

ラグランジュ摂動論とN体シミュレーションにおける非線形バイアスと赤方偏移歪み

佐藤正典(名古屋大)

reference; Sato and Matsubara, arXiv:1105.5007, PRD
2011.

天文天体物理夏の学校@蒲郡

INTRODUCTION

- Baryon Acoustic Oscillations(バリオン音響振動 ; BAOs) はBAOを標準もののさしとして使うことによって、ダークエネルギーに制限を与える事ができる(e.g. Seo & Eisenstein 2003)。
- The dark energy task force(Albrecht+2006)によれば, BAOs は他の探査 (例えば、重力レンズやスーパーノバ) よりも系統誤差による影響が少ないと考えられている。
- しかし、 将来観測の能力を最大限に生かすためには、系統誤差をきちんと取り扱わなければならない。
- 主な系統誤差 : 銀河バイアス, 非線形性, 赤方偏移歪み

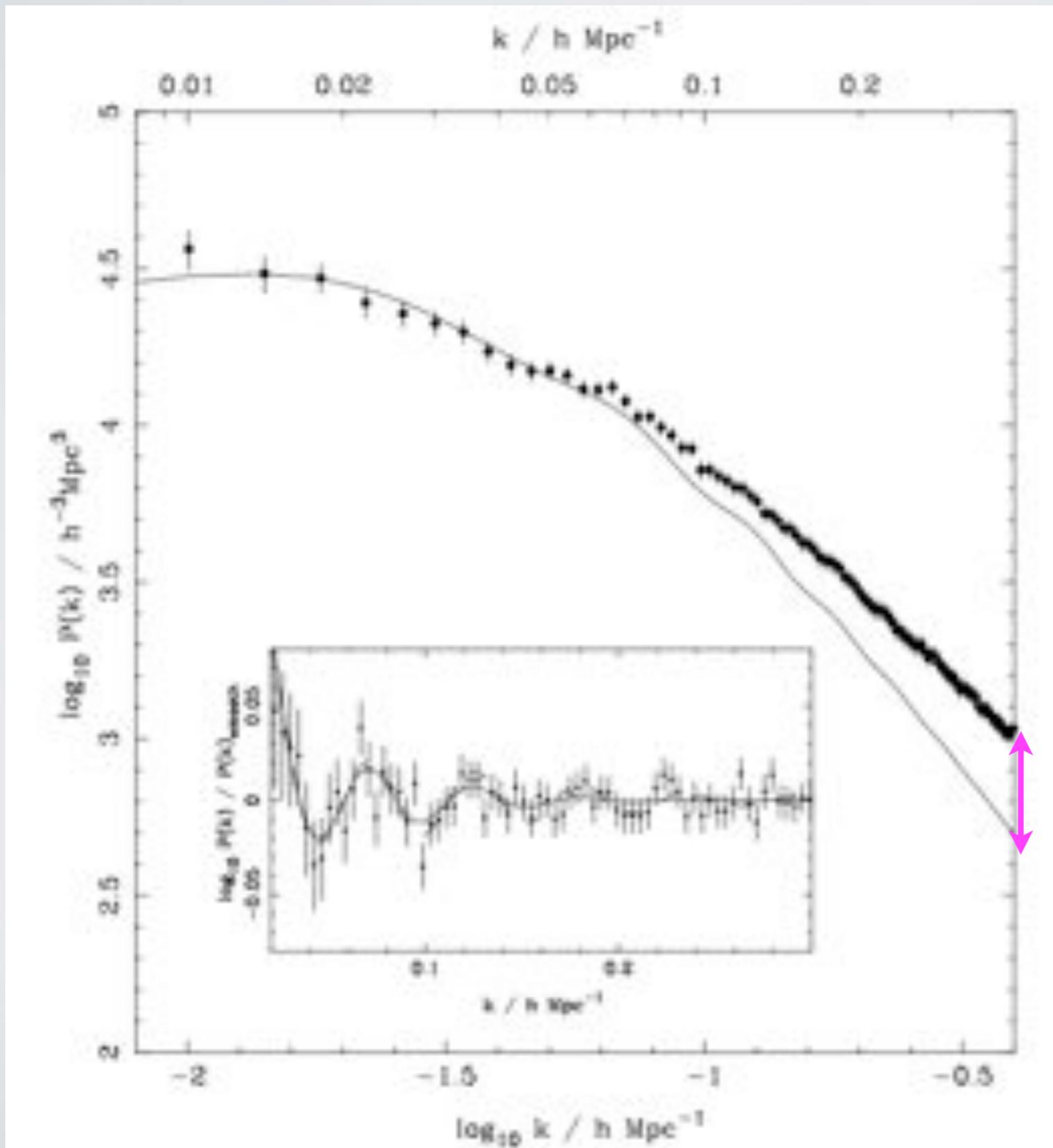
MOTIVATION

Percival+2007

実線: 線形理論

データ点: SDSS DR5か
らの結果

- 非線形性
- 銀河バイアス
- 赤方偏移歪み



MOTIVATION

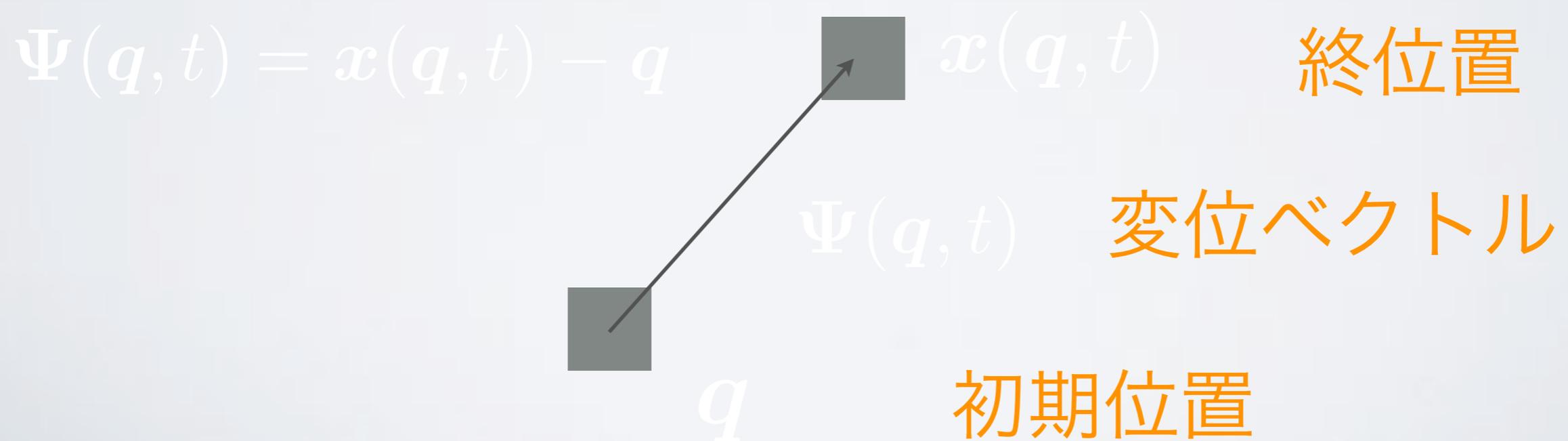
- 従って、これらの系統誤差を含んだ正確な理論モデルを作らなければならない。
- これら全ての系統誤差を自然に含んだモデルであるMatsubara (2008)(LRT)を使って、系統誤差がBAOに与える影響を調べ、どれほどN体シミュレーションの結果を再現できるか。
- LRTはラグランジュ的描像に基づく再和法であり、フィッティングパラメタはなし。
- バイアスを含んだ摂動論と再和法がある； Smith + (2007,2008) ,Elia+2011 using TRG, Nishimichi & Taruya(2011)

なぜLRTか?

- オイラリアンバイアスの問題->オイラリアンバイアスの物理モデルがない。
- 物理モデルはラグランジアン空間で与えられる。
 - e.g. ハローバイアスモデル, ピークバイアスモデル
- LRTはラグランジアンバイアスを取り扱うのに適している。

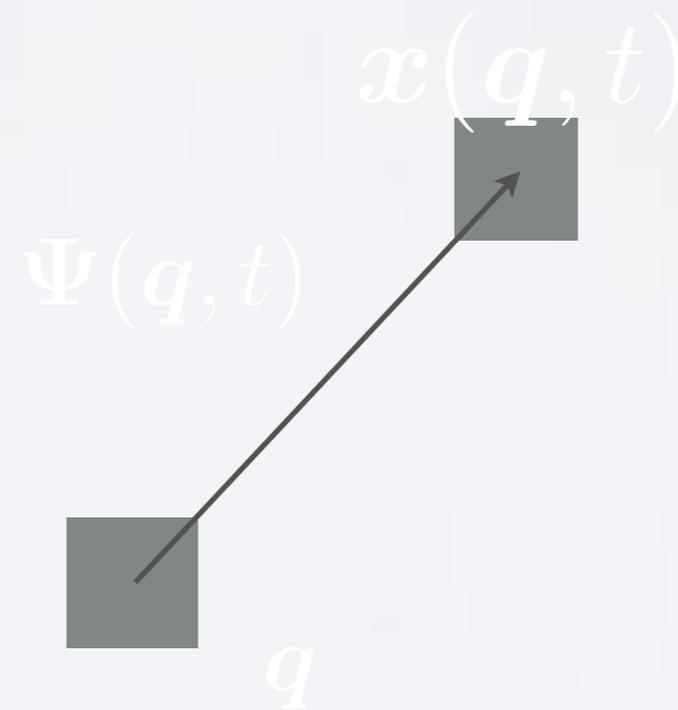
ラグランジュ摂動論

- ラグランジアン描像において、基本的な変数は変位ベクトル: $\Psi(q, t)$
- 変位ベクトルは、ある物質素片が初期位置からどれだけ移動したかを表すベクトル



