

大規模N体シミュレーション群を用いた

宇宙大規模構造の精密理論モデルの構築

西道 啓博

(東大Kavli IPMU; JST CREST)

Our mission

300 nights of observation “HSC sky survey” using Subaru
2014-2019. About 1PB of data
in 5 years.

Survey Data will be
released in 2016,
2018, and 2020.

Kavli IPMU

- Sky survey data
- Data visualization
- Supercomputer sim.

NTT/ISM

- Obj. classification by
machine-learning
- Bayesian statistics
and computing

Tsukuba

- Extremely
parallel pipeline
- High-speed
distributed
database

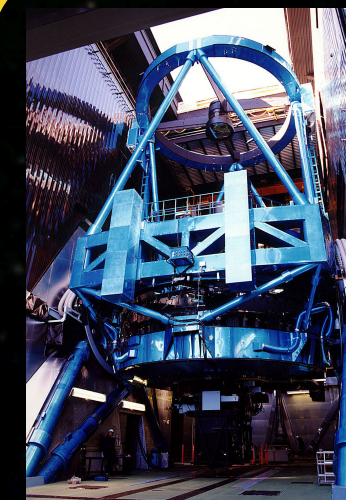
PI: 吉田 直紀

JST CREST 「ビッグデータ応用」

広域撮像探査観測のビッグデータ解析による統計計算 宇宙物理学

2014年10月 ~ 2020年3月

Subaru Hyper-Suprime Cam

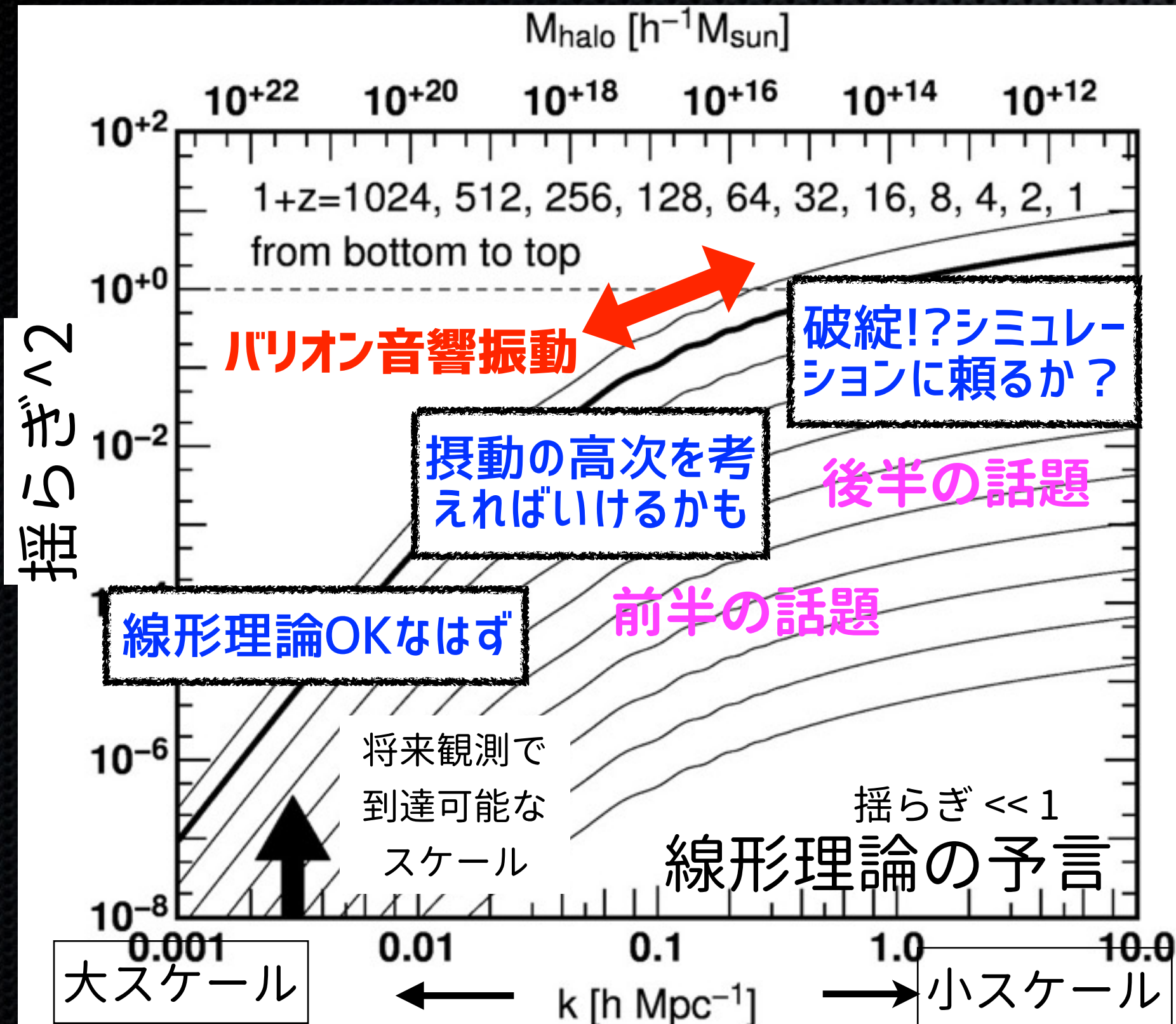


104 CCD

1.5 degree
Field of View

1 Giga pixel per snapshot.
Typically 15 min exposure.
Five broad band filters are
installed. The camera will
produce a total of 1 Peta
Byte of data in five years.

宇宙論的揺らぎの距離・時間依存性



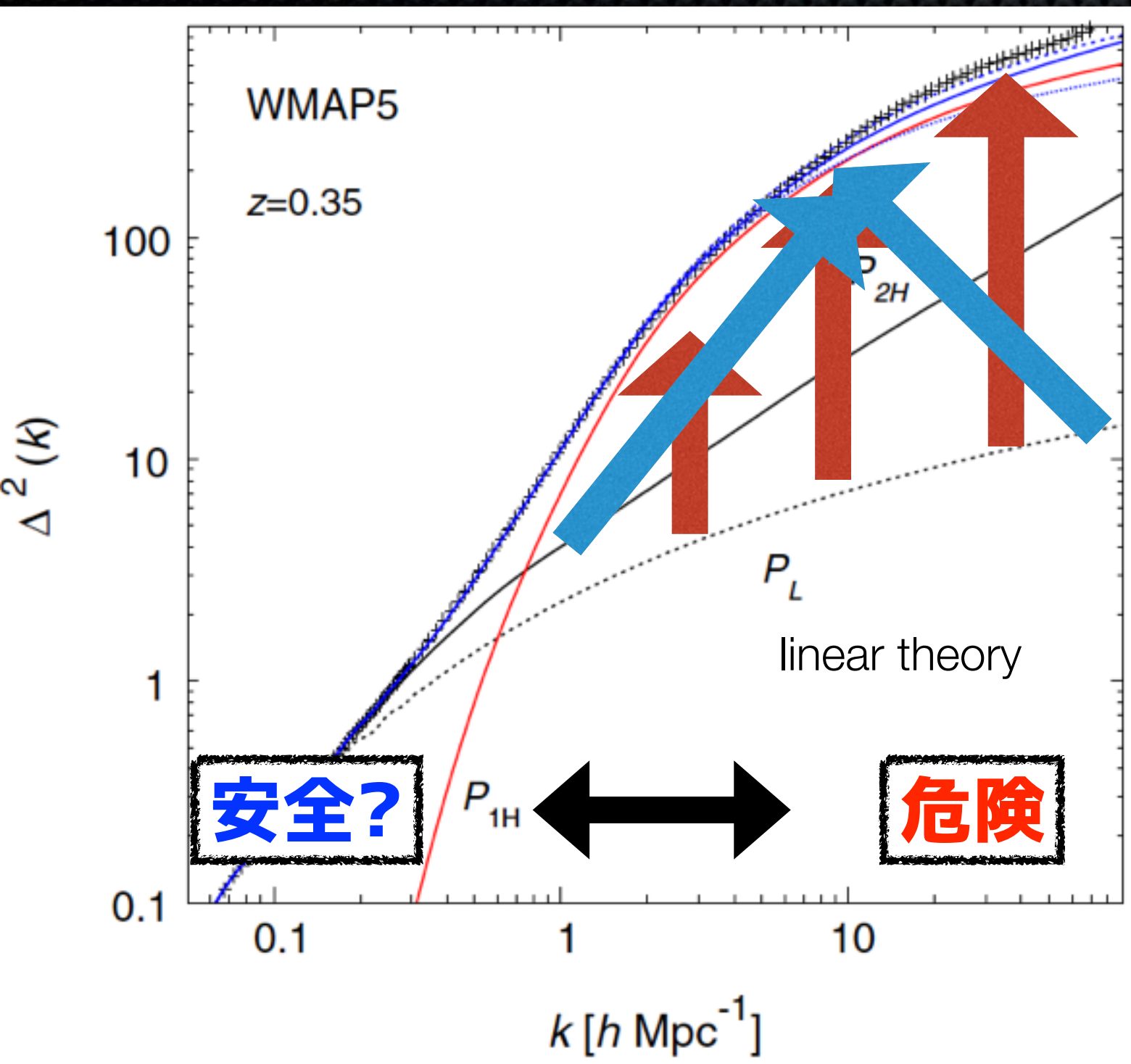
$$\langle \delta_{\vec{k}} \delta_{\vec{k}'} \rangle = (2\pi)^3 \delta_D(\vec{k} + \vec{k}') P(k)$$

$$\Delta^2(k) = \frac{k^3 P(k)}{2\pi^2}$$

- ✦ 小スケールから順次非線形段階へ
- ✦ ギガパーセククラスの巨大な観測が進行・計画中
- ✦ BAOのスケールは線形から非線形段階への過渡期→擾動論の有効性？
- ✦ より小さいスケールに行くと、擾動展開やsingle stream近似がいよいよ破綻してくる

