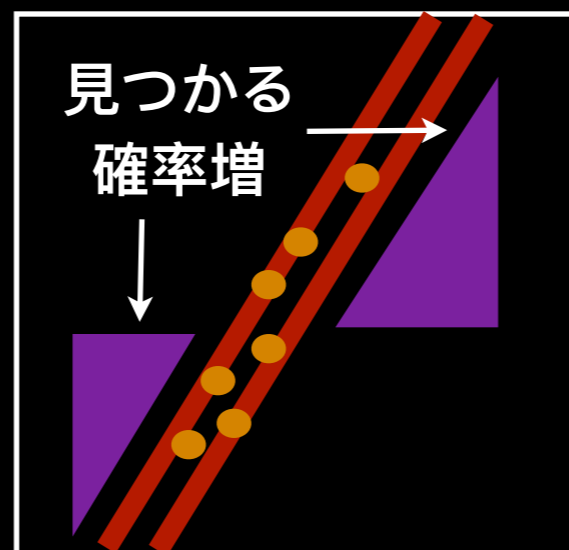
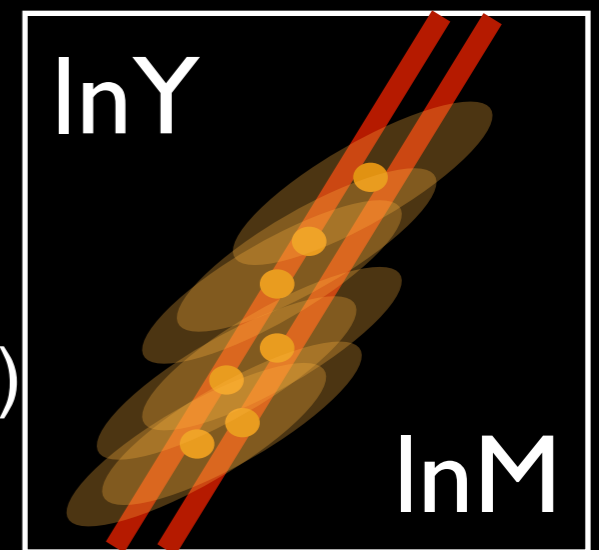
Observed correlated scatter  
in 33 mock clusters



→ 物理量  $S$  が  $S_{\text{obs}}$  で観測される確率  $P(S_{\text{obs}}|S)$  を与える



$P(S_{\text{obs}}|S)$

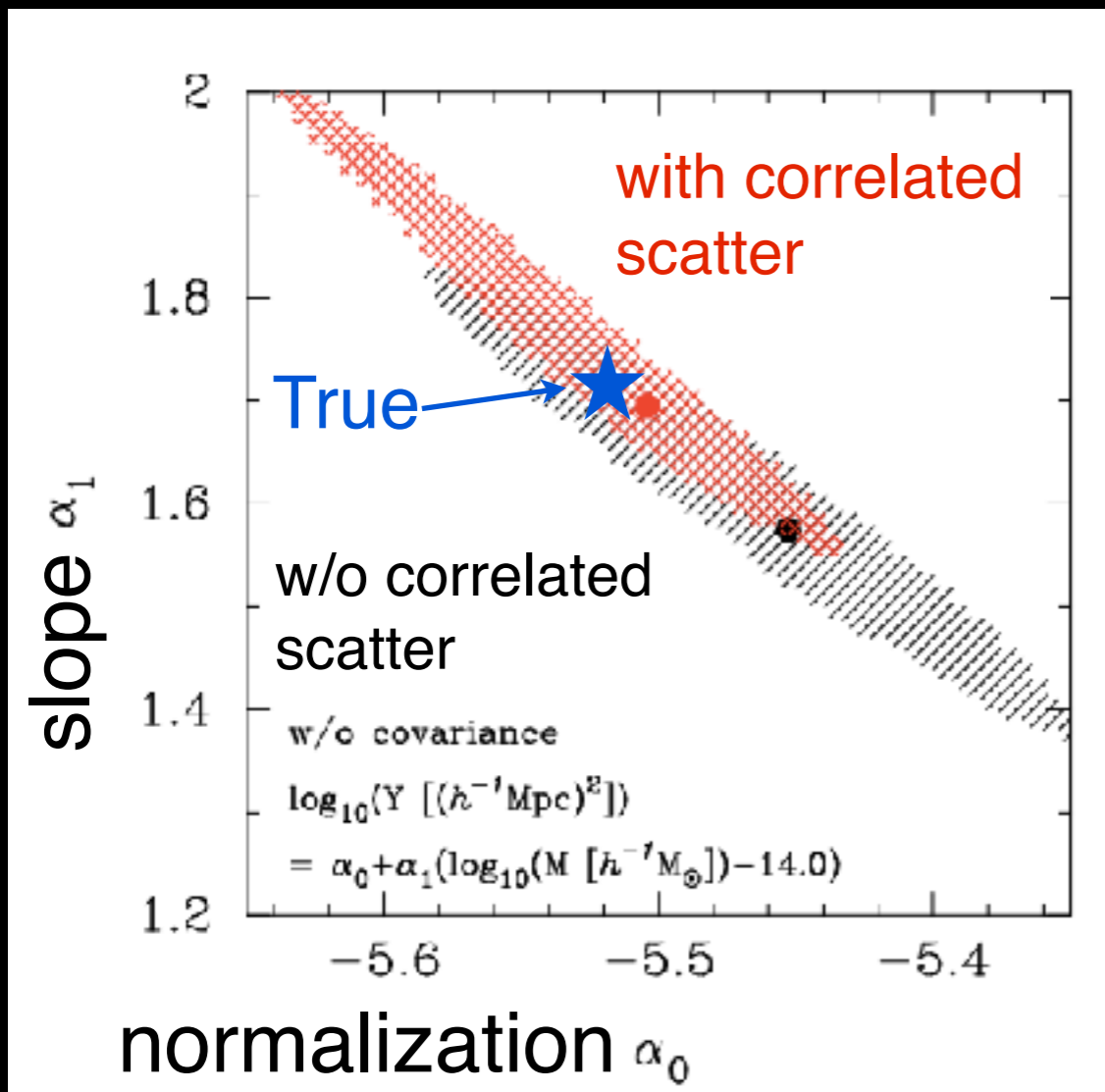


Intrinsic Observed

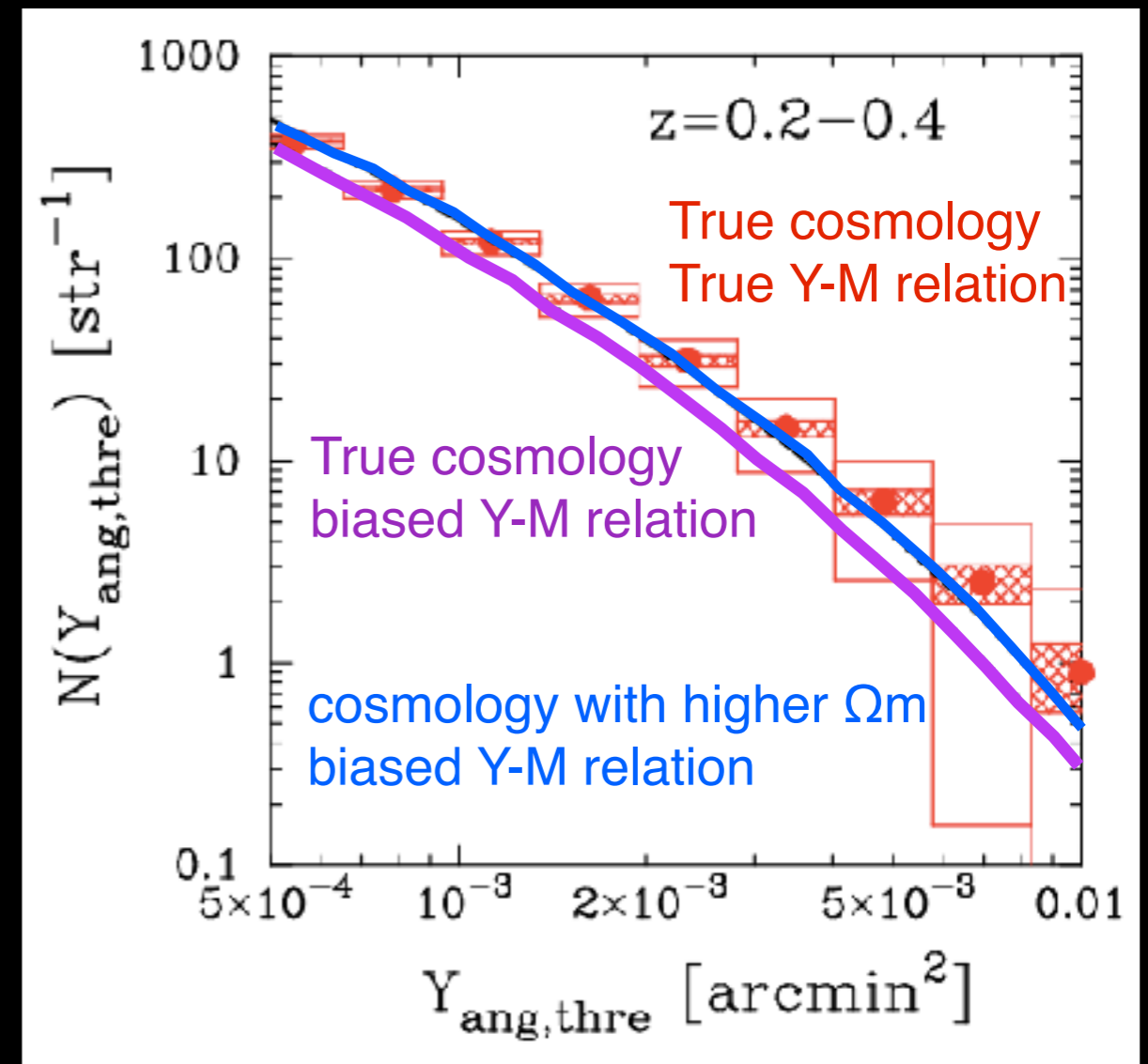
# Impact of correlated scatter on cosmology