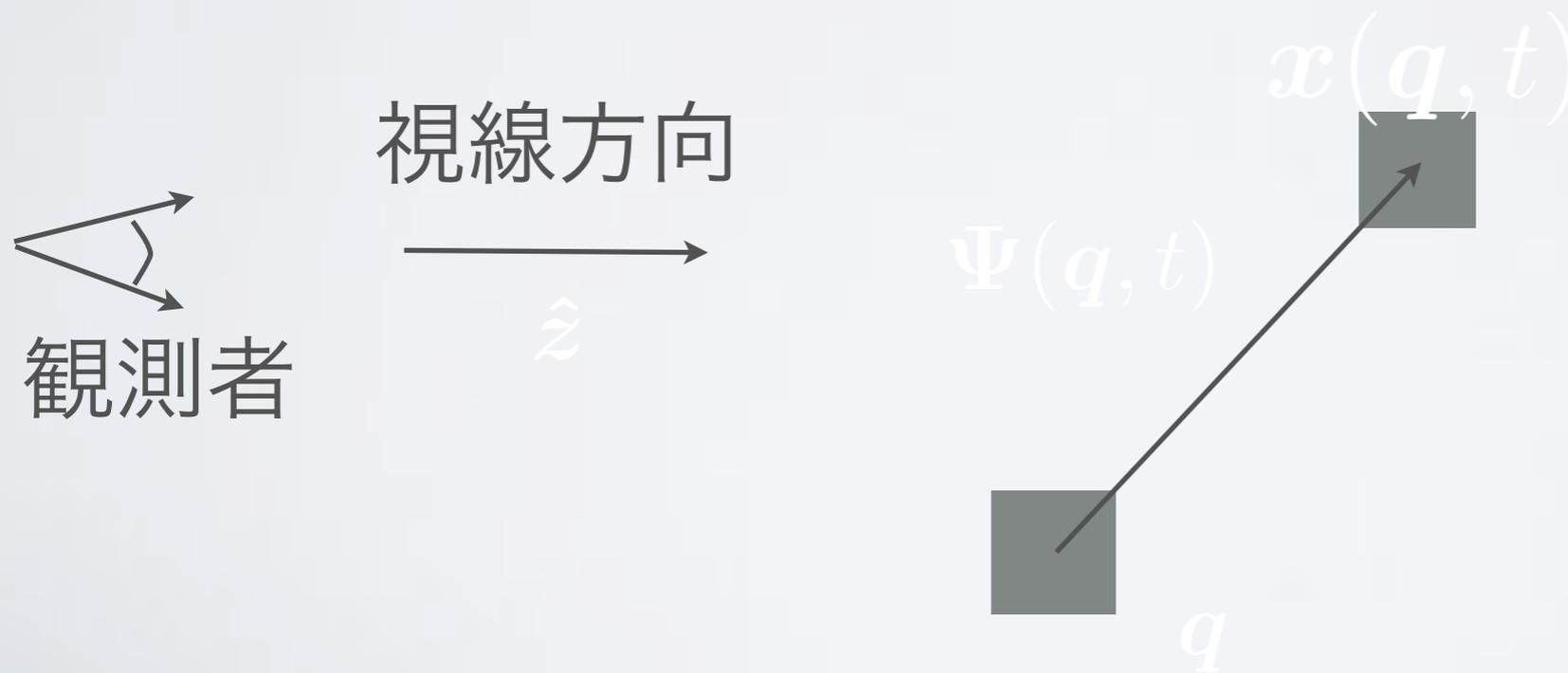
赤方偏移歪み

- ラグランジュ摂動論：赤方偏移空間への拡張は容易
- 実空間から赤方偏移空間への写像が厳密に線形



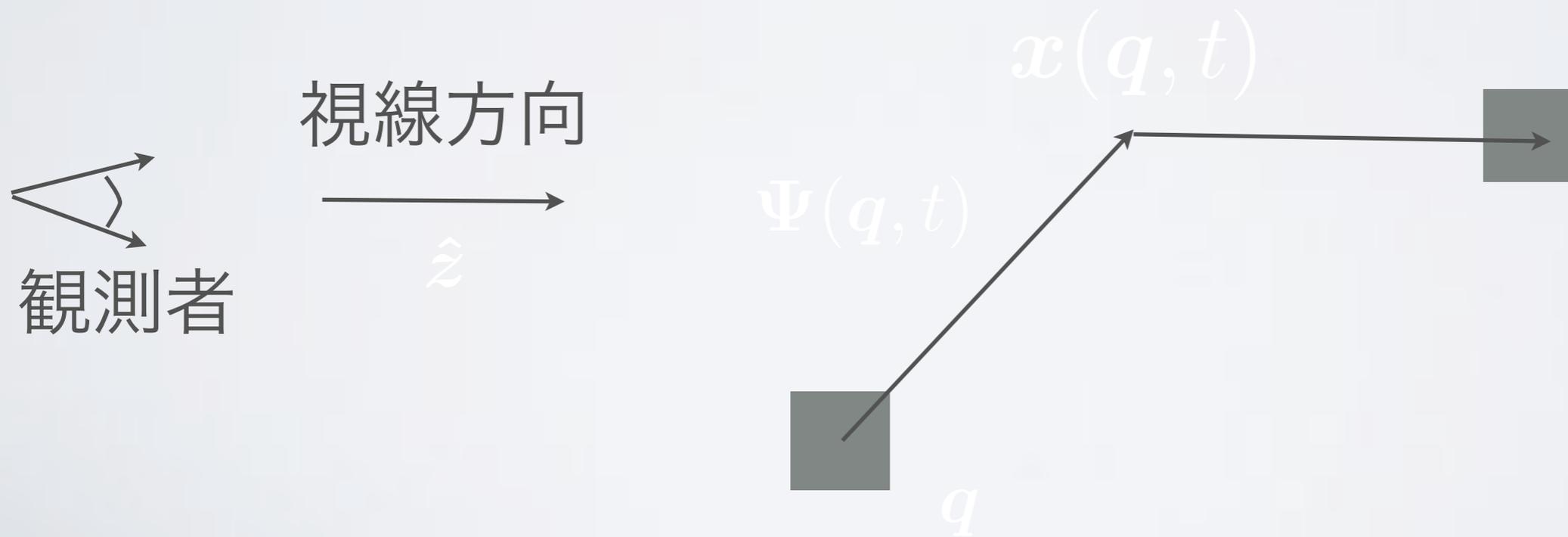
赤方偏移歪み

- ラグランジュ摂動論：赤方偏移空間への拡張は容易
- 実空間から赤方偏移空間への写像が厳密に線形



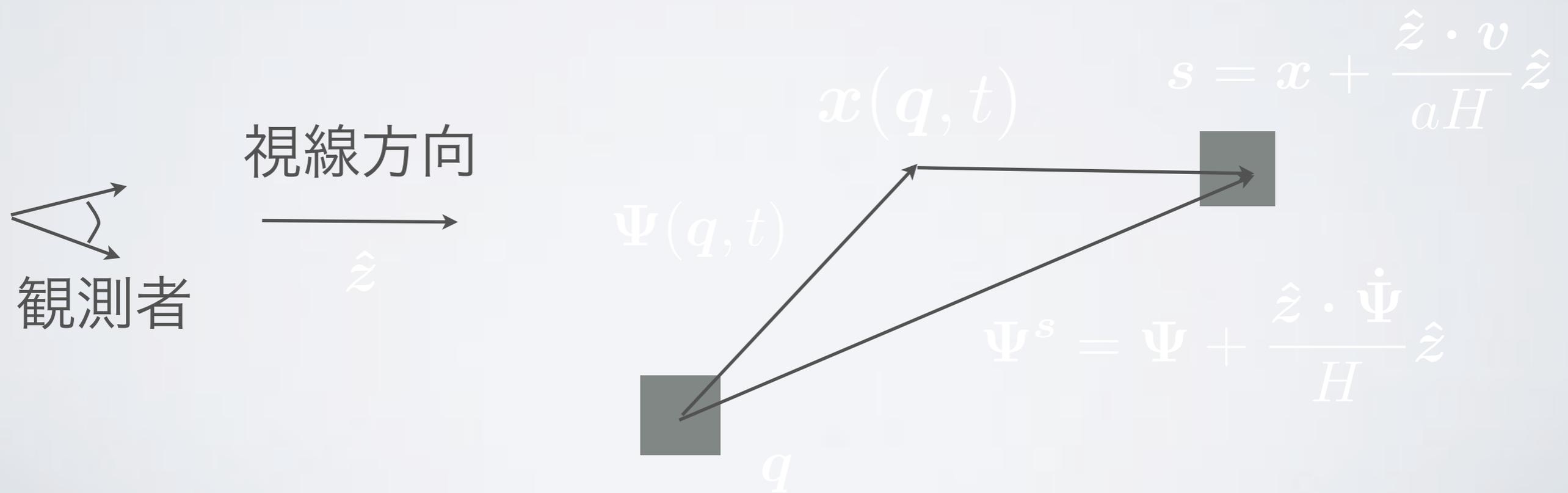
赤方偏移歪み

- ラグランジュ摂動論：赤方偏移空間への拡張は容易
- 実空間から赤方偏移空間への写像が厳密に線形



赤方偏移歪み

- ラグランジュ摂動論：赤方偏移空間への拡張は容易
- 実空間から赤方偏移空間への写像が厳密に線形



LRTにおけるバイアスと赤方偏移歪み

Matsubara 2008,2011

- ラグランジュ変数とオイラー密度場の関係

$$1 + \delta_X(\mathbf{x}) = \int d^3q [1 + \delta_X^L(\mathbf{q})] \delta_D^3[\mathbf{x} - \mathbf{q} - \Psi(\mathbf{q})]$$

オイラー空間での
密度ゆらぎ

ラグランジュ空間
での密度ゆらぎ

重力成長による物質素
片の移動(赤方偏移歪
みの効果を含む)

- フーリエ変換後、以下の展開を適用

ラグランジアンバイアスの積分核

$$\delta_X^L(\mathbf{k}) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} \int \frac{d^3k_1}{(2\pi)^3} \cdots \frac{d^3k_n}{(2\pi)^3} (2\pi)^3 \delta_D^3(\mathbf{k}_{1\dots n} - \mathbf{k}) b_n^L(\mathbf{k}_1, \dots, \mathbf{k}_n) \delta_L(\mathbf{k}_1) \cdots \delta_L(\mathbf{k}_n)$$

$$\tilde{\Psi}(\mathbf{k}) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{i}{n!} \int \frac{d^3k_1}{(2\pi)^3} \cdots \frac{d^3k_n}{(2\pi)^3} (2\pi)^3 \delta_D^3(\mathbf{k}_{1\dots n} - \mathbf{k}) \mathbf{L}_n(\mathbf{k}_1, \dots, \mathbf{k}_n) \delta_L(\mathbf{k}_1) \cdots \delta_L(\mathbf{k}_n)$$

重力成長のみから決まる積分核(赤方偏移歪みの効果を含む)