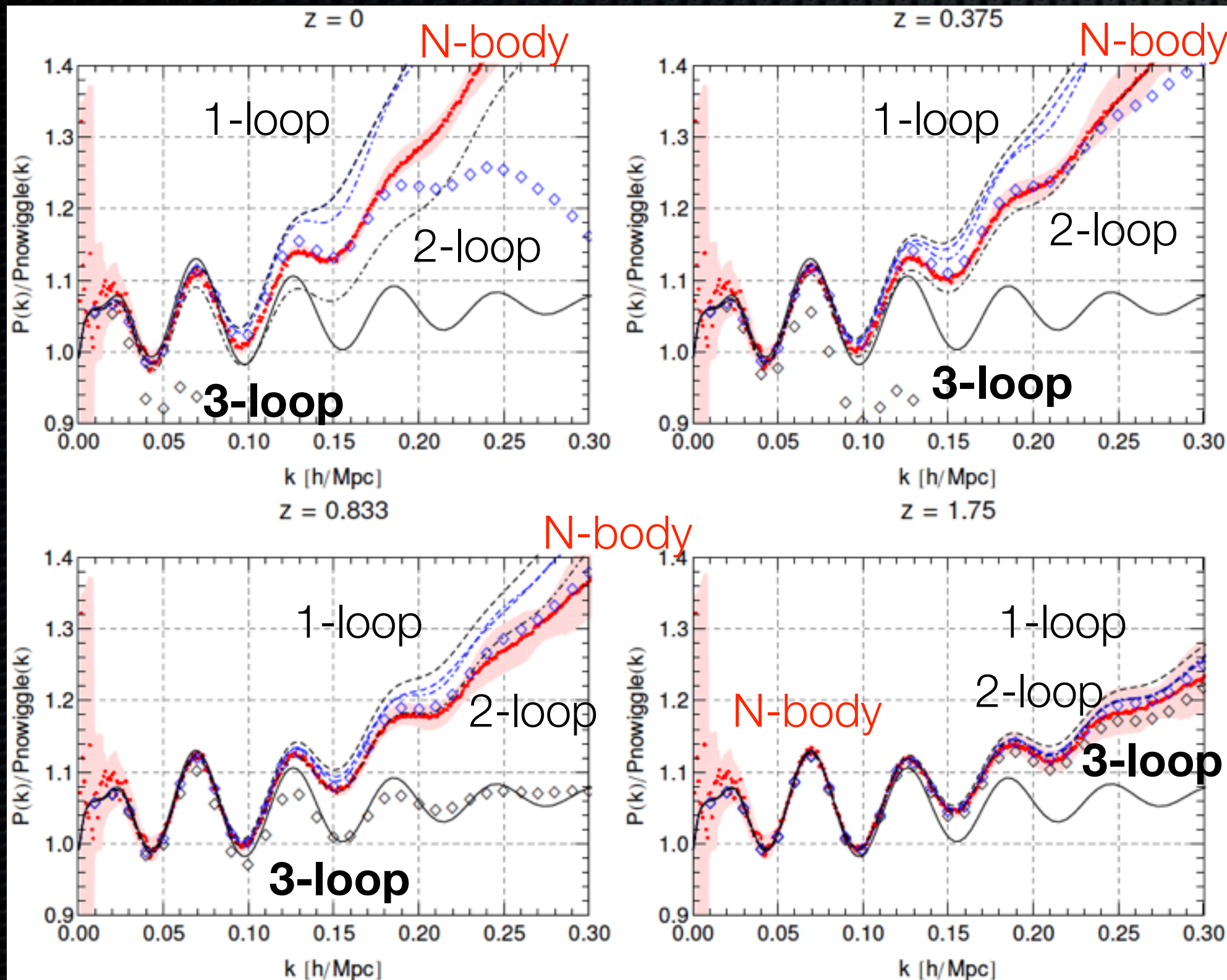
シミュレーションで探る摂動論的アプローチの可能性と限界

非線形構造進化 = 異なるスケール間のモード結合



- ✦ 揺らぎが大きい → 非線形性が大きい
- ✦ 異なる波数のモードはもはや独立でなくなる
- ✦ 小スケールではsingle-streamの流体近似ではダメだろうし、重力以外の様々な物理が入ってくるはず (ex. cooling, feedback, ...)
- ✦ もっとも単純かつ強力な摂動論的アプローチがどこでどのように破綻するのか理解することは極めて大切
- ✦ Q: 大スケールの揺らぎは忠実に“宇宙論”を反映? (初期条件+構成要素+重力法則)
- ✦ 次世代観測で統計誤差 > 系統誤差を保証する解析法を確立する

摂動論の限界!?



- これまでの摂動計算は1-または2-loop(揺らぎの4次ないし6次)の結果であった
 - 単純には次数↑で精度↑
- 通常の摂動計算@3-loop(8次!!)が最近やられたが、、、
 - 高次項が大きすぎる!!!!
 - 2-loopの“良い”結果は偶然と言わざるをえない
 - もはや摂動計算は諦めるべき?
- 摂動論大ピンチ!?

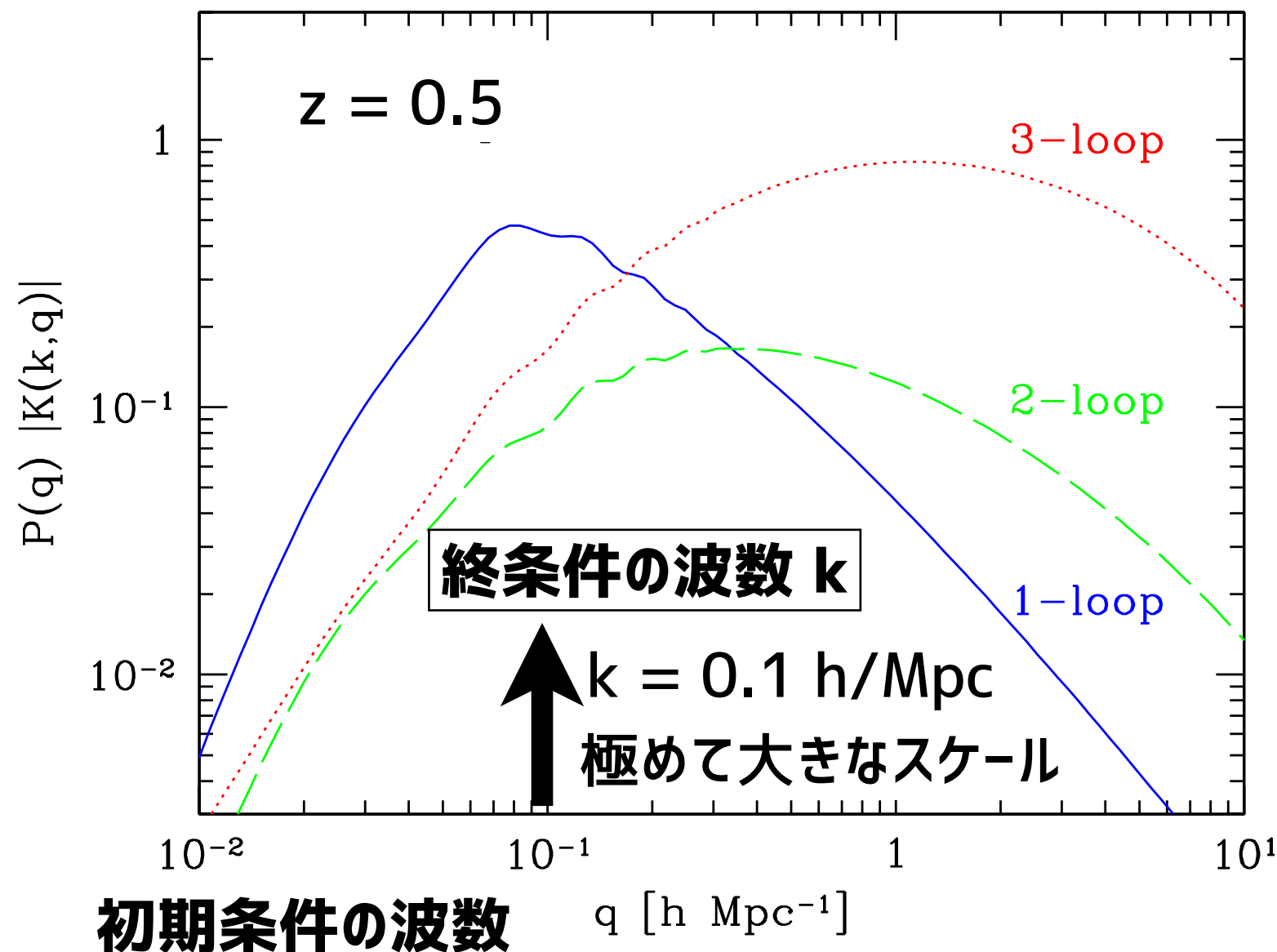
Blas, Garny & Konstandin '14

応答関数：何がどのようにまずいのか？

$$K_X(k, q) = q \frac{\delta X(k)}{\delta P_0(q)}$$

終条件
初期条件

波数qの波が波数kの波に与える影響



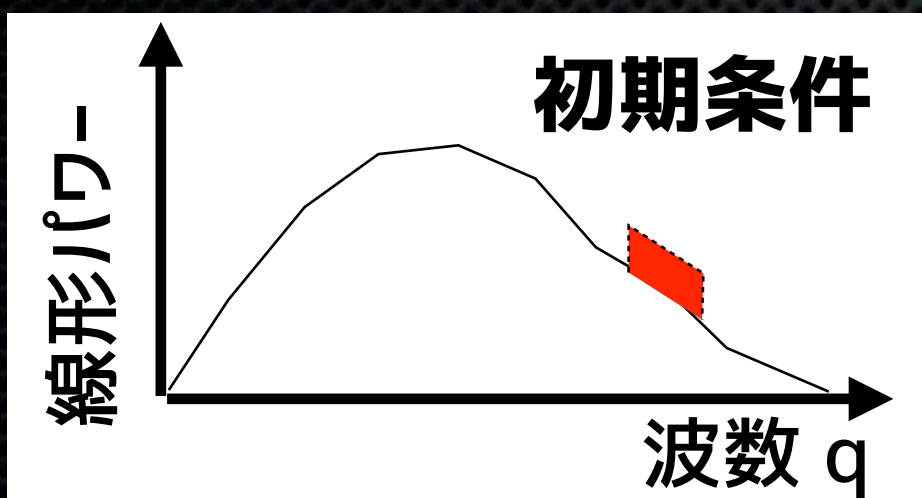
- 異なるスケール間のモード結合の構造に立ち返ってみる
- 2点の伝播関数のモード結合の構造を汎関数微分で定式化
- 波数 k (@ 時刻 t) の波は波数 q (@ 時刻 t₀) の波にどれだけ影響されるか?
 - 高次の寄与ほど大きい @ high q
 - あらゆるスケールで 3-loop > 2-loop!?
- 小スケール → 大スケールの結合に何かあるに違いない

モード結合を直接測る

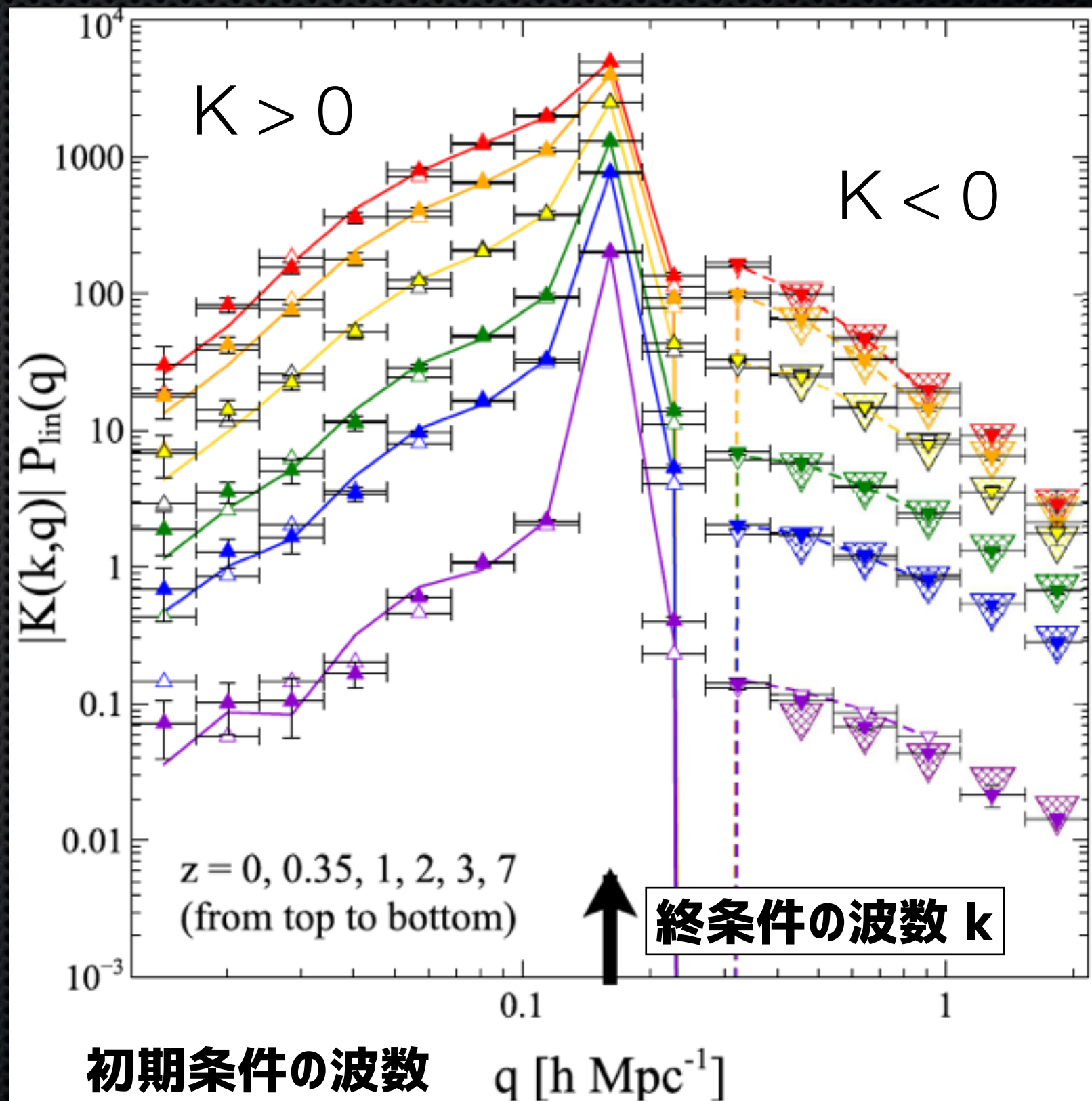
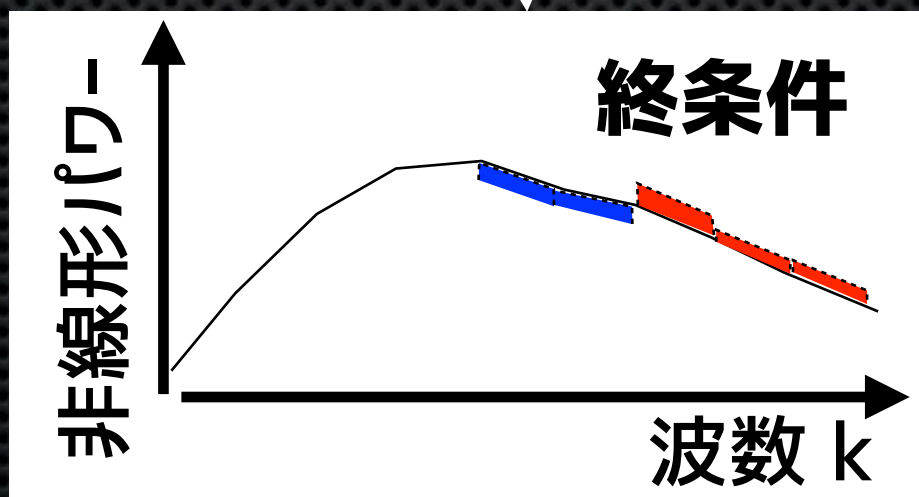
TN, Bernardeau, Taruya '14