Y-M scaling relation estimated from 2D observables

Number count of clusters as a function of integrated Y



Ignoring correlated scatter would induce  $\sim 10\%$  bias



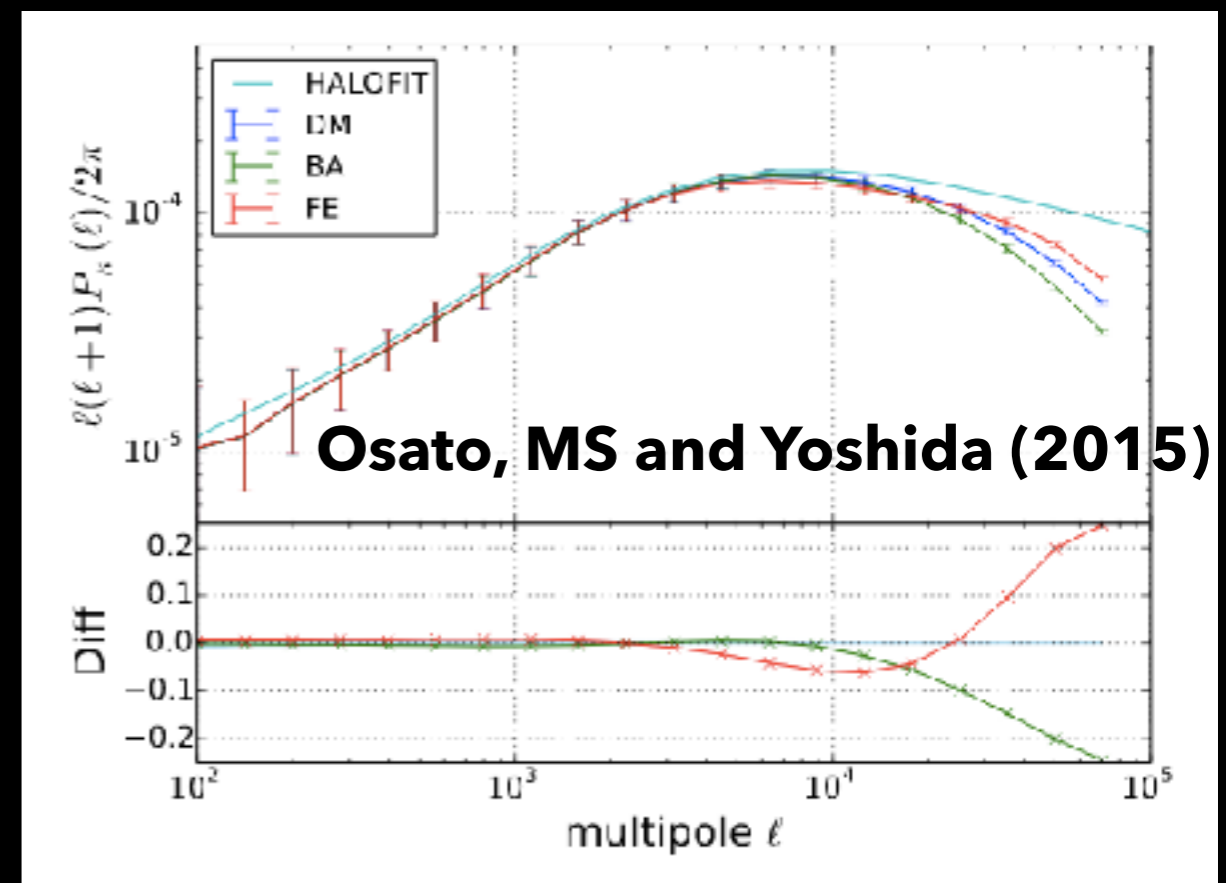
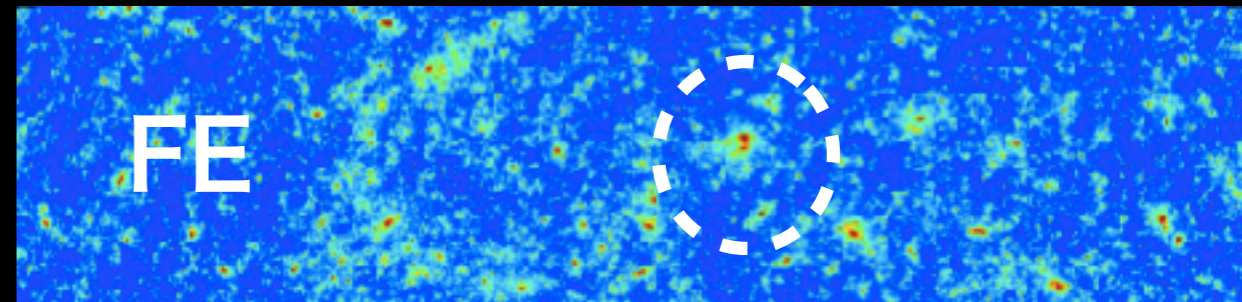
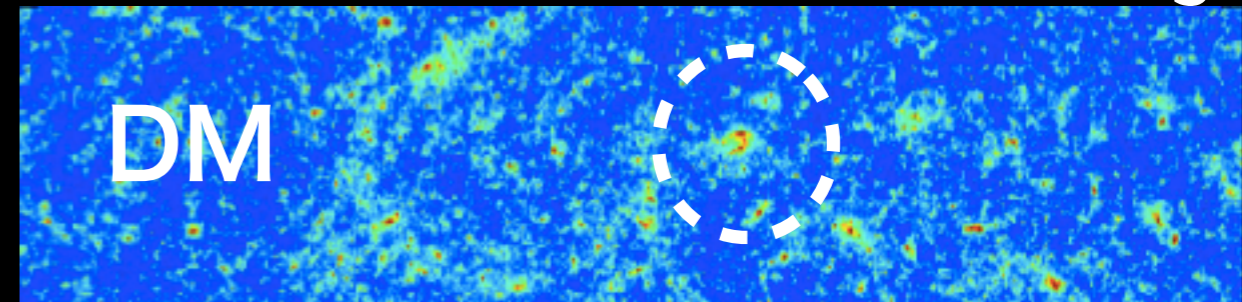
2.5% in  $\Omega_m$  or 6.6% in  $\sigma_8$

# 開発済み計算/手法のテスト3

## バリオン物理の影響

- 弱重力レンズが測る物質分布 = DM + baryon
- バリオンのfeedbackがどれくらい物質分布を変更するか
- M. White 2004, Semboloni et al 2011, Osato et al 2015
- arcmin scale,  $k \sim 1 h/\text{Mpc}$  で典型的には重要