シミュレーションパラメタ

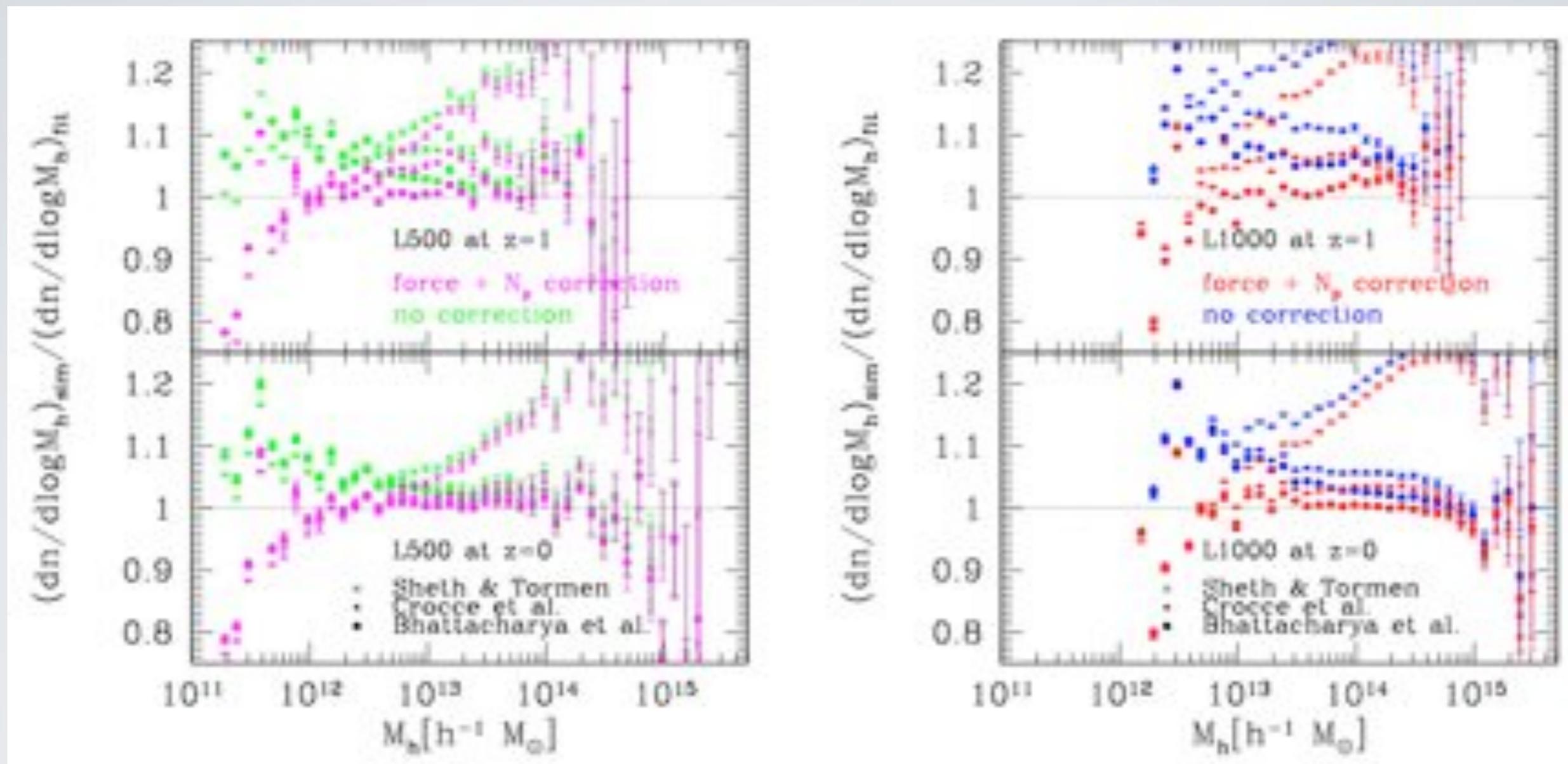
WMAP7yr

Name	Ω_m	Ω_Λ	Ω_b	h	n_s	σ_8	L_{box}	N_p	z_{ini}	r_s	N_{run}
L1000(low resolution)	0.265	0.735	0.0448	0.71	0.963	0.80	<u>$1000h^{-1}\text{Mpc}$</u>	1024^3	36	$50h^{-1}\text{kpc}$	<u>30</u>
L500(high resolution)	0.265	0.735	0.0448	0.71	0.963	0.80	$500h^{-1}\text{Mpc}$	1024^3	42	$25h^{-1}\text{kpc}$	5

L1000(low resolution)			L500(high resolution)				
	\bar{N}_h	$\bar{n}_h [h^3 \text{Mpc}^{-3}]$	$\bar{M}_h [h^{-1} M_\odot]$		\bar{N}_h	$\bar{n}_h [h^3 \text{Mpc}^{-3}]$	$\bar{M}_h [h^{-1} M_\odot]$
$z = 3$	4.00×10^5	4.00×10^{-4}	2.59×10^{12}	$z = 3$	1.08×10^6	8.68×10^{-3}	4.58×10^{11}