- 逐次的な議論から、full orderの議論へ
- 微分をシミュレーションの差分で評価

$$\hat{K}_{i,j} P_j^{\text{lin}} \equiv \frac{P_i^{\text{nl}}[P_{+,j}^{\text{lin}}] - P_i^{\text{nl}}[P_{-,j}^{\text{lin}}]}{\Delta \ln P^{\text{lin}} \Delta \ln q}$$

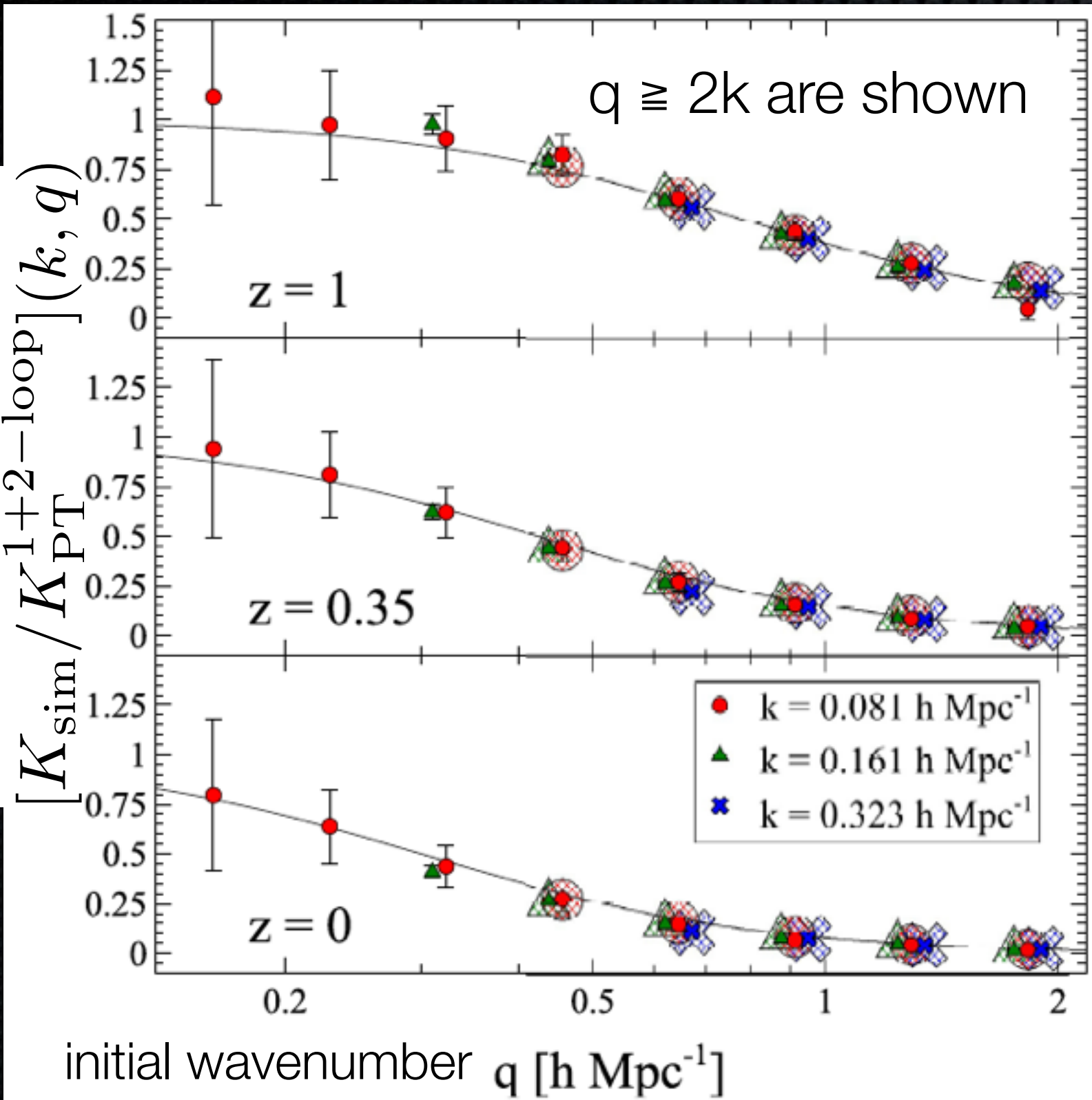


N体シミュレーション



小スケールからのモード輸送の減衰

$$K(k, q; z) = q \frac{\delta P^{\text{nl}}(k; z)}{\delta P^{\text{lin}}(q; z)}$$



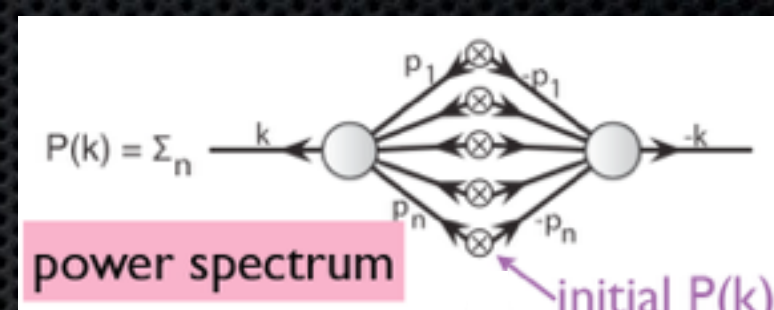
- ✦ high qで摂動論 >> シミュレーション
- ✦ ここがまさに摂動論計算が真っ先に破れる所
- ✦ 単純なローレンツ型の関数でよく説明できる

$$\frac{1}{1 + (q/q_0)^2}; \quad q_0 \text{ independent of } k$$
- ✦ 大スケールは何らかの機構で守られている?
 - ✦ shell crossing? → Effective Field Theory?
 - ✦ UV safeな理論構築に対する定量的な指針

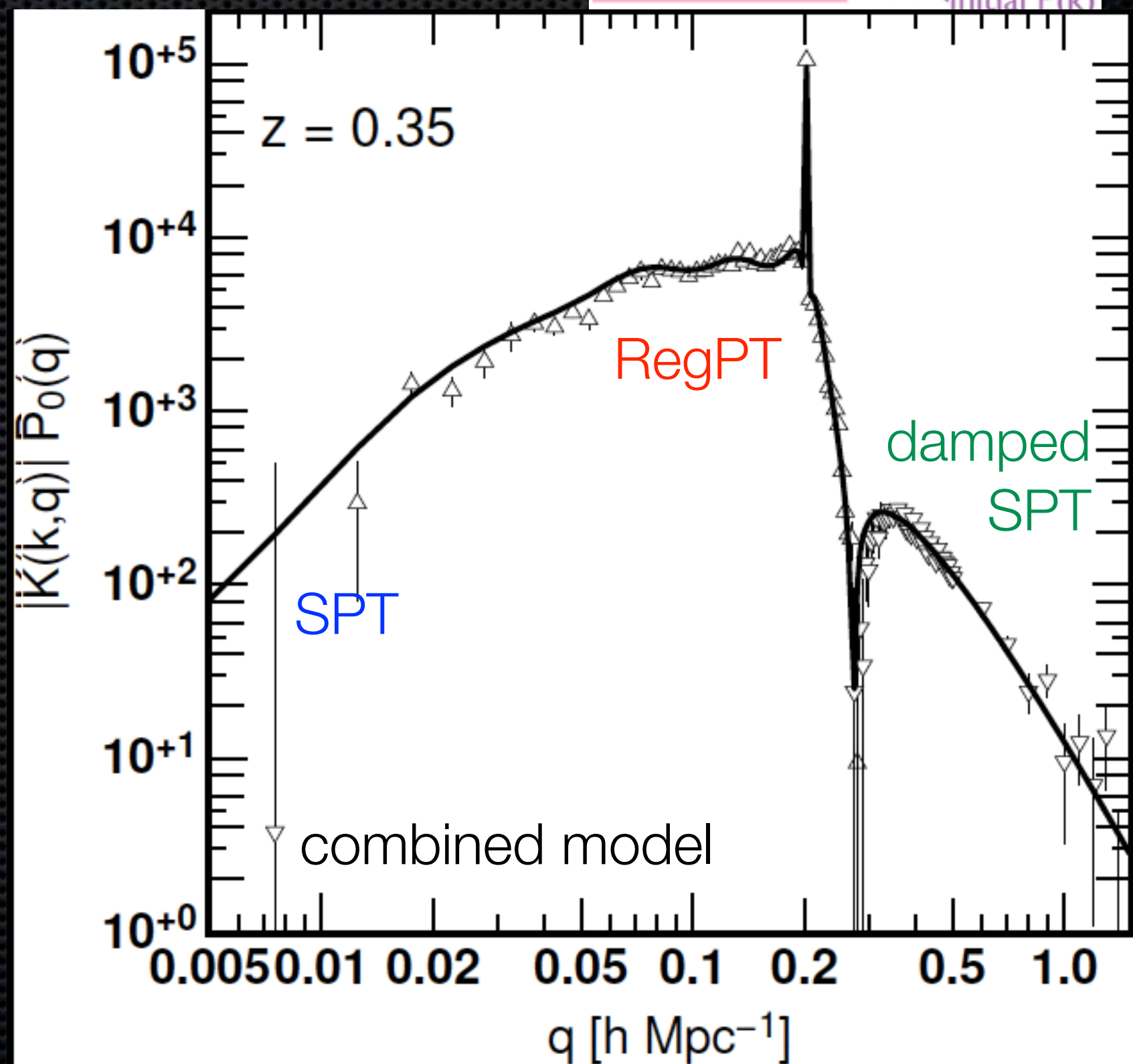
繰込摂動論と応答関数

「展開

data: 1400 sims.