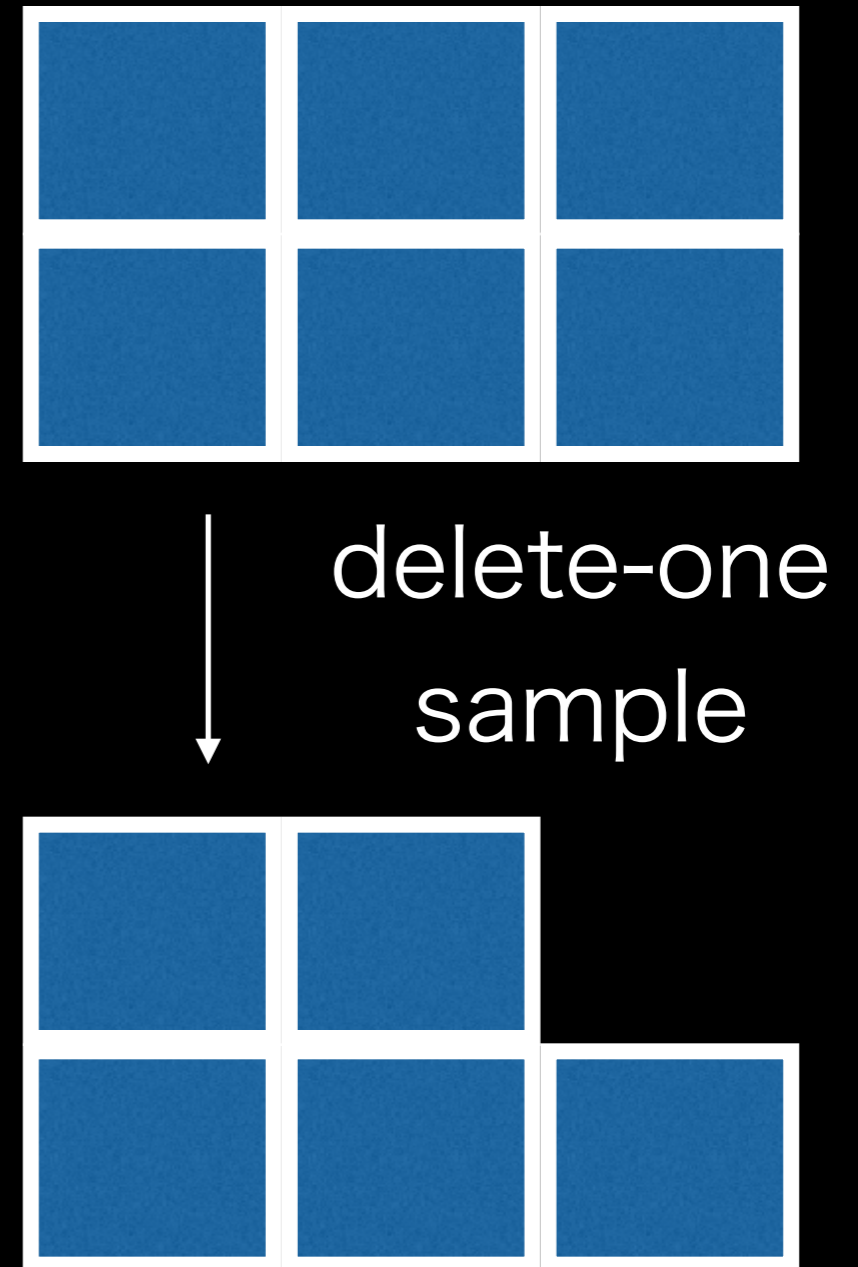
1 deg



# 開発済み計算/手法のテスト4

## 統計解析の実用的なところ

- ・ mock catalogがあるといろいろと便利
  - ・ パイプラインの動作確認
  - ・ たくさんmockがあれば統計誤差
- ・ しばしば用いられてきた慣習的なことのテスト
  - ・ e.g., Jackknife covariance
- ・ jackknife covarianceが真のsample varianceをどこまで評価できるか
- ・ Norberg et al. 2009, Friedrich et al. 2016
- ・ galaxy-galaxy lensingでは？

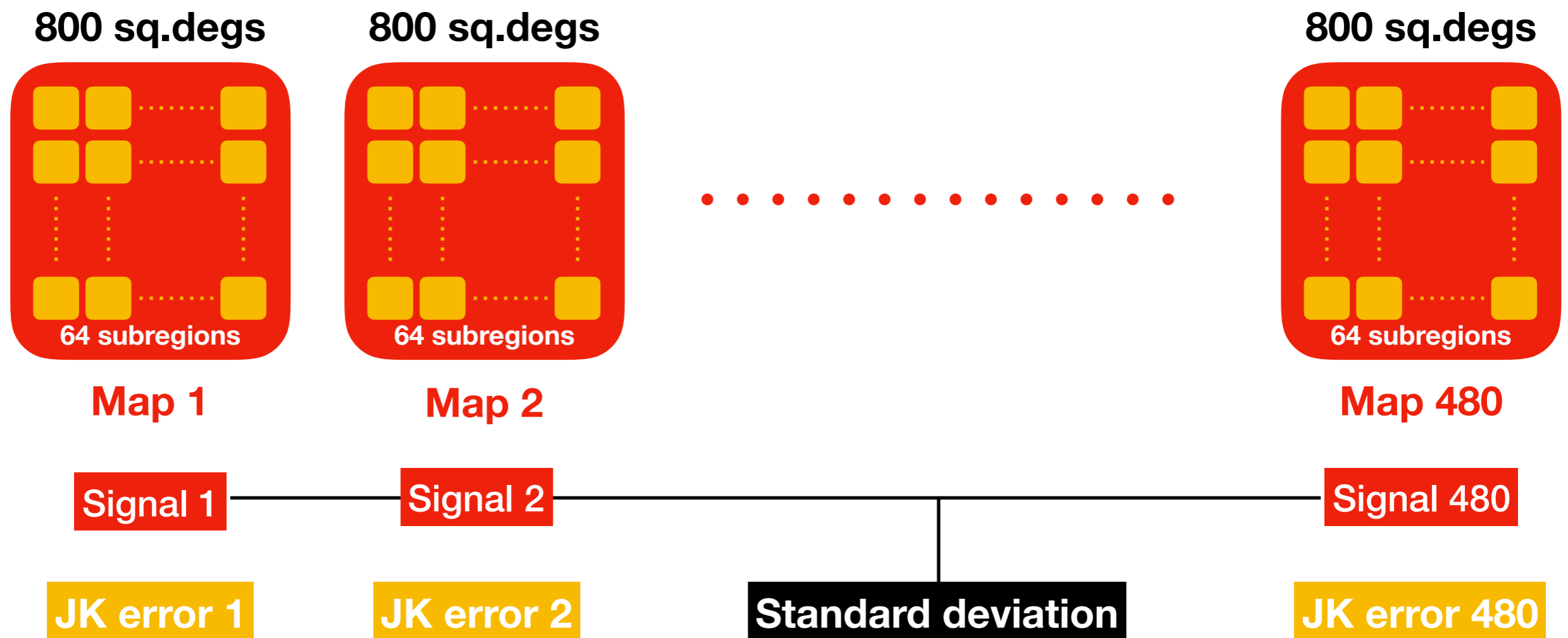


# Simple case

## Mass-limited sample

### + Absence of shape noise

$M_{200m} > 10^{13.5} M_{\text{sun}}/h$ ,  $z_{\text{lens}} = 0.10-0.27$   
 $z_s=0.5$ , source number density of  $\sim 5.4 \text{ arcmin}^{-2}$   
480 realizations with the sky coverage of  $\sim 800 \text{ sq.deg}$