$z = 2$	1.21×10^6	1.21×10^{-3}	3.30×10^{12}	$z = 2$	1.86×10^6	1.48×10^{-2}	6.12×10^{11}
$z = 1$	2.38×10^6	2.38×10^{-3}	4.75×10^{12}	$z = 1$	2.42×10^6	1.94×10^{-2}	9.07×10^{11}
$z = 0.5$	2.82×10^6	2.82×10^{-3}	5.99×10^{12}	$z = 0.5$	2.52×10^6	2.01×10^{-2}	1.15×10^{12}
$z = 0.3$	2.93×10^6	2.93×10^{-3}	6.63×10^{12}	$z = 0.3$	2.52×10^6	2.01×10^{-2}	1.27×10^{12}
$z = 0$	3.05×10^6	3.05×10^{-3}	7.73×10^{12}	$z = 0$	2.49×10^6	1.99×10^{-2}	1.47×10^{12}

- To compare the LRT predictions, 主にL1000 simulationsを使った。粒子数は 1024^3 , ボックスサイズの一辺は $1\text{Gpc}/h$, リアライゼーション数は30.
-> BAOsを正確に調べるのに適している。

質量関数

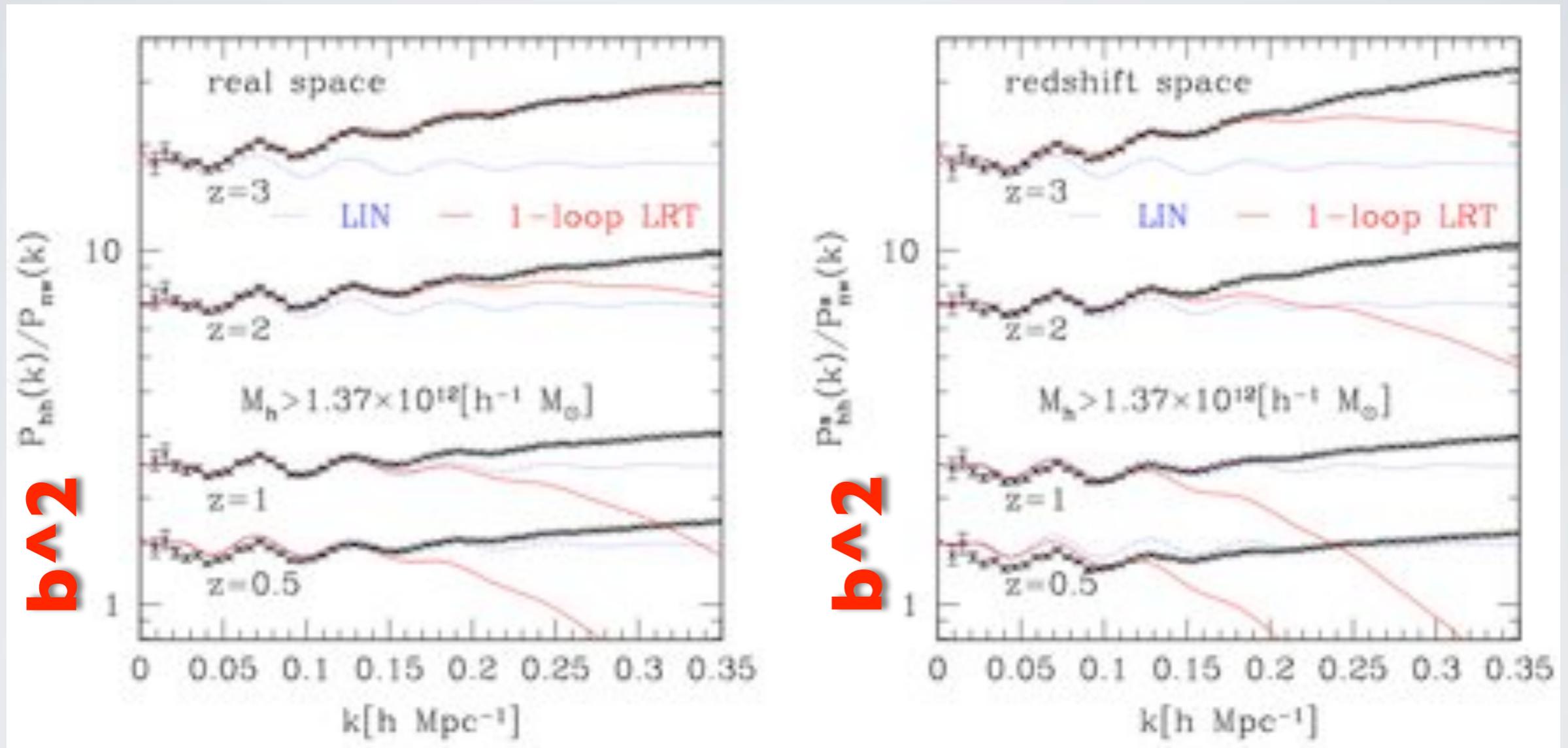


我々のシミュレーション結果は、Bhattacharya+(2011)のような大規模、高解像度のN体シミュレーションを使って求められたフィッティング公式と一致している。