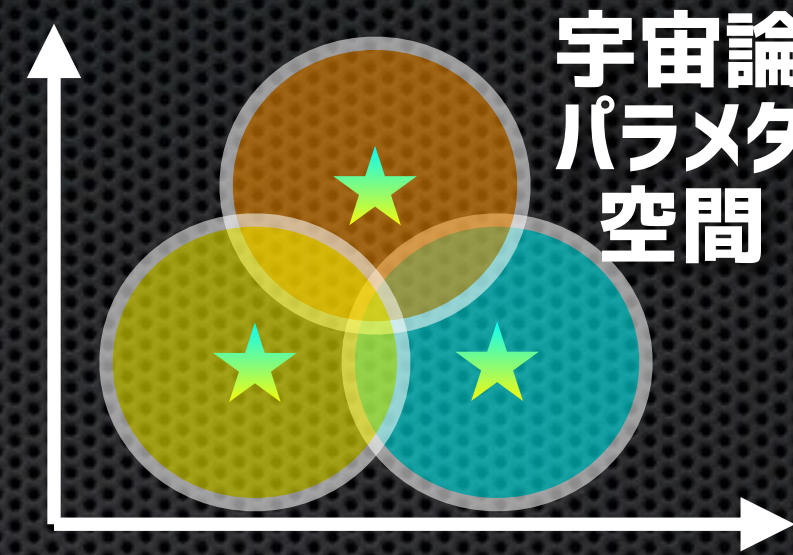
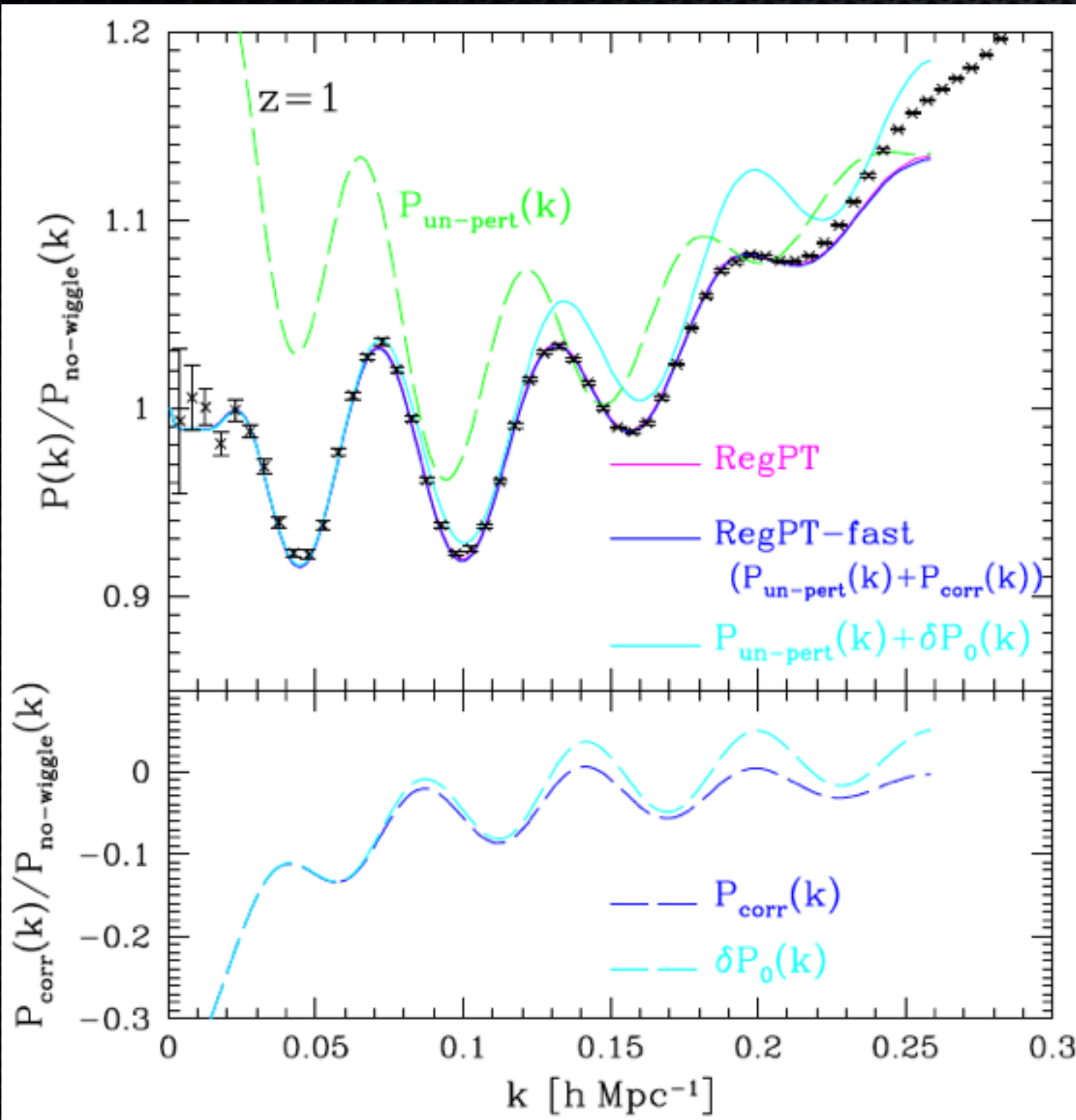


- 3-loop摂動論が破綻する一方で、上手くいっているように見える2-loop「繰込」摂動論
 - 計算の一部に「普通の」摂動論を利用
 - high-qの本質的な解決になっていない!!
- 3-loopの困難を知ってか知らずか伝播関数は1-か2-loop計算で評価されていた
- 応答関数レベルで見ると「展開はq~kの応答を非常に効率良く拾ってきていた
 - high-zで特に上手くいくのはまさにここが支配的だから
 - 実はlow-qも並進対称性を破り少し問題
- 欠点を補い合うことで広域をシームレスにカバーするモデルを構築



応答関数の応用: 宇宙論パラメタに対する応答

Taruya, Bernardeau, TN, Codis '12



$0.120 < \omega_m < 0.155$
 $0.0215 < \omega_b < 0.0235$
 $0.85 < n_s < 1.05$
 $-1.30 < w < -0.70$
 $0.616 < \sigma_8 < 0.9$

- ✦ 高次項の計算には多重積分が入る
 - ✦ 摂動論の実用上のもう一つの欠点

RegPT-fast

- ✦ 3つの模型につきスペクトルをあらかじめ計算
- ✦ 宇宙論パラメタに対する応答関数を元に、別の模型に対する予言を得る
- ✦ 計算は**1次元積分**に落ちる ~2, 3秒で計算可能

ハイブリッド応答関数を用いた理論構築

RegPT+ (仮名)

TN et al. in prep

汎関数微分の定義より

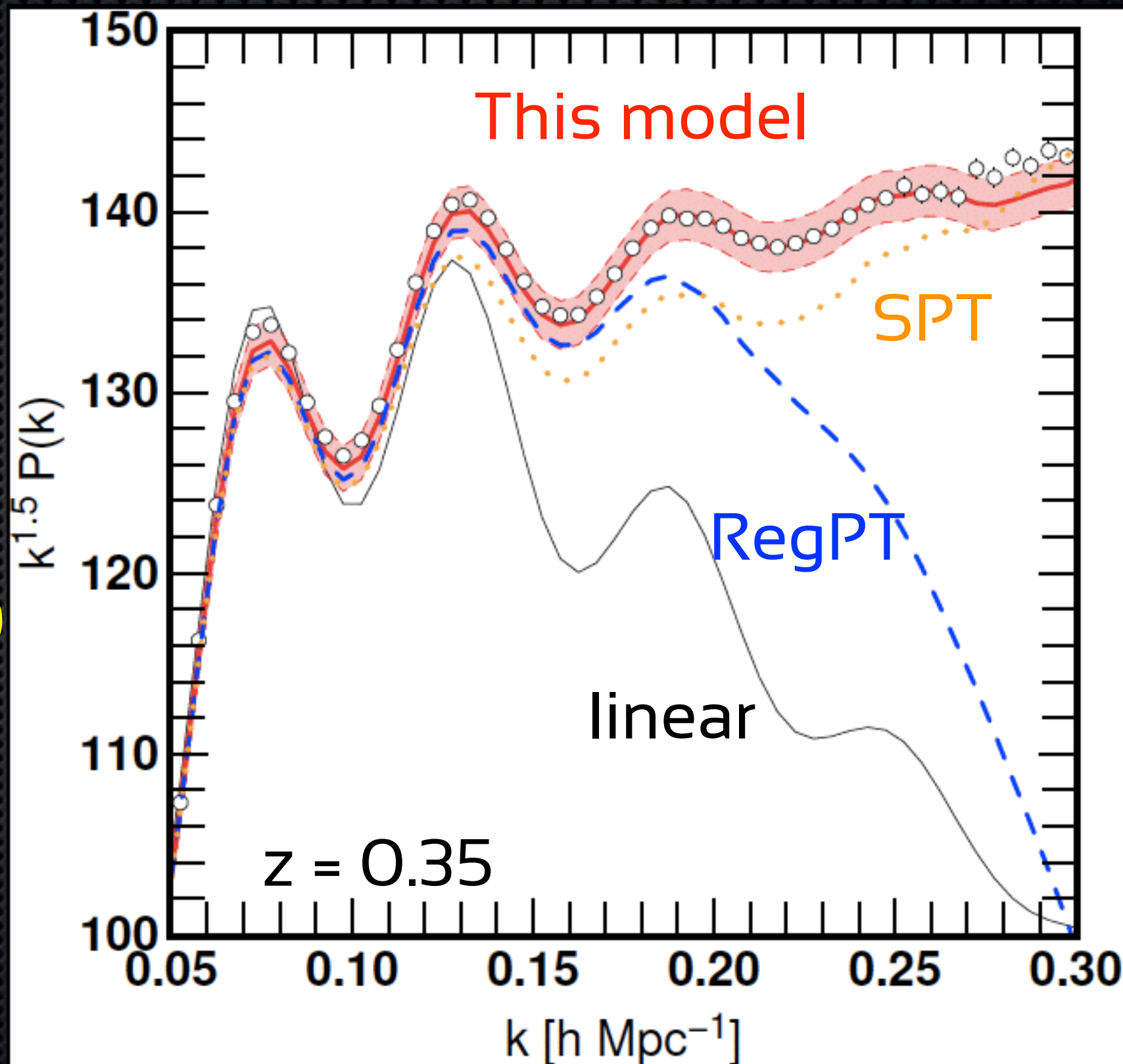
$$\Delta P_{\text{nl}}(k) = \int dq K(k, q) \Delta P_{\text{lin}}(q)$$

線形パワーの変化を時間進化と解釈する

$$\Delta P_{\text{lin}}(q) = P_{\text{lin}}(q; t + \Delta t) - P_{\text{lin}}(q; t)$$

この関係式を用いて少しずつ時間
進化させることが可能

**KにはSPT (damped)とRegPTを
組み合わせたものを利用**



ハイブリッド応答関数を用いた理論構築

RegPTfast+ (仮名) TN et al. in prep

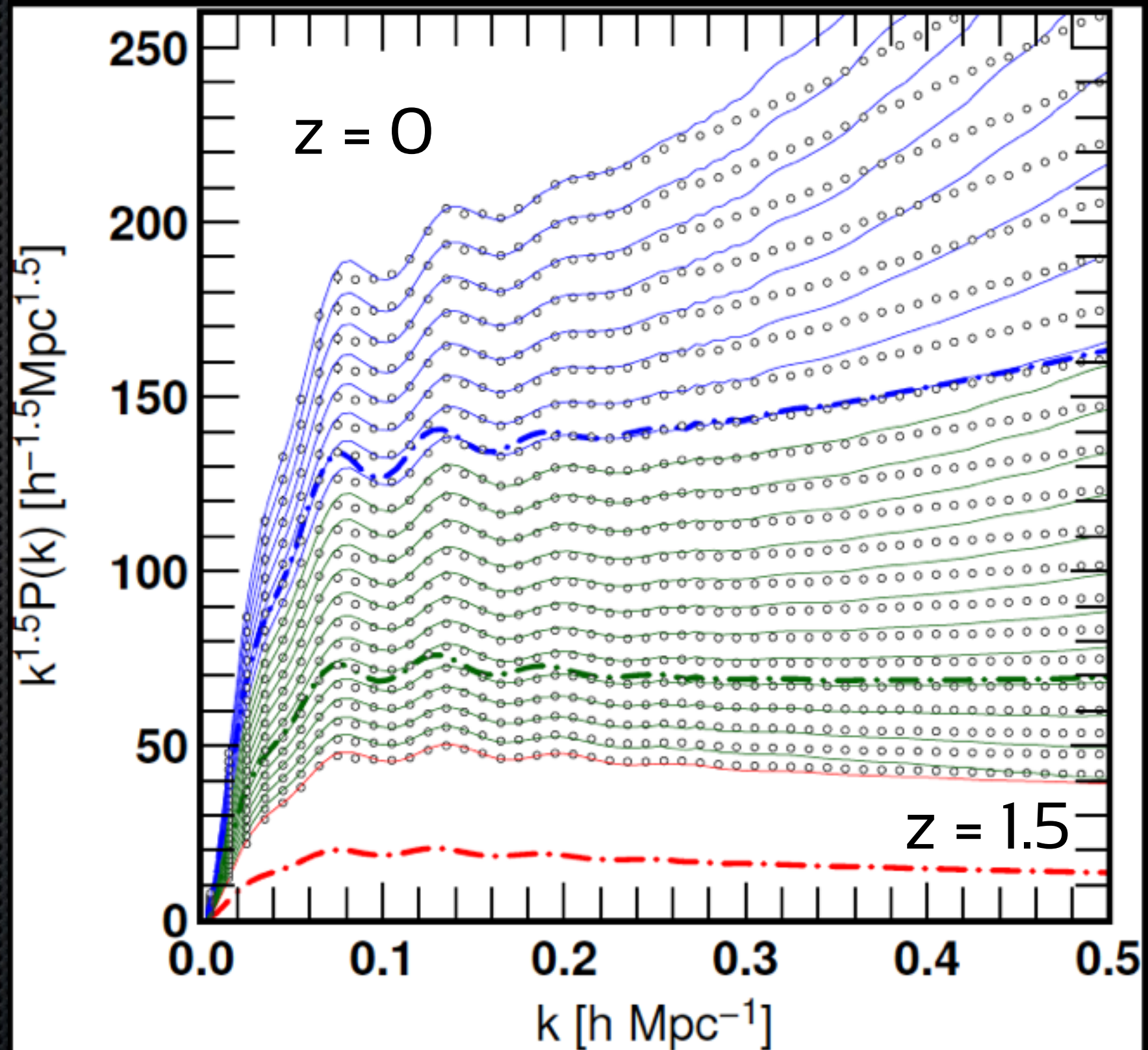
汎関数微分の定義より

$$\Delta P_{\text{nl}}(k) = \int dq K(k, q) \Delta P_{\text{lin}}(q)$$

線形パワーの変化を宇宙論パラメタの変化と解釈する

$$\Delta P_{\text{lin}}(q) = P_{\text{lin,target}}(q) - P_{\text{lin,fiducial}}(q)$$