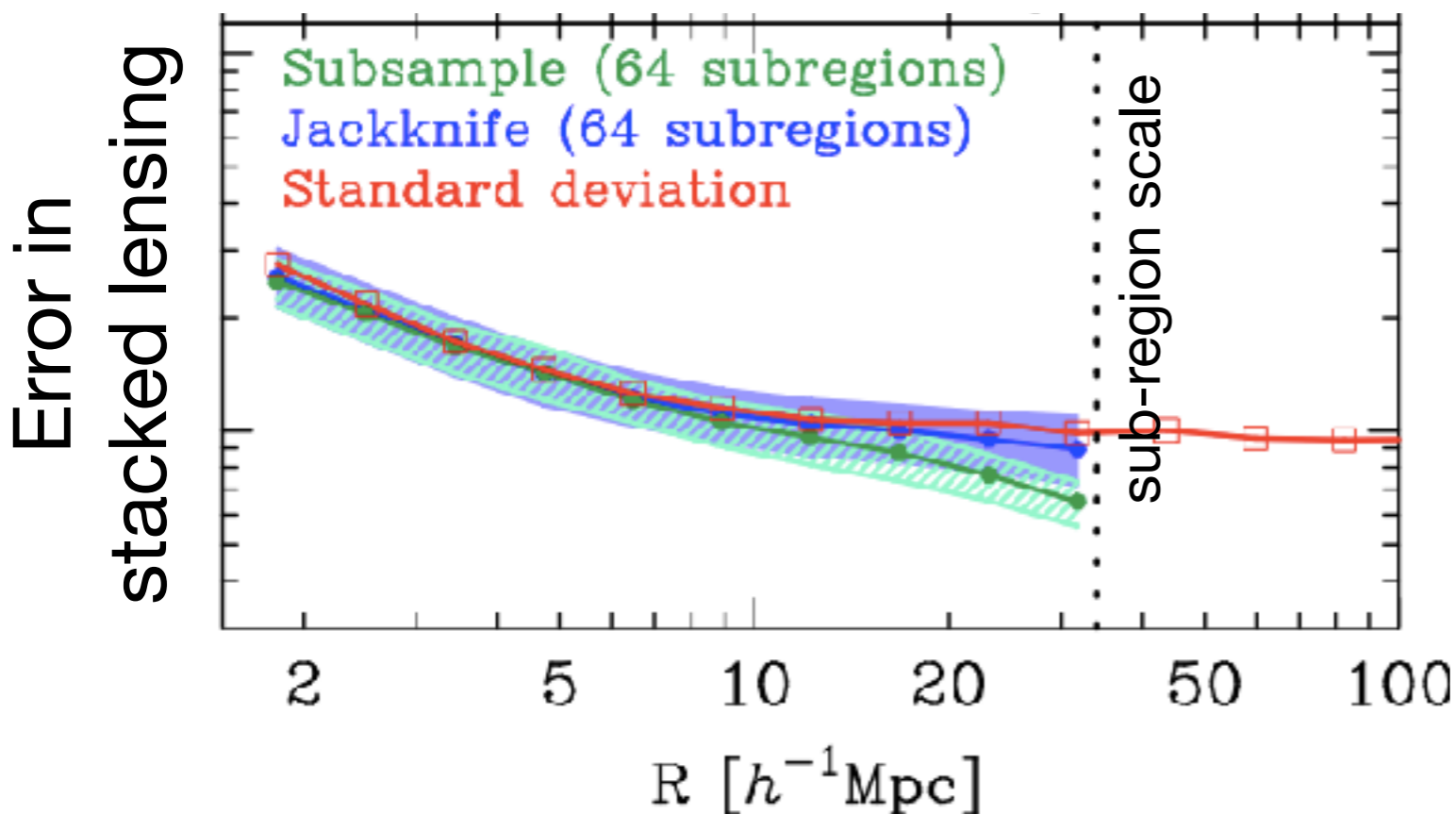


# Simple case

## Mass-limited sample

### + Absence of shape noise

$M_{200m} > 10^{13.5} M_{\text{sun}}/h$ ,  $z_{\text{lens}} = 0.10-0.27$   
 $z_s=0.5$ , source number density of  $\sim 5.4 \text{ arcmin}^{-2}$   
480 realizations with the sky coverage of  $\sim 800 \text{ sq.degs}$



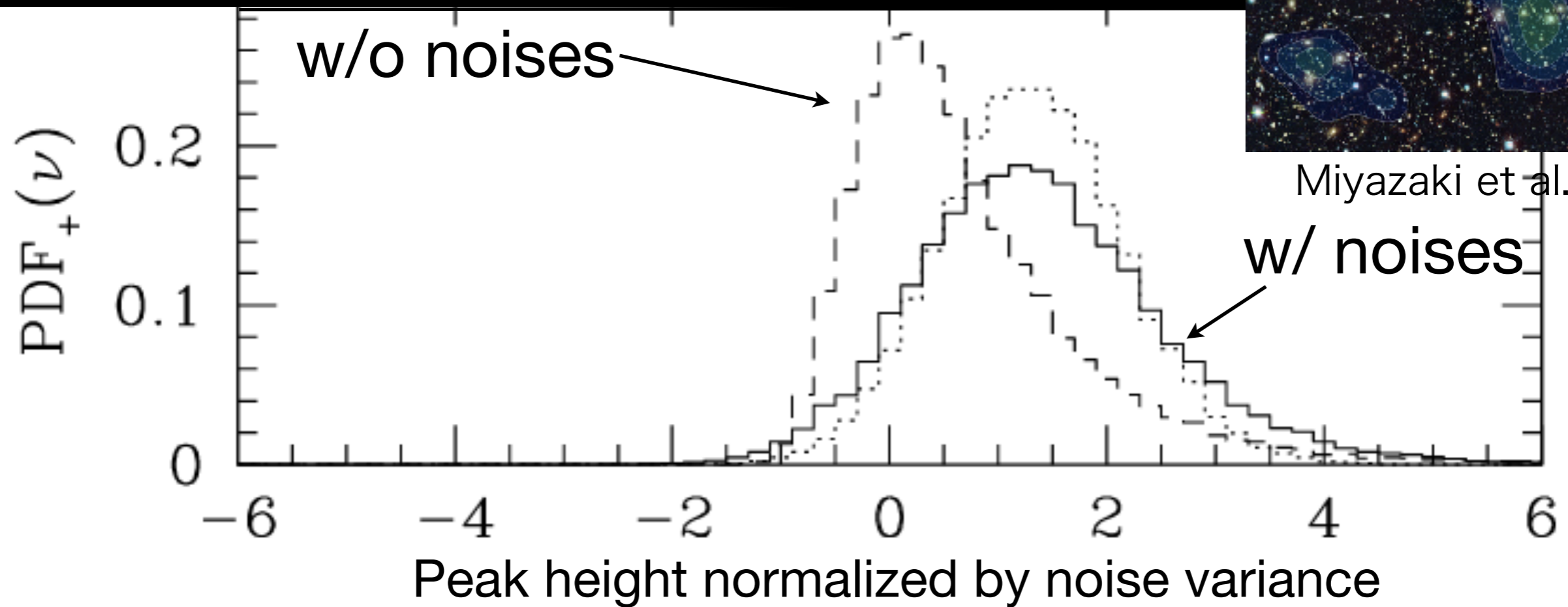
### Subsample covariance

Rescaled covariance for the subregion by a factor of area ratio

$$\mathbf{C}(\text{subsample}) = \frac{\Omega_{\text{sub}}}{\Omega_s} \mathbf{C}(\text{subregion})$$

# 実験的/発見的アプローチ1

## 二点統計以外の宇宙論情報



?