ハローパワースペクトル

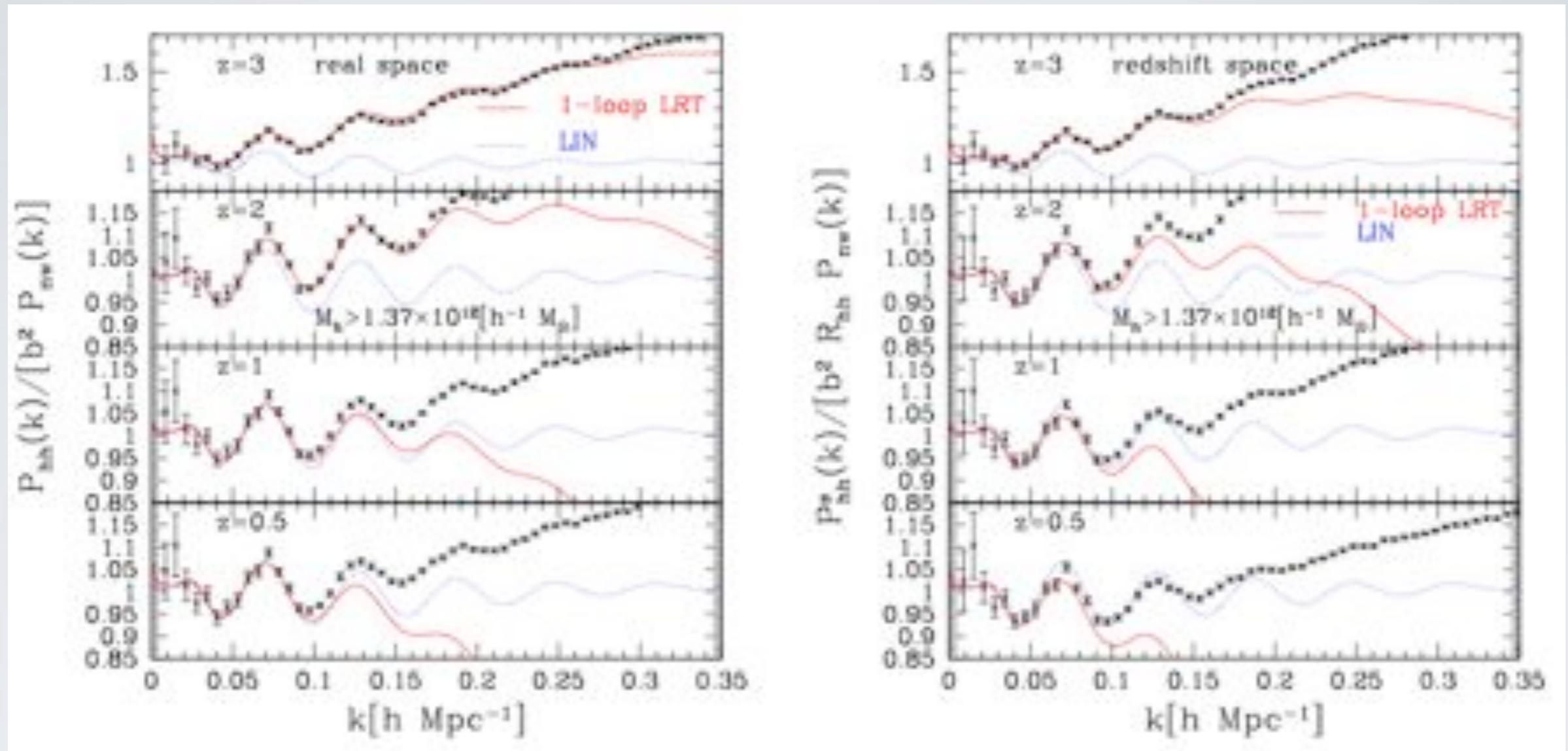
$$P_{\text{hh,LRT}}(k) = \exp[-k^2 \sigma_v^2] [(1 + \langle F' \rangle)^2 P_L(k) + E_{00}(k)]$$

$$P_{\text{hh,LRT}}^s(k, \mu) = \exp[-k^2 \sigma_v^2 [1 + f(f+2)\mu^2]] [(1 + \langle F' \rangle + f\mu^2)^2 P_L(k) + \sum_{n,m} \mu^{2n} f^m E_{nm}(k)]$$