WMAP5のシミュレーションデータ (点破線)
→ PLANCK15の予言 (実線)



シミュレーションと機械学習を利用
したgalaxy-galaxy lensing signal高精度
理論テンプレートの作成

Simulation effort

こういうのを大量に作って
“data driven”なサイエンスを追求

Simulations for Subaru HSC

✓ 高精度理論テンプレートの構築

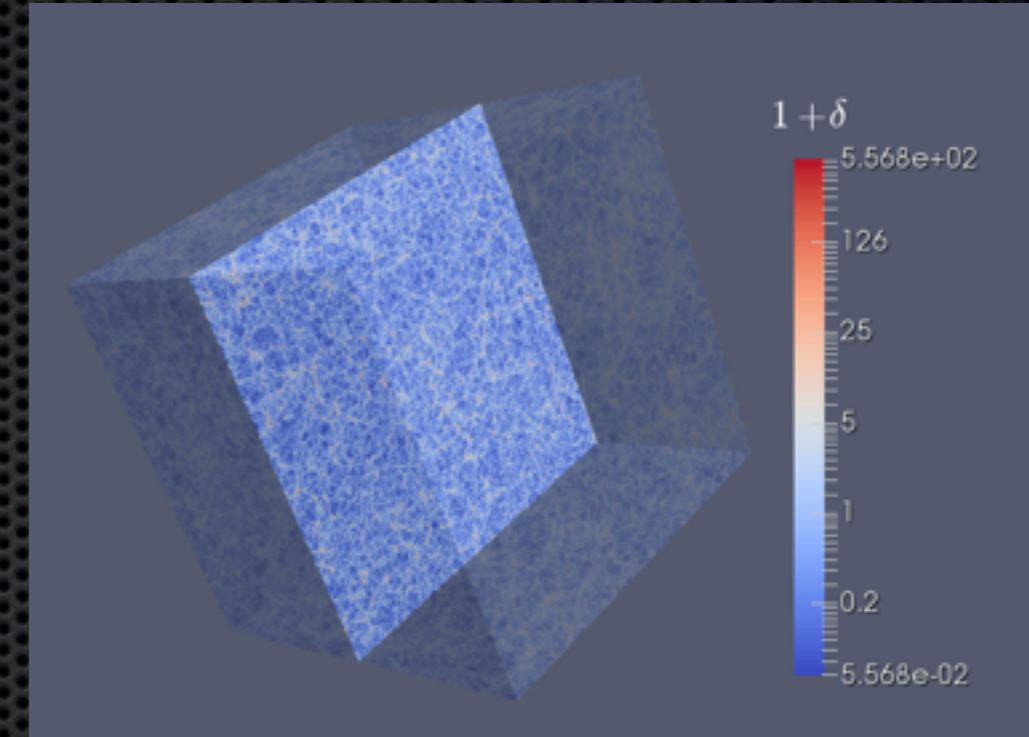
- ✓ Galaxy (cluster)-galaxy lensing
- ✓ Galaxy-3D spatial clustering

BOSS CMASSなどとの共相関解析を念頭

当面はダークマターハローで代用

✓ 必要なスペック/カバーすべき領域

- ✓ 赤方偏移: $0 < z < 1.5$
- ✓ 体積: 少なくとも 1 (Gpc/h)^3
- ✓ 質量: $10^{12} \sim 10^{15-16} M_{\text{solar}}/h$
- ✓ 6D 宇宙論パラメタ (標準 + ダークエネルギー “w”)



✦ Kavli IPMU

Takahiro Nishimichi*
Masahiro Takada
Naoki Yoshida

✦ U. Tokyo

Ken Osato*
Masamune Oguri

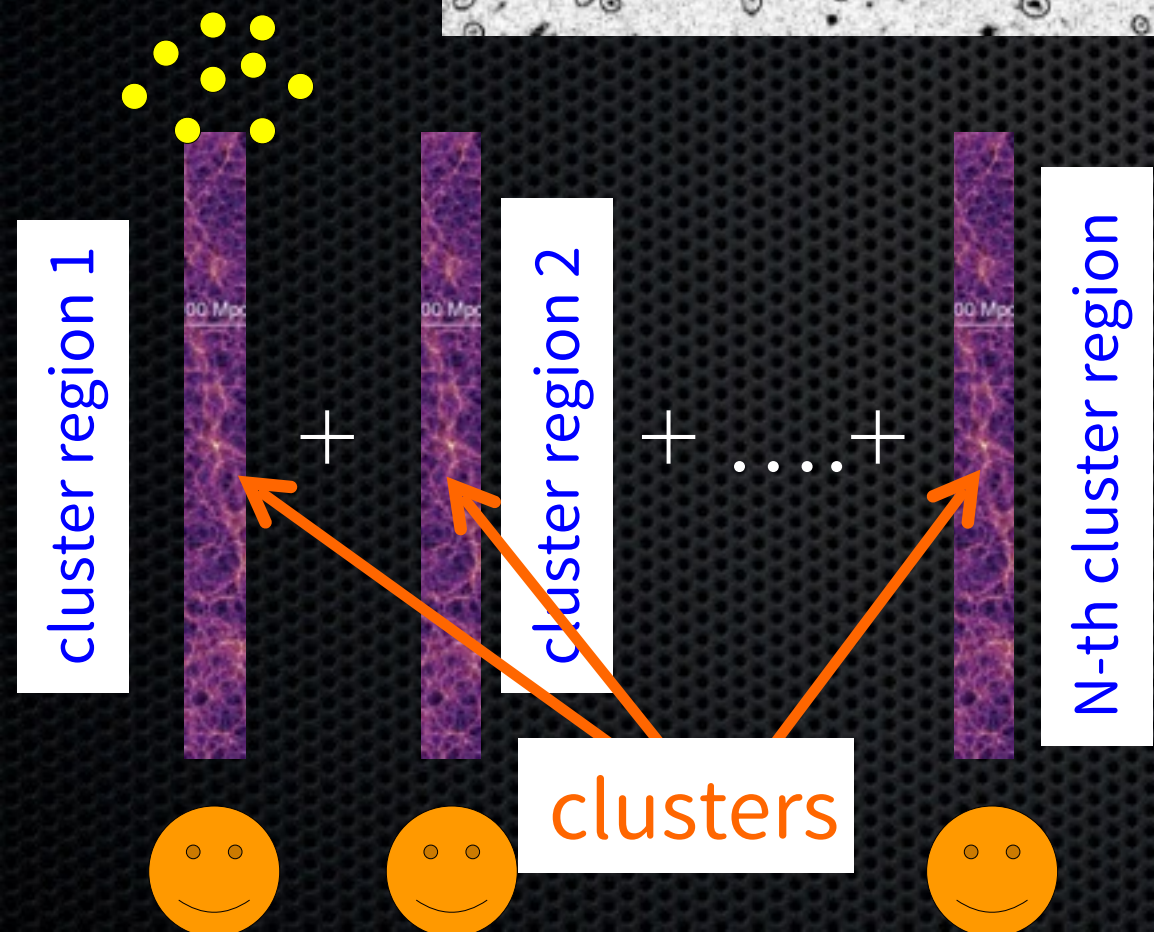
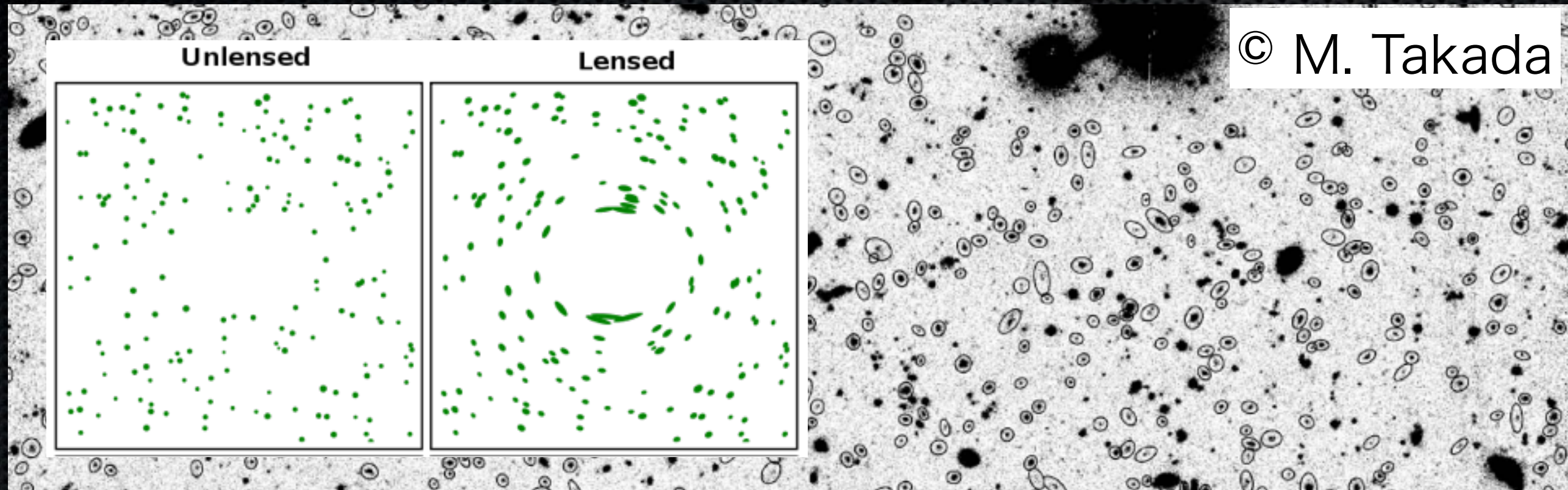
✦ NAOJ

Masato Shirasaki*
Takashi Hamana

✦ Hirosaki U.