It is called  
medium peak



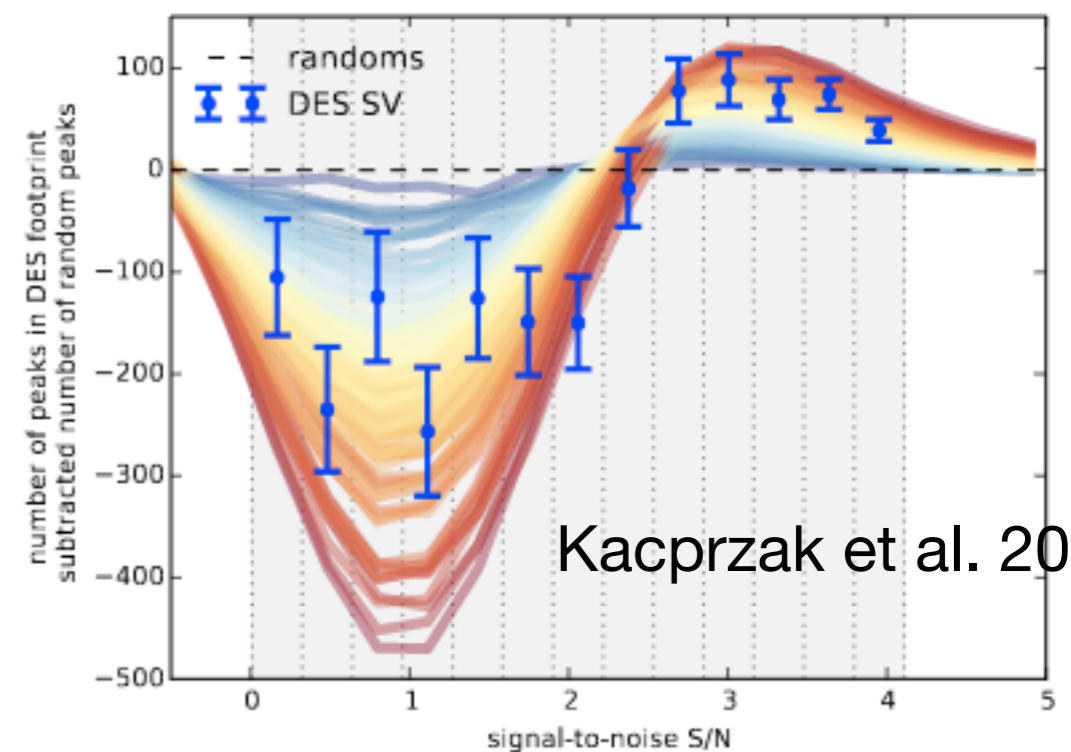
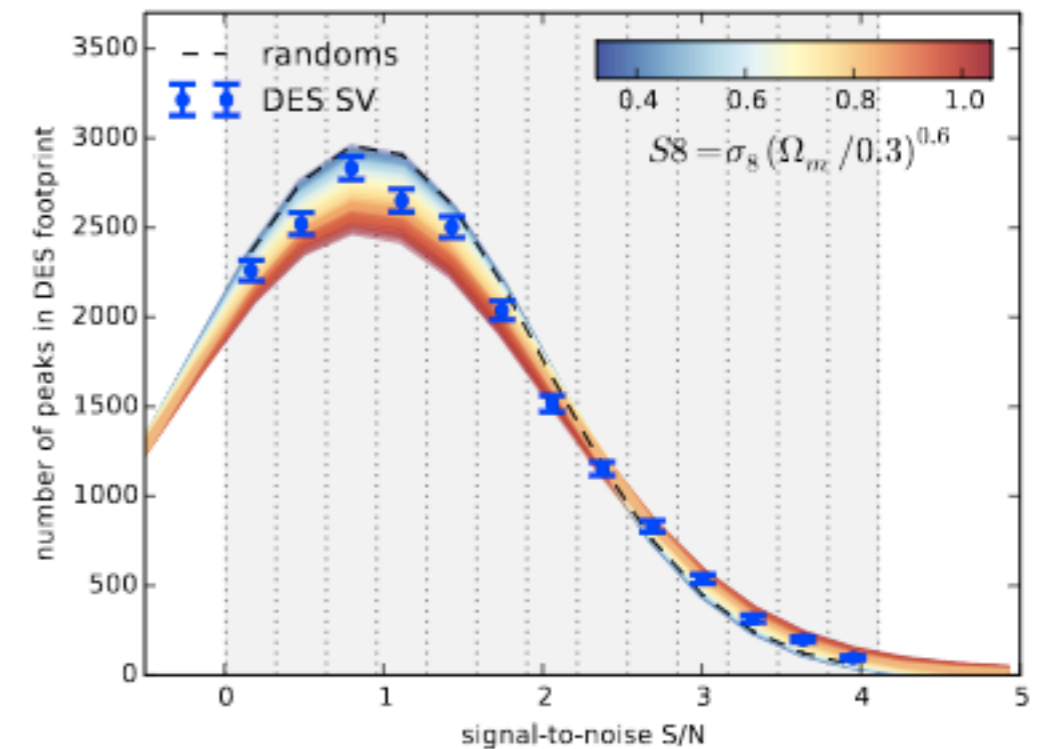
likely to be  
associated with  
massive halo

# Cosmological information in medium peaks

- ▶ Although their height may be determined by observational noise....

- ▶ Kratochivil et al. (2010) have shown the dependence of DE on number density of medium peaks
- ▶ Shirasaki et al. (2016) have shown the dependence of modified gravity similarly

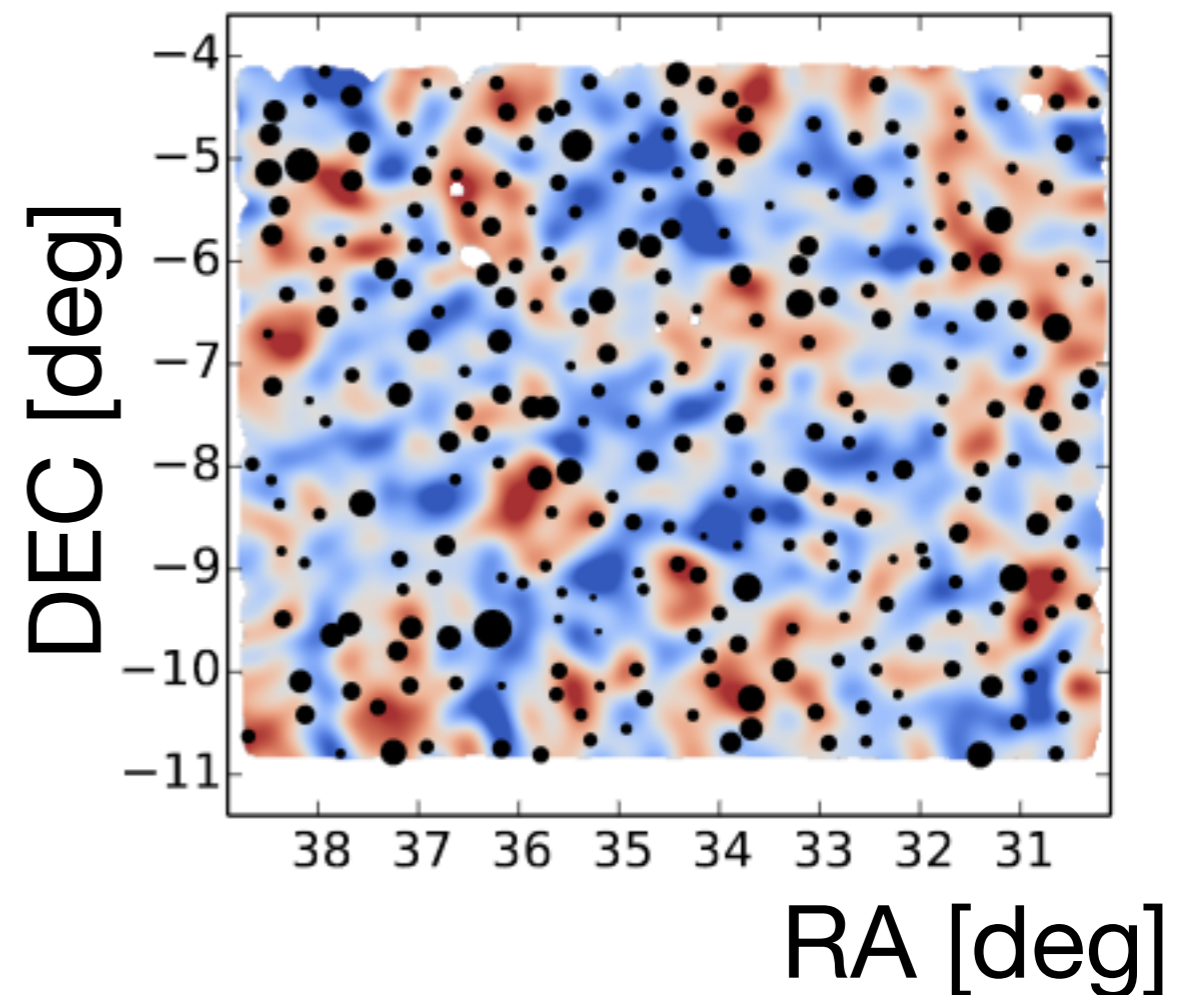
- ▶ Real data also have shown their abundance cannot be explained by noises alone



Kacprzak et al. 2016

# What is the origin of medium peaks?

- ▶ Liu & Haiman (2016) have measured the cross correlation between medium peaks and galaxies
- ▶ They found the significant correlation, showing medium peaks does not distributed randomly and might be associated with galaxy number density



Colored map shows the galaxy number density

# Decomposition of information contents

- ▶ What is relevant for the abundance of medium peaks?
- ▶ We shall decompose possible information contents into multiple-point distributions
  - ▶ one-point distribution
  - ▶ two-point distribution, or power spectrum
  - ▶ three-point distribution, or bispectrum
- ▶ If we can construct a model with the same PDF and power spectrum as real, is it sufficient to explain the abundance of medium peaks?