1-loop LRTは、実空間、赤方偏移空間で大スケールでシミュレーションの結果を再現する。赤方偏移が減少するにつれて、一致の範囲は非線形性のために狭くなる。

ハローパワースペクトル



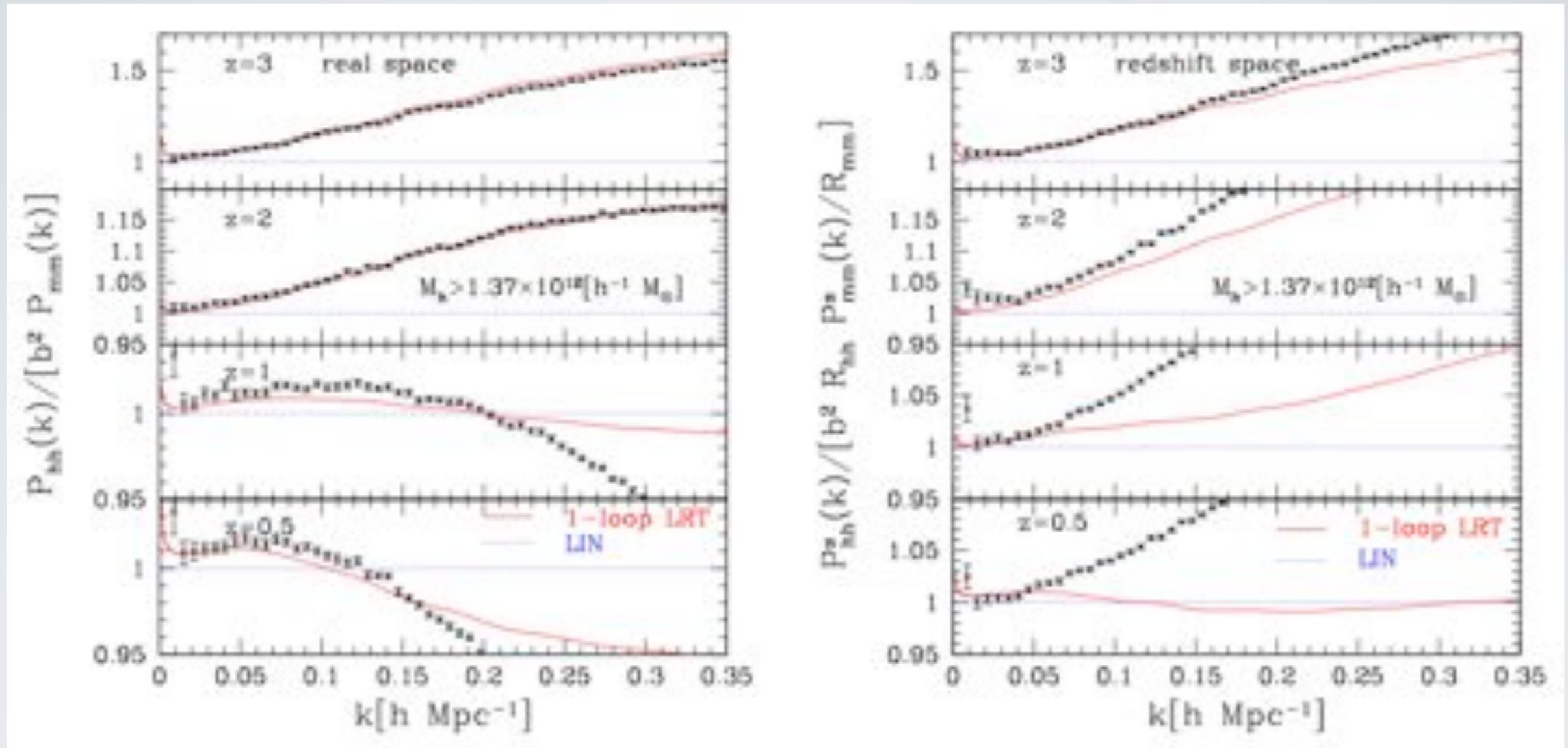
より定量的にみるために、縦軸はスケールに依存しない

バイアス b^2 で割ってある。

赤方偏移空間で一致は、非線形性赤方偏移歪みのために

実空間よりも悪くなる。

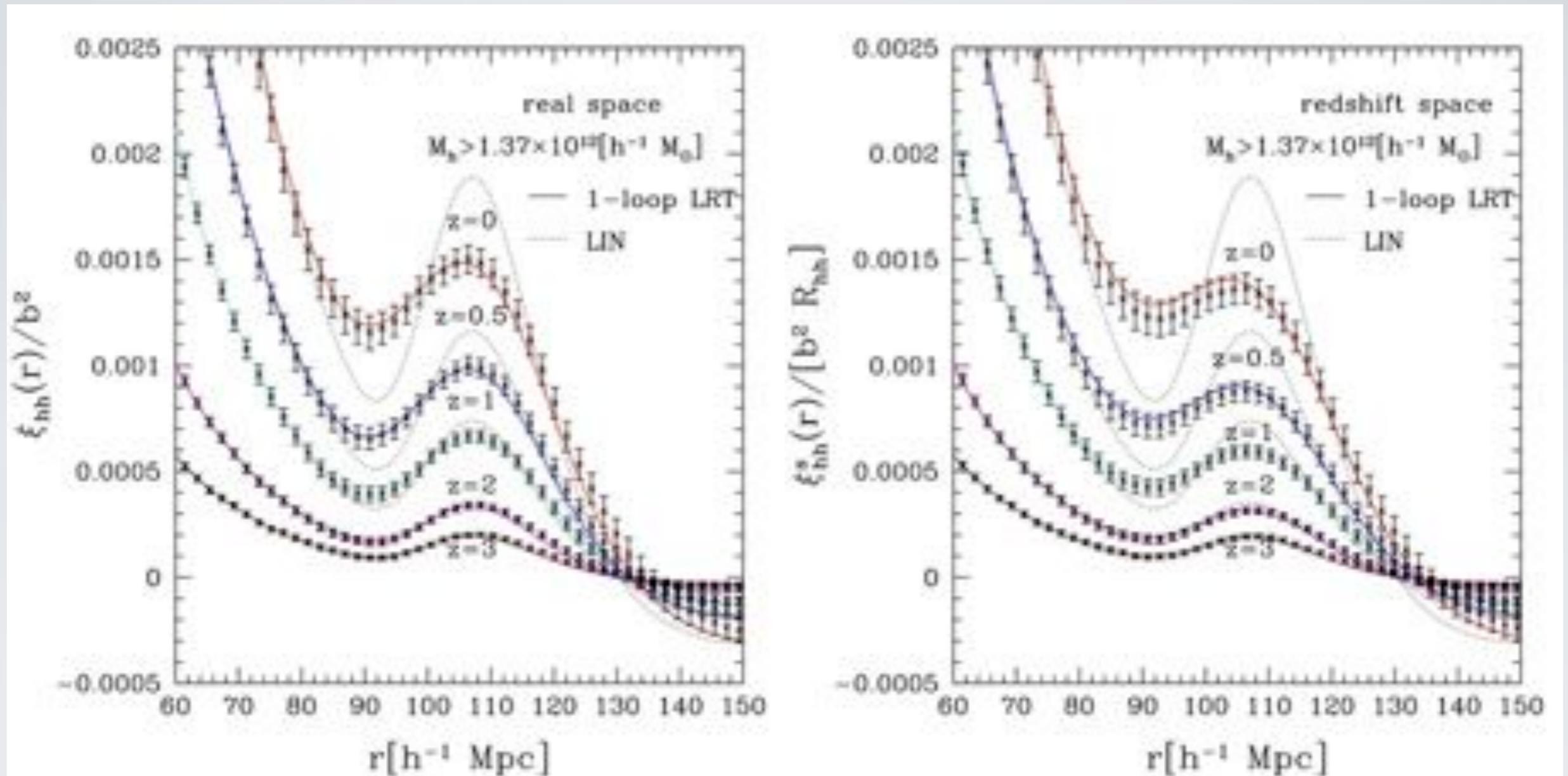
バイアスのスケール依存性



非線形性を取り除くために、縦軸の規格化を変更した。

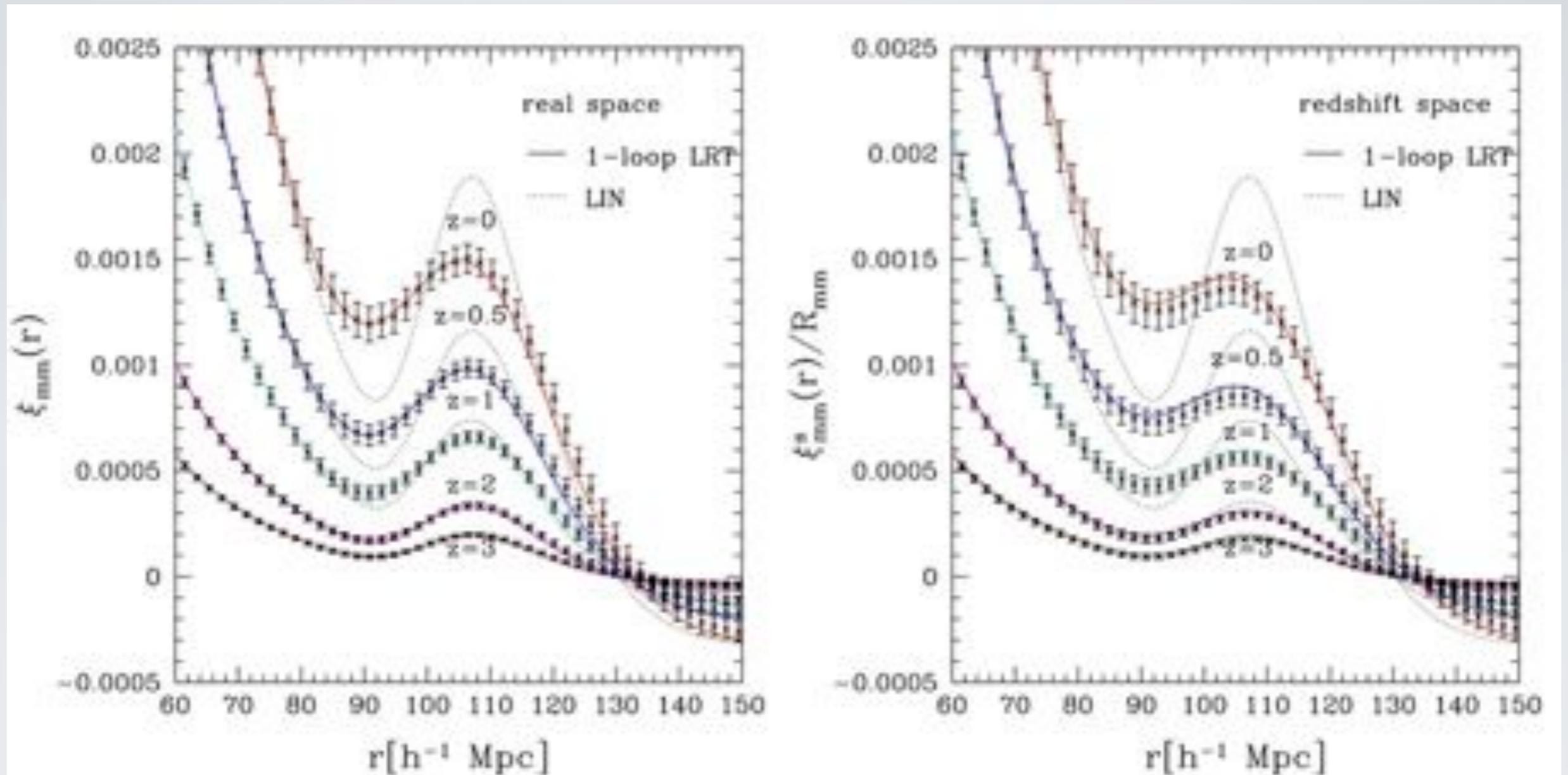
従って、1からのずれは、実空間ではバイアスの非線形性（スケール依存性）を表しており、赤方偏移空間ではバイアスの非線形性と赤方偏移歪みを表している。

ハローの2点相関関数



1-loop LRTは音響振動のピークとそれがなまされる効果を実空間、赤方偏移空間ともによく説明している。ハローバイアスは音響振動のピークの形をそれほど変えない。

物質の2点相関関数



1-loop LRTは音響振動のピークとそれがなまされる効果を実空間、赤方偏移空間ともによく説明している。ハローバイアスは音響振動のピークの形をそれほど変えない。

まとめ

- Lagrangian resummation theory(LRT)の利点
 - ハローバイアスと赤方偏移歪みの効果を自然に含めることができる。
 - ハローバイアスと赤方偏移歪みを考慮に入れる場合でも他の再和法よりパワースペクトルを計算するのが、簡単で早い。
- LRTは、シミュレーションから求めたハローのパワースペクトルと相関関数をBAOスケールにおいてはうまく説明する。
- バイアスのスケール依存性はLRTによってうまく説明できる。
(特に高赤方偏移では)