Ryuichi Takahashi*

Stacked weak lensing signal



Oguri & Takada '11

$$\gamma_+^{\text{obs}}(\theta_i) = \gamma_+^{\text{cluster}}(\theta_i) + \underbrace{\gamma_+^{\text{LSS}}(\theta_i)}_{\text{projection effect}} + \varepsilon_+(\theta_i)$$

$$\Delta\Sigma(R) = \gamma_t(R)\Sigma_c = \bar{\Sigma}(< R) - \Sigma(R),$$

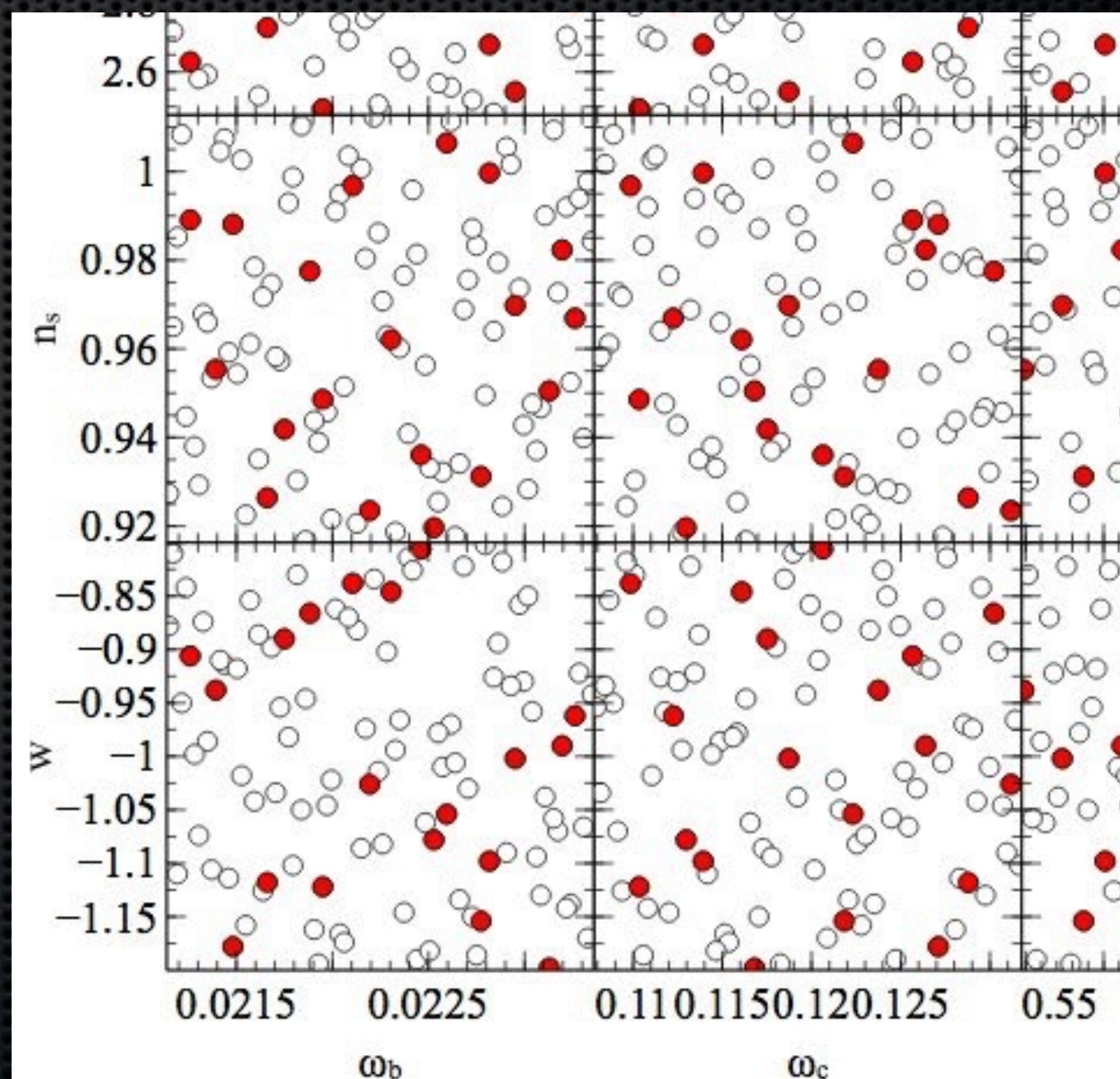
$$\Sigma(R) = \bar{\rho} \int \left[1 + \xi_{\text{gm}} \left(\sqrt{R^2 + \Pi^2} \right) \right] d\Pi$$

シミュレーションの詳細

- ✓ 粒子数: 2048^3
- ✓ ボックス長: $1h^{-1}\text{Gpc}$
 - $10^{12} h^{-1}M_{\text{solar}}$ のハローを 約100粒子で解像
- ✓ 2nd-order Lagrangian PT 初期条件
@ $z_{\text{in}}=59$
(宇宙論を変えた際には変位のRMSを平均
粒子間距離の25%になるよう z_{in} を変更)
- ✓ Gadget-2のTree-PMモード (w/ 4096^3
PM mesh)
- ✓ $0 \leq z \leq 1.5$ の間で21出力 (線形成長因
子で等間隔)
- ✓ ハロー及びサブハローカタログ
 - ✓ FOF + Subfind
 - ✓ Rockstar (+ merger tree by consistent-trees)
- ✓ データ圧縮 (スナップショット当たり
 $256\text{GB} \rightarrow 48\text{GB}$)
 - ✓ 粒子位置 \rightarrow 変位ベクタに (1次元につき
16 bits; 精度 $\sim 1h^{-1}\text{kpc}$ 程度を保持)
 - ✓ 速度: ハロー同定後に捨てる
 - ✓ ID: ID順に並び変えた後で捨てる

多次元空間の効率的なサンプリング: 超ラテン格子デザイン

- どの1次元を見ても、興味のある区間を均等なN個の区域に切ると、一回ずつサンプリングされているようなN個の点の集合
- そのような点列自体は無数に存在 (ex. 対角線上のデザイン)
- 「最も近い点との距離が最大となる」など、条件を課してデザインを決定する
- 多数の実験を繰り返すことが難しい時に特に有用

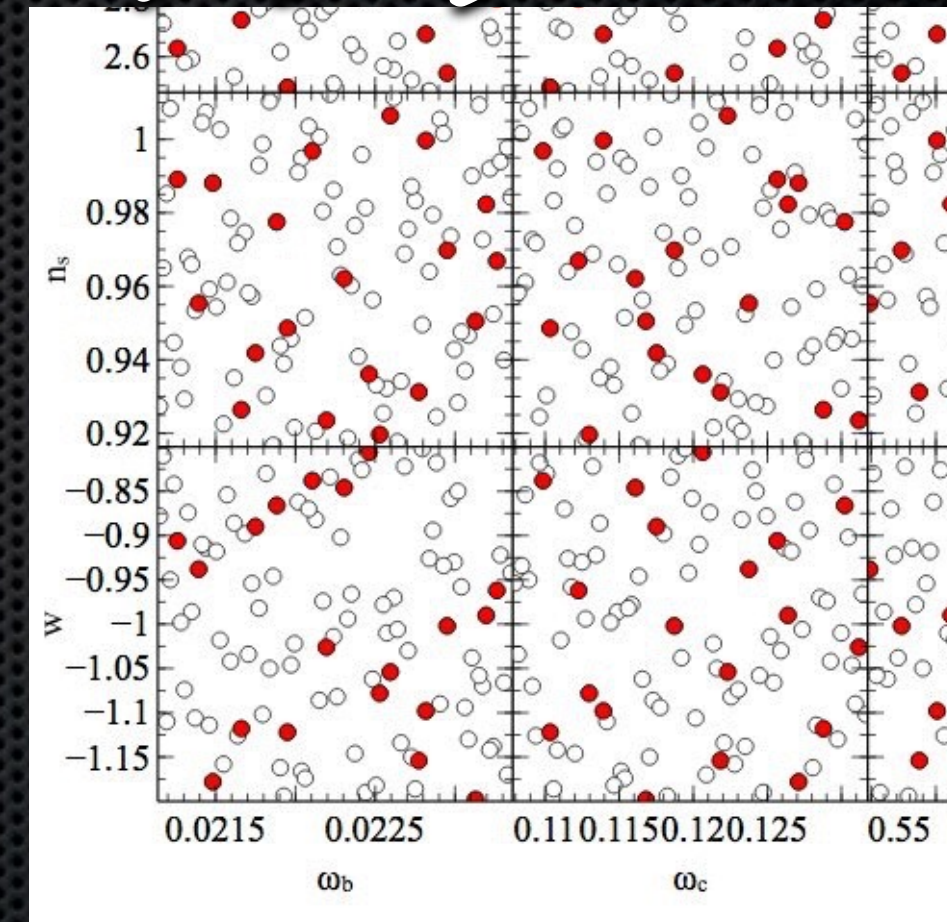


多次元空間の効率的なサンプリング

fiducial model

- ✓ PLANCK15 flat Λ CDM模型
- ✓ 24 試行が完了
- ✓ 統計誤差の評価
- ✓ “エミュレータ”の精度チェック

$$\begin{aligned}\omega_b = \Omega_b h^2: & \pm 5\% \\ \omega_c = \Omega_c h^2: & \pm 10\% \\ \Omega_\Lambda: & \pm 20\% \\ \ln(10^{10} A_s): & \pm 20\% \\ n_s: & \pm 5\% \\ w: & \pm 20\% \end{aligned}$$



varied cosmology

- ✓ “sliced” LHデザイン (Ba, Brenneman & Myers '15)
- ✓ 100模型を発生
- ✓ 20模型ごとにLHD (e.g., red points)
- ✓ 2種類のシミュレーション
 - ✓ 初期条件の位相をそろえたもの(20模型 done)
 - ✓ 独立な位相(40模型 done)

**合計で現在84
試行が完了**

g-g lensing シグナルの測定

- Rockstarで同定したハロー
- ビリアル質量の区間 $[10^{12}, 8 \times 10^{15}) h^{-1} M_{\text{solar}}$
- ファクター2毎に12の質量ビンに分類

フーリエ空間でcross spectrumを測定

$$P_{\text{hm}}(\vec{k}) \quad (\text{on } 1024^3 \text{ mesh by FFT})$$

逆FFTで実空間に戻し、角度平均

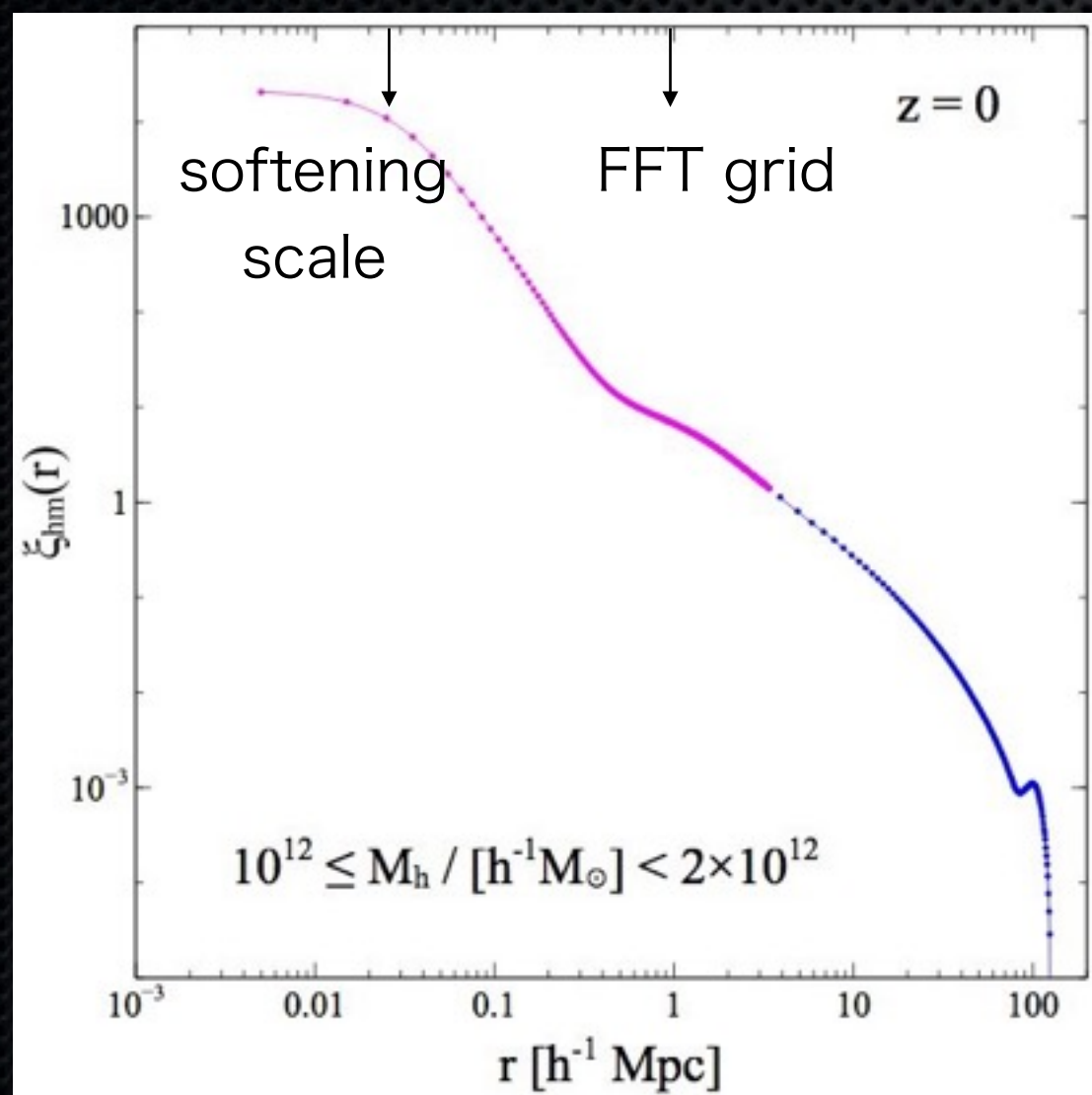
$$\xi_{\text{hm}}(\vec{r}) \longrightarrow \xi_{\text{hm}}(r) \\ \text{spherical avg.}$$