# Local-Gaussianized model

Assuming a local transformation

$$\mathcal{K}(\boldsymbol{\theta}) = \mathcal{F}(y(\boldsymbol{\theta}))$$

Set  $y$  to be Gaussian

One-point distribution:

$$\int_{\mathcal{K}} d\mathcal{K}' P(\mathcal{K}') = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{y}{\sqrt{2}} \right)$$

Two-point distribution:

$$\xi_{\mathcal{K}}(\phi) = \langle \mathcal{K}(\boldsymbol{\theta}) \mathcal{K}(\boldsymbol{\theta} + \phi) \rangle$$

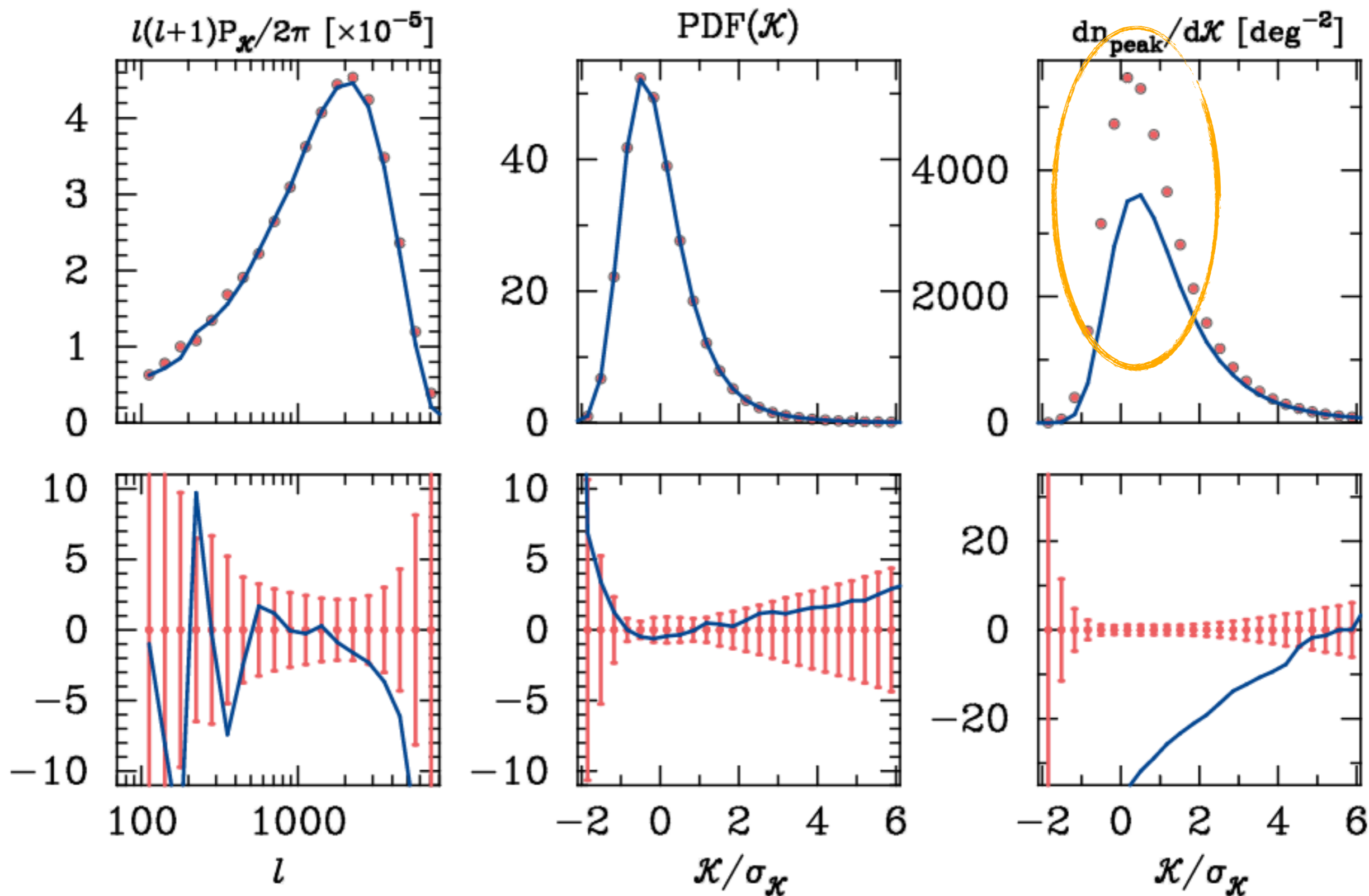
$$= \frac{1}{2\pi \sqrt{1 - \xi_y(\phi)^2}} \int_{-\infty}^{\infty} du_1 \int_{-\infty}^{\infty} du_2$$
$$\times \exp \left( -\frac{u_1^2}{2(1 - \xi_y(\phi)^2)} \right) \exp \left( -\frac{u_2^2}{2} \right)$$
$$\times \mathcal{F}(u_1 + \xi_y(\phi)u_2) \mathcal{F}(u_2). \quad \xi_y(\phi) \equiv \langle y(\boldsymbol{\theta})y(\boldsymbol{\theta} + \phi) \rangle,$$

► This model can reproduce the original one-point PDF and power spectrum by construction

► The difference between the model and true data can be found at the level of three-point distribution

# Results

Shirasaki 2016



# 実験的/発見的アプローチ2

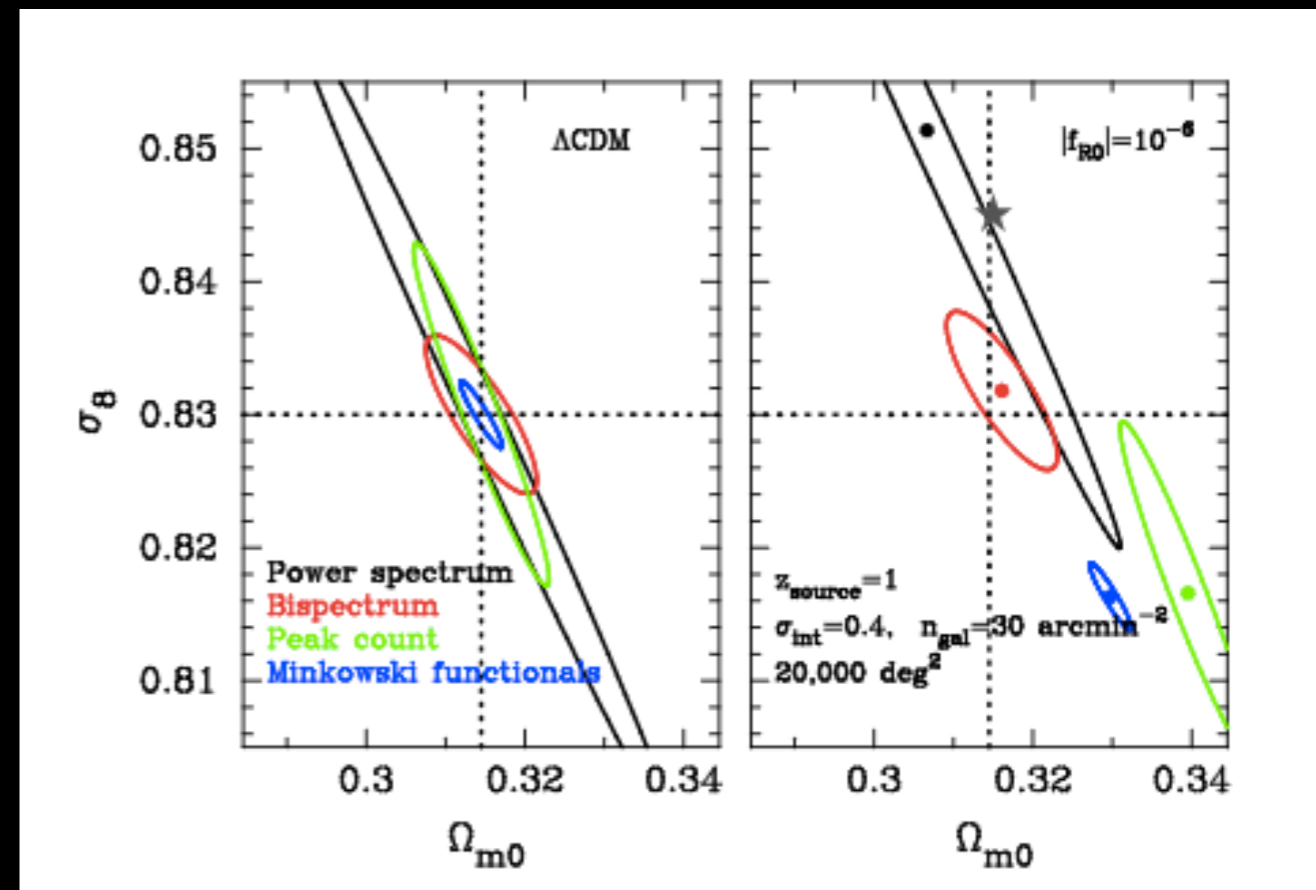
## 標準ではない宇宙論での解析

- 原始非ガウス性、修正重力理論、non CDMなど

複数のレンズ統計による  
 $\Lambda$ CDMモデル整合性テスト

- どういう統計量を見るのが一番よく制限できそうかを探るなど

- 複数の手法で制限することは大事



Shirasaki et al. 2016



# これからの課題

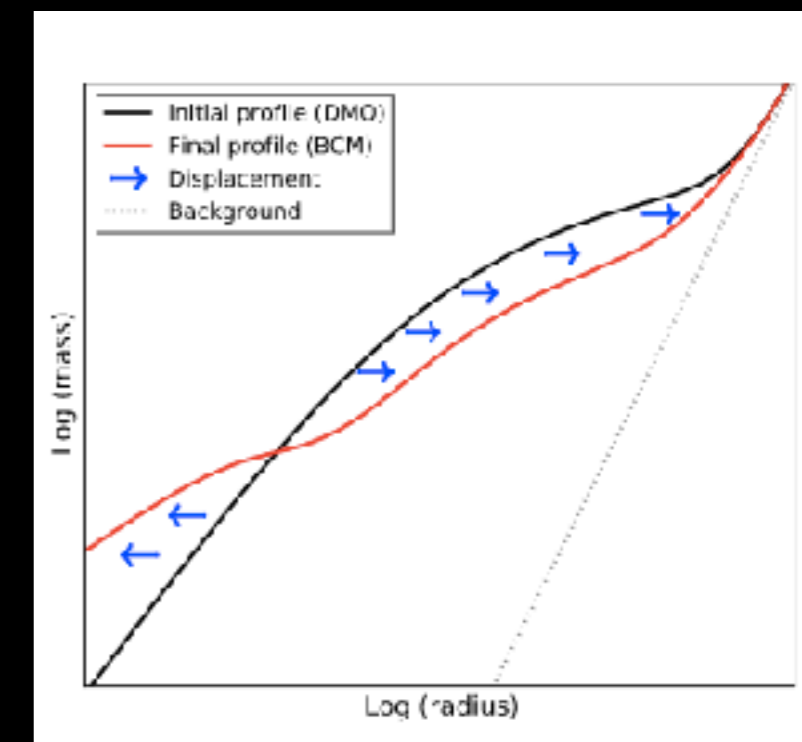
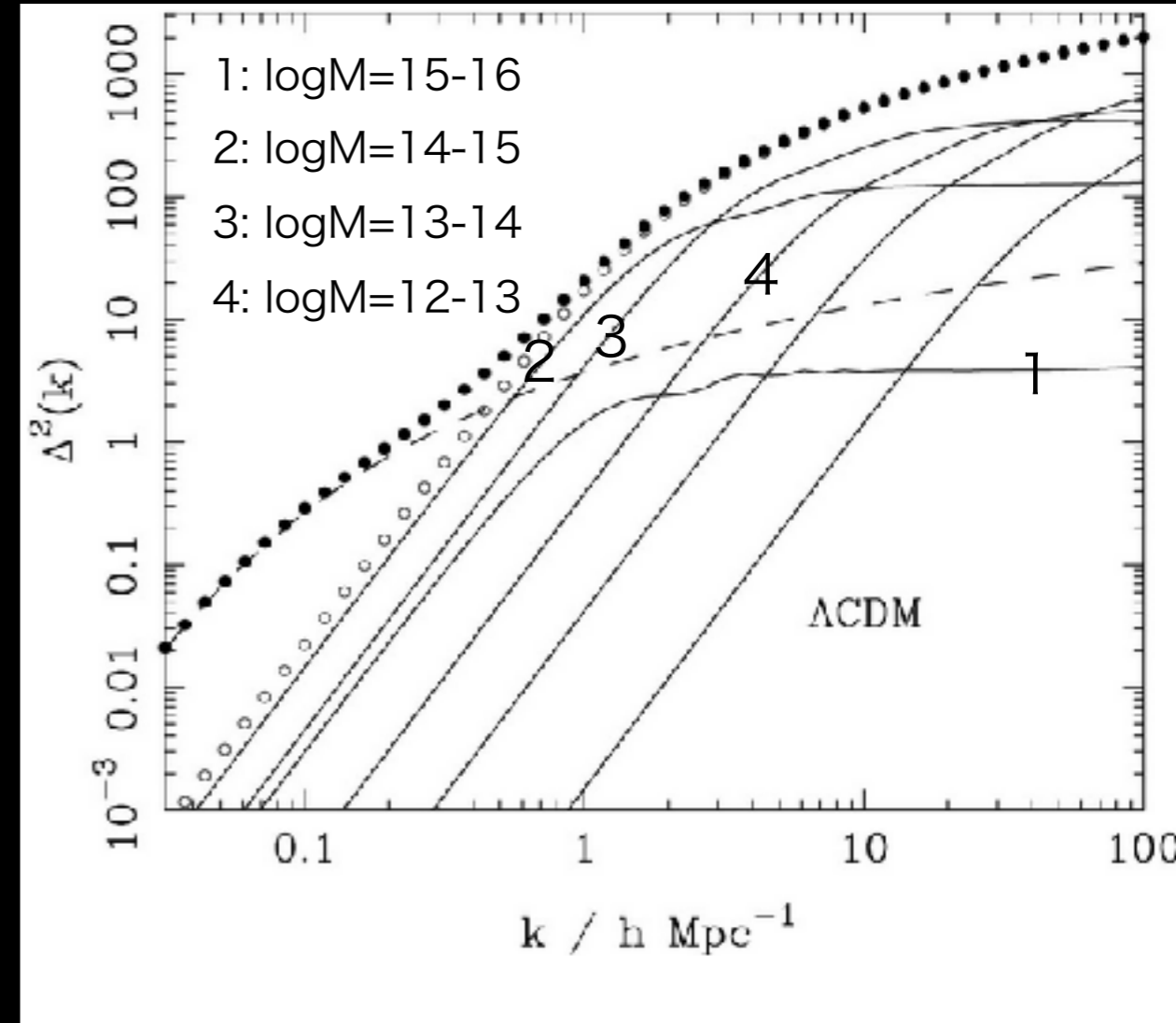
- non-Gaussian information
- バリオン物理
- Intrinsic alignment
- Covariance estimation

# Non-Gaussian information

- ・ 重力レンズ解析では、2点相関だけが全てではない
- ・ 3点相関、map-based statistics (PDF, peak, Minkowski functionals, ...)
- ・ N-point momentsは、random fieldの全ての統計的な性質を表すわけではない (e.g., Carron & Neyrinck 2012)
- ・ 色々あるけどもnon-Gaussian informationの得手不得手は？
  - ・ N-point statisticsは何が得意でどういう時に役立つのか
  - ・ Map-based statisticsはどうか？2点相関では説明できない情報は何か？
  - ・ Halo modelの成功から察するに、N-point statisticsはhigh density regionの情報で主に決まっている？
- ・ データへの応用は着々と進んでいるが (CFHTLenS, KiDs, DES) 、non-linear scaleまで理解が進んでいない

# バリオンの影響

- hydro計算をいっぱいやるのは今の所厳しい
- dark matter onlyの計算をたくさんやるのはそれなりに現実的
- subgrid physicsはよく分からない
- 適当なパラメータ+近似で不定性を評価する
- 例えば、baryon correction approach (e.g. Schneider & Teyssier 2015)
  - N体計算でできたハローの中の分布を変更する
  - power spectrum以外の統計量でも使えるかも



# Intrinsic Alignment

- hydro計算 + 観測結果に基づいた適当なパラメトリゼーションをN体に組み込む
- 今やミレニアム計算クラスのN体はすぐ終わる  
( $N=2048^3$ ,  $L=500$  Mpc/h  $\rightarrow$  約1週間)
- 準解析的なアプローチが有効ではなかるうか
- cluster memberによるdilutionの効果なども調べられるだろう