直接ペアカウントして小スケールの ξ_{hm} を測定

最後に2次元に射影して $\Sigma(R)$ 更に $\Delta\Sigma(R)$ を得る

$$\Sigma(R) = \bar{\rho} \int [1 + \xi_{\text{gm}}(\sqrt{R^2 + \Pi^2})] d\Pi$$

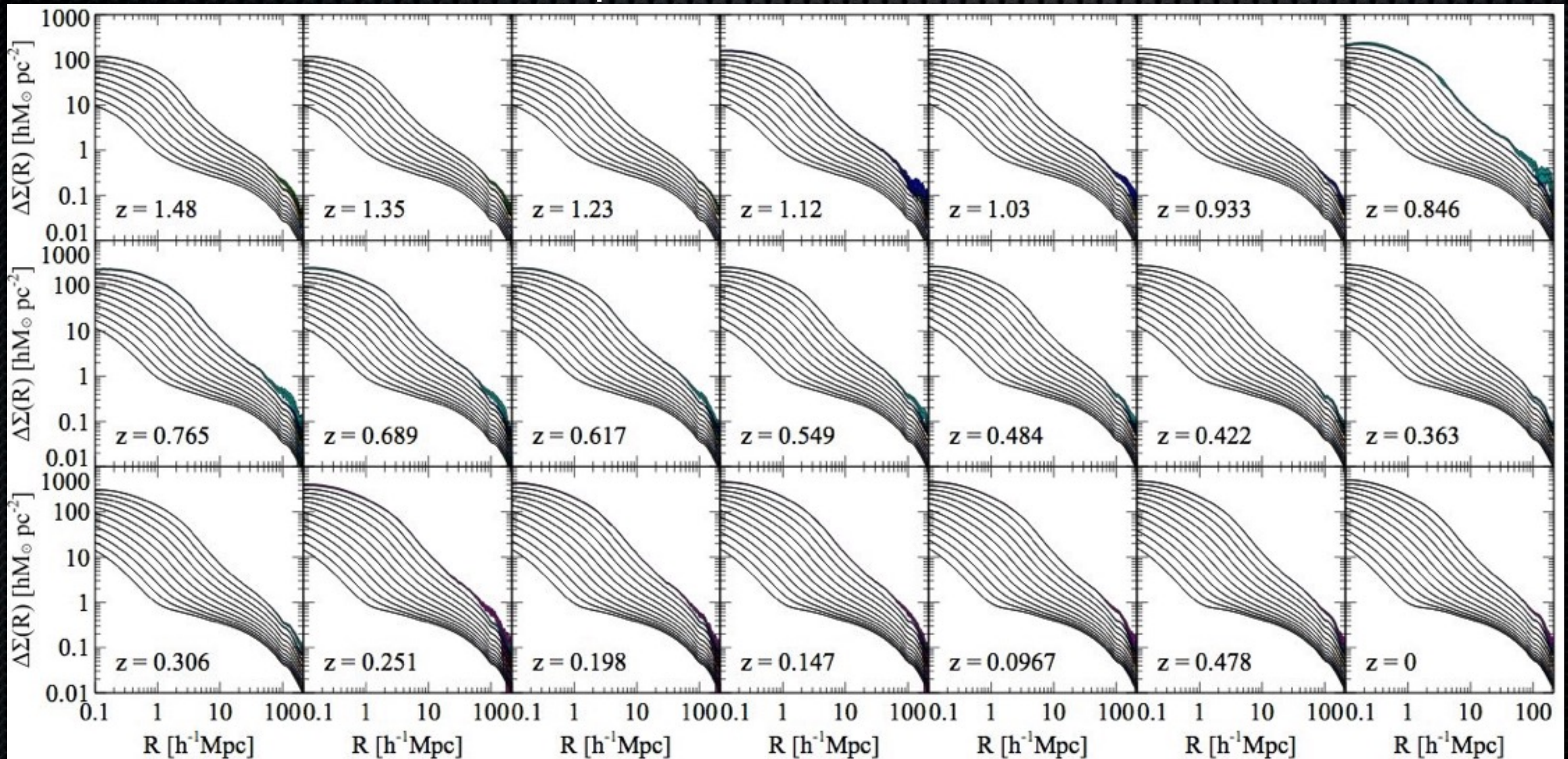
2次元に射影してから測定するよりも精度が出る



Products

24 realizations

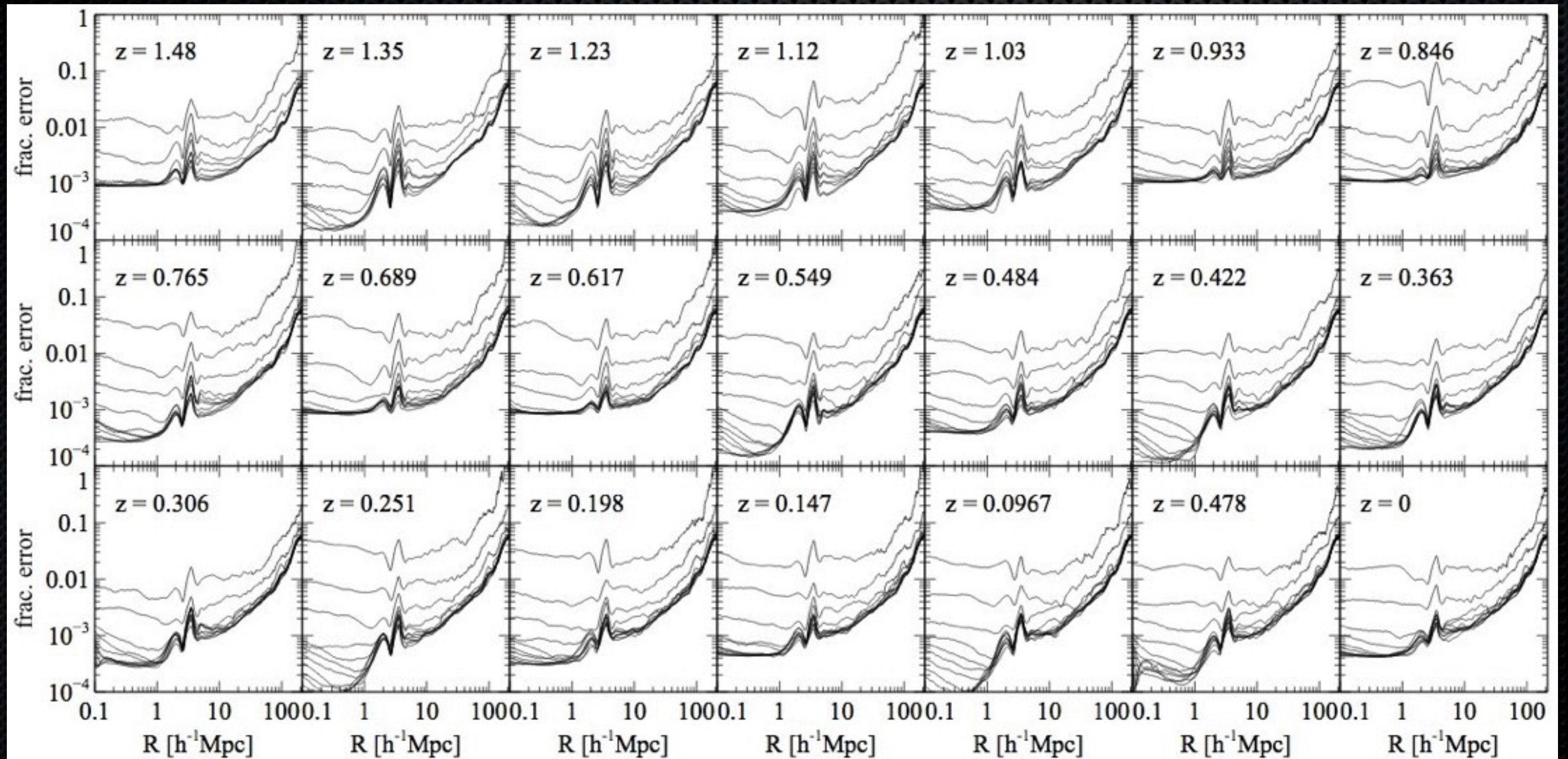
Excess surface mass profile for the fiducial PLANCK15 model



Products

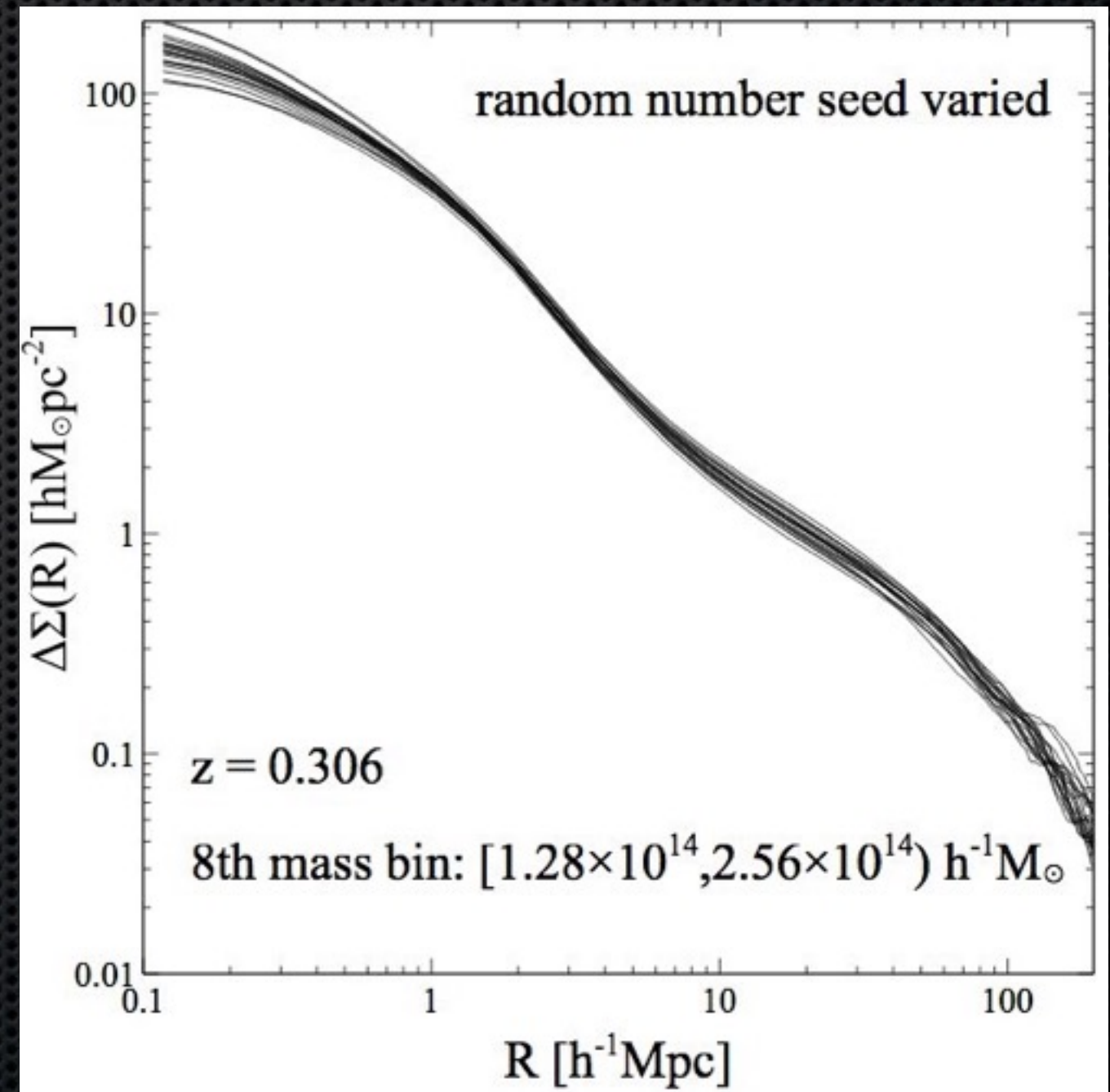
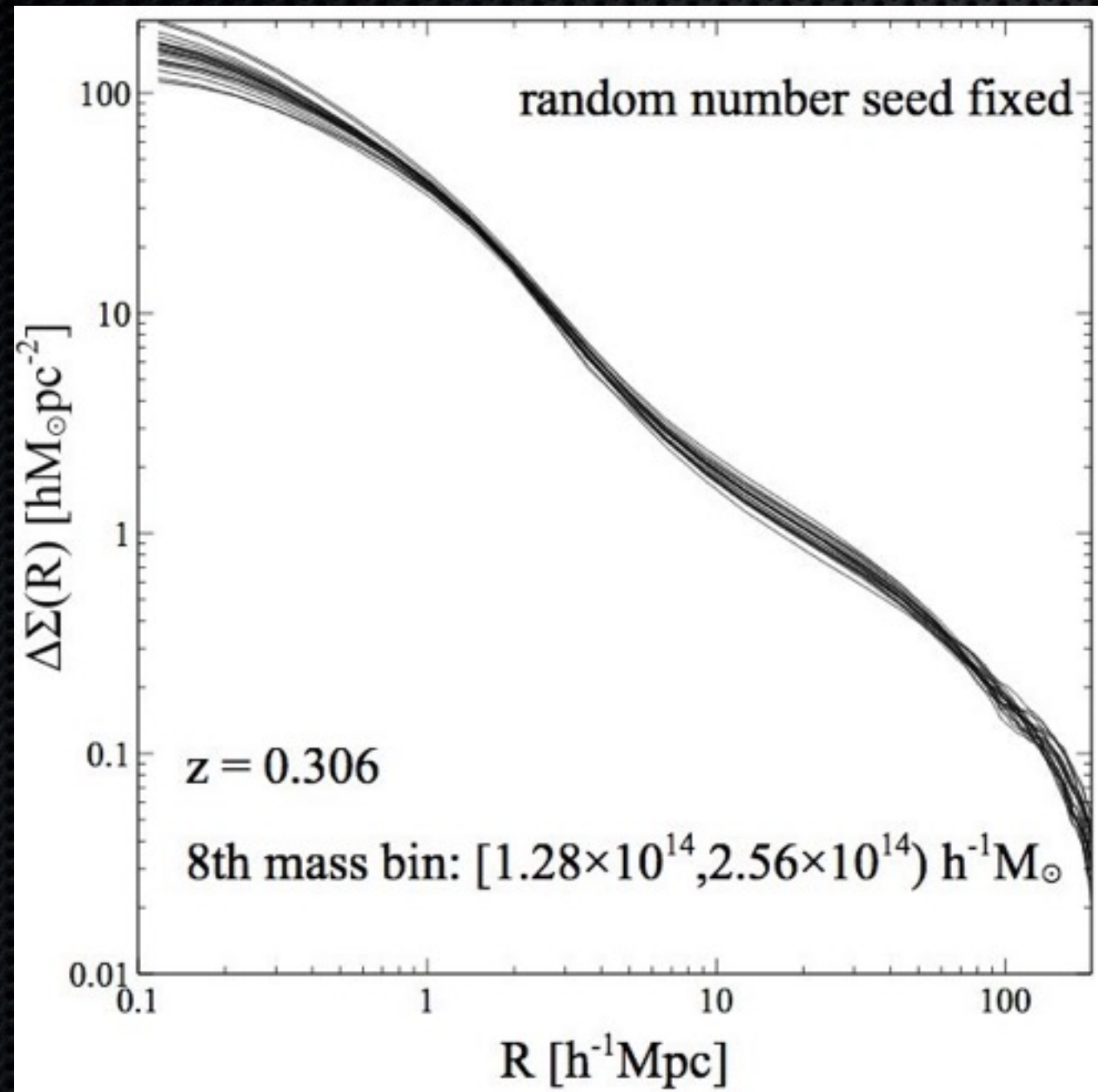
24 realizations