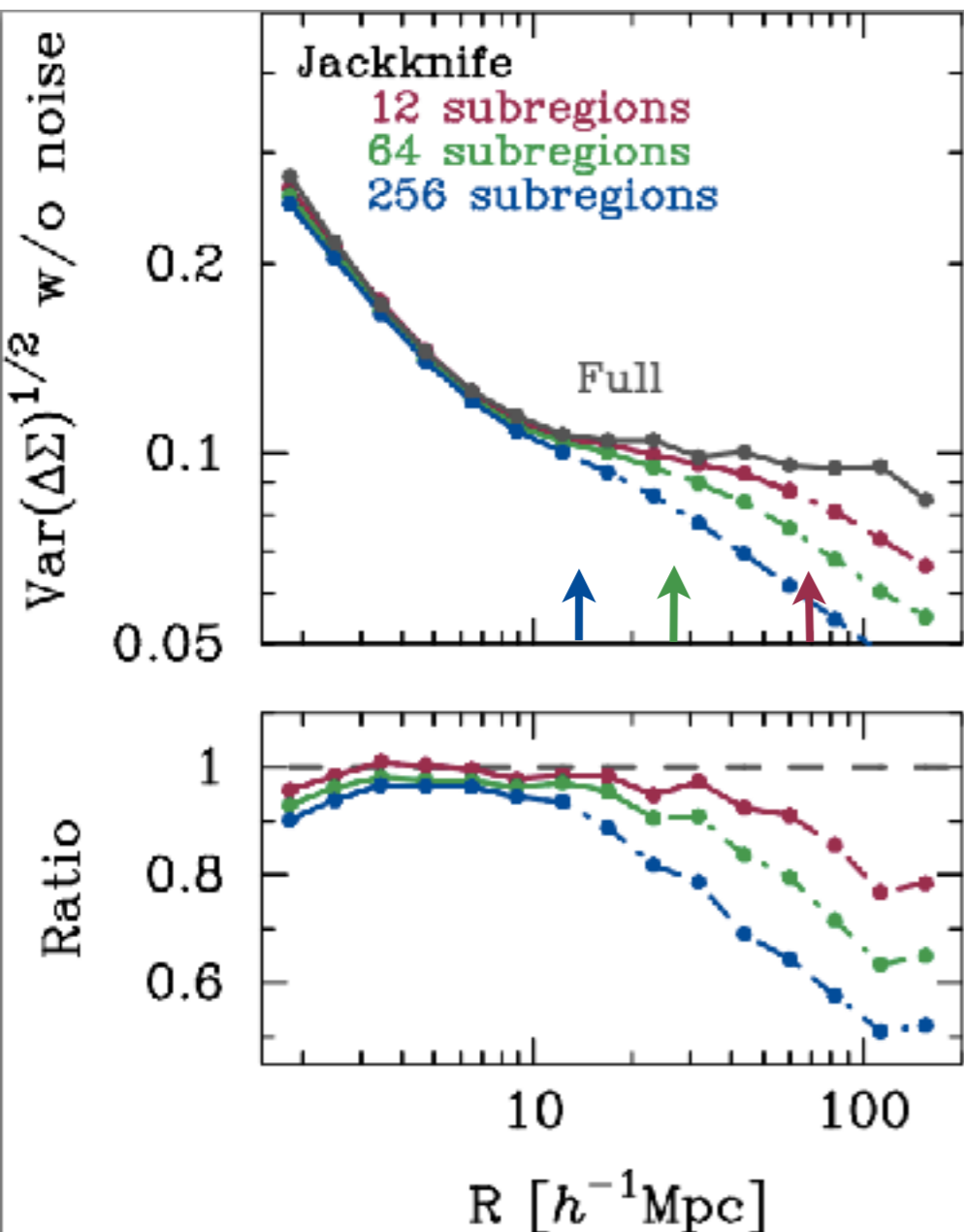
# Covariance

- ・ データベクトルはこれからどんどん増えます
- ・ どれくらいmock realizationsが必要なのかみんな常に不安
- ・ Super-sample covariance approach (e.g. Takada & Hu 2013)
  - ・ もう少しテストが必要そうだが、二点統計なら未来は明るそう
- ・ (夢の) Joint analysis of possible LSS probes
  - ・ Cosmic shear + galaxy position + tSZ + CMB lensing + etc.
  - ・ (おそらく最強の) Self-calibration technique
  - ・ Dark Energy, massive neutrino, 修正重力, どこまでわかる？

# まとめ

- ・ およそ15年くらいで、弱重力レンズ解析は宇宙論研究の基本ツールの一つに
- ・ 数値シミュレーションを用いた研究手法は順調に進展してきた
  - ・ 非線形効果が及ぼす統計量への影響
  - ・ 多数のシミュレーションを用いた新しい統計量の開拓
  - ・ モックカタログの作成とそれらの応用
  - ・ 大統計時代に耐えうる高精度理論モデルの構築
- ・ 次の15年、観測データは着実に増加、 $\Lambda$ CDMの検証からNew physicsの探査へのパラダイムシフトに向けて、やれることはまだまだあります

# Dependence of area division for a fixed total area



$M_{200m} > 10^{13.5} M_{\text{sun}}/h$ ,  $z_{\text{lens}} = 0.10-0.27$   
 $z_s=0.5$ , source number density of  $\sim 5.4 \text{ arcmin}^{-2}$   
480 realizations with the sky coverage of  $\sim 800 \text{ sq. deg}$

## General trends

On small  $R$  compared to the size of subregion, jackknife method gives a unbiased estimate.

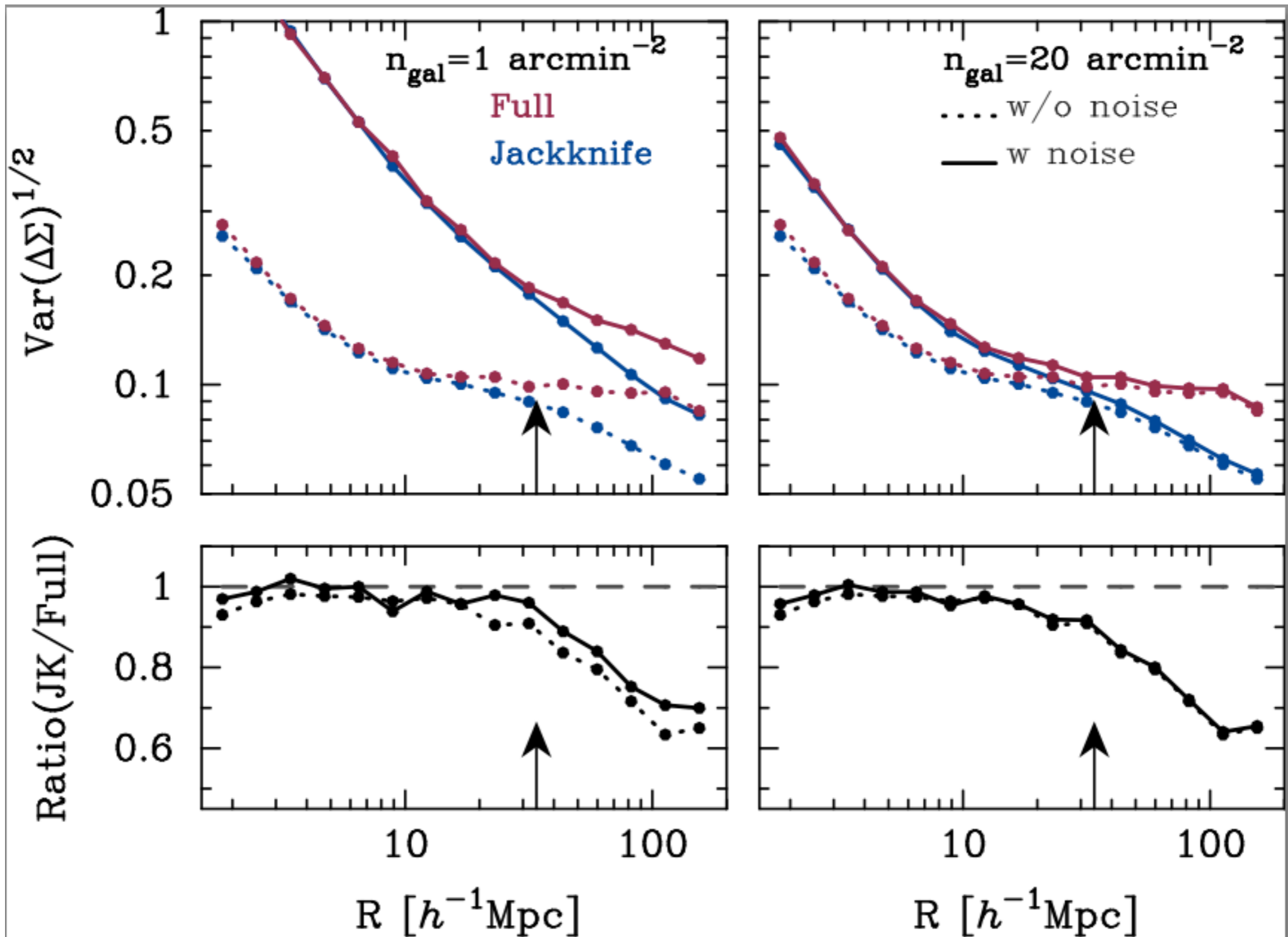
The expected JK variance provide an estimate of the true variance with  $\sim 20\%$  accuracy.

The JK covariance for a finer subdivision (i.e. a larger number of subregions) starts to deviate from the full covariance at relatively smaller separation.

At the larger separations, the curve starts to decrease

# Effect of shape noise

SDSS-like



Subaru HSC-like