Fractional error on excess surface mass



Varied cosmology

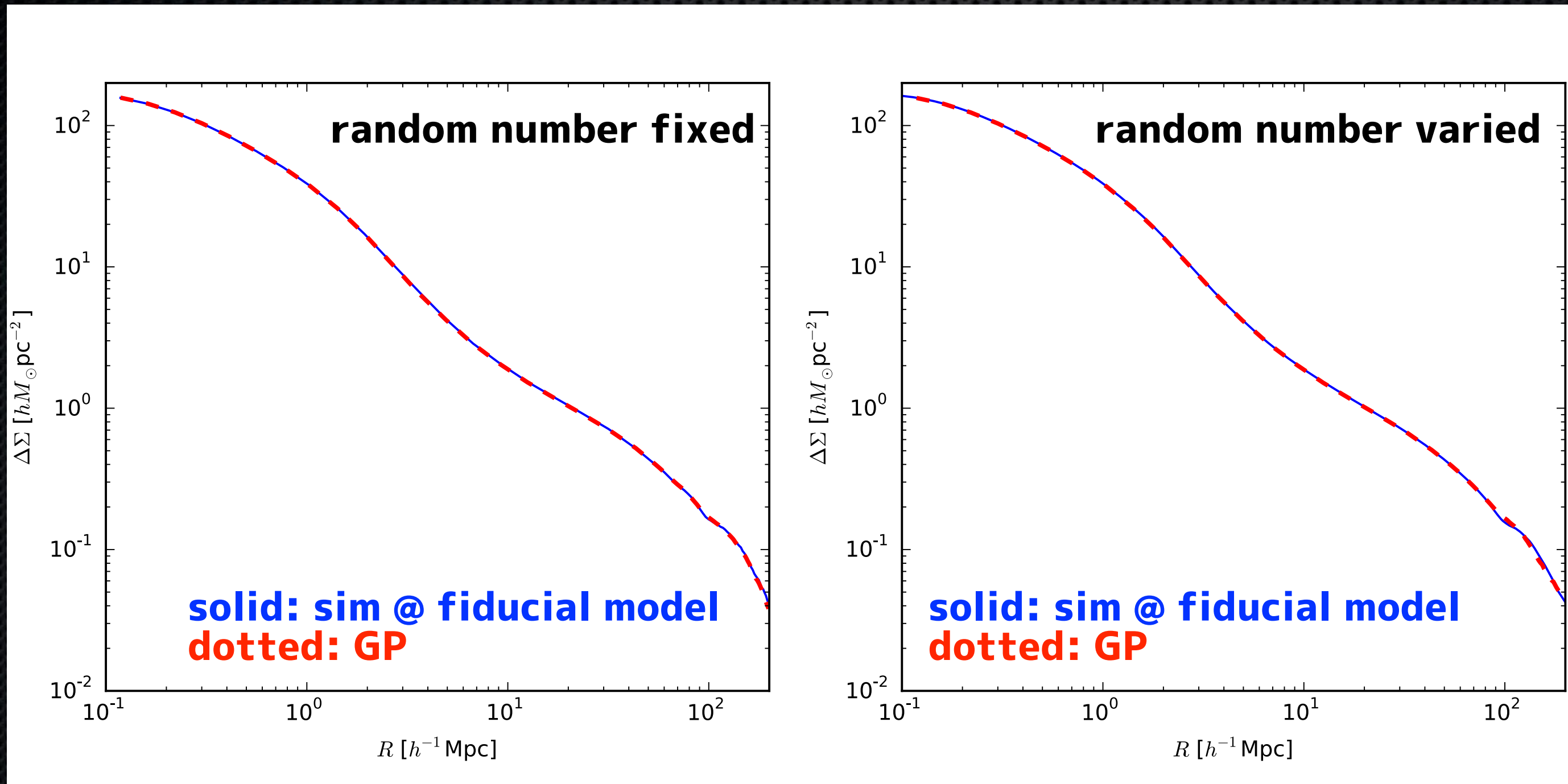
20 cosmological models



Gaussian process

first trial

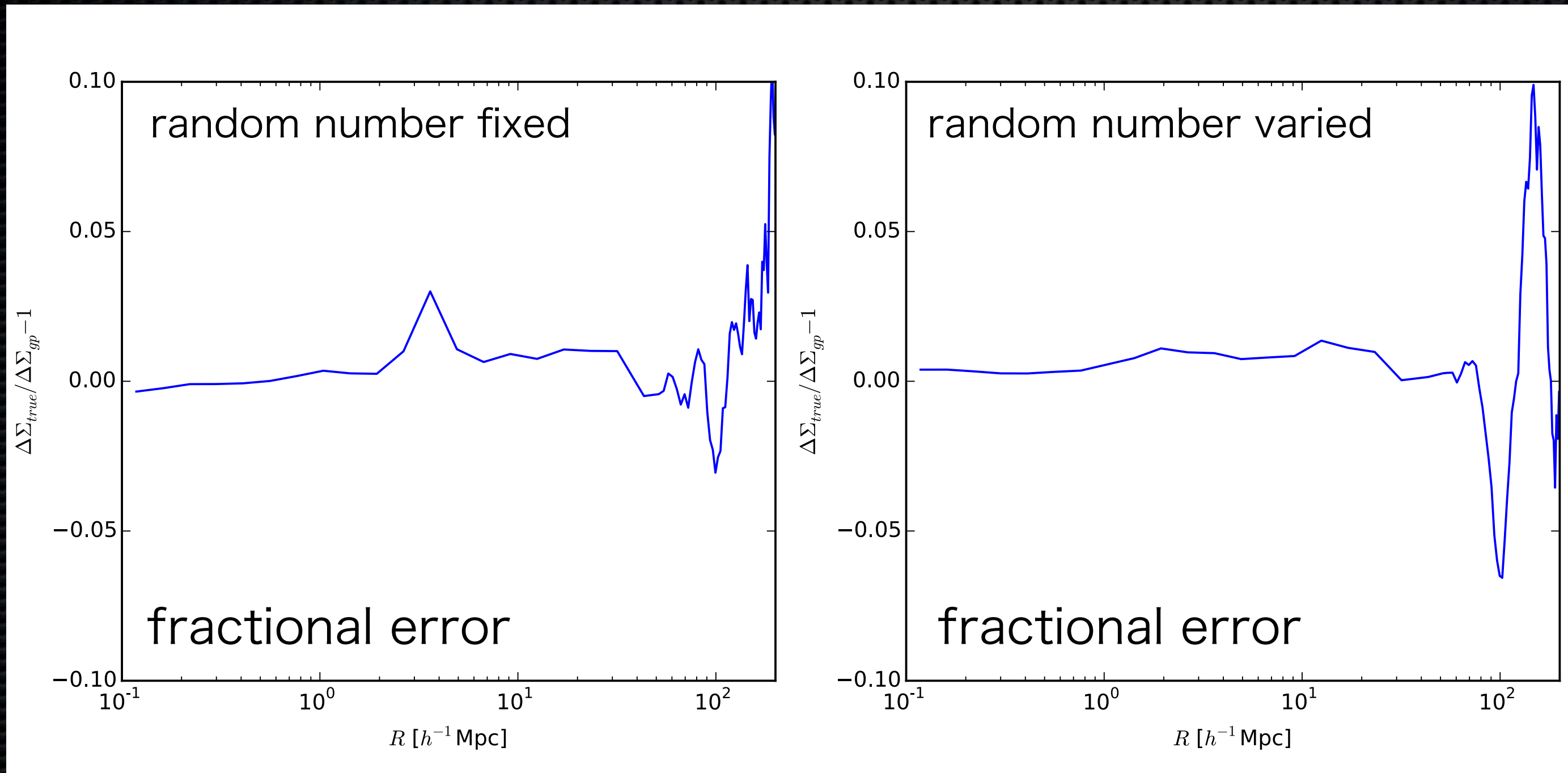
validation at the fiducial PLANCK15 cosmology



Gaussian process

first trial

validation at the fiducial PLANCK15 cosmology



まとめ

- ✦ **摂動論的に宇宙の大規模構造を記述する可能性**
 - ✦ どこでどのように破れるかを理解する (小スケールから大スケールへのモード結合)
 - ✦ 様々なモデルのいいとこ取り + シミュレーションの助けも借りて高精度を実現
- ✦ **高次元宇宙論パラメタ空間で、シミュレーションからモデルを作る可能性**
 - ✦ 効率的なサンプリングと機械学習による“emulator”の構築
 - ✦ Gaussian processを利用してgalaxy-galaxy lensing用の理論テンプレートを構築した
 - ✦ **データがどんどん出てきていて、まだまだできること/やるべきことが沢山ある**
 - ✦ 高次統計, RSD, merger historyとassembly bias, haloのintrinsic alignment, etc., etc., …
 - ✦ 使っていただけで大変嬉しいです！