

第10回湯川財団・  
木村利栄理論物理学賞  
記念講演

# 重力構造進化の摂動計算 で探る宇宙

樽家篤史

# 謝辞

今回、栄えある賞をいただき誠にありがとうございます。

また今回の受賞に際し、

推薦頂いた須藤 靖さん (東大理・教授)

共同研究者の方々 (斎藤、高田、西道、平松 etc.)、

家族、

ならびに

研究をサポートしていただいた全ての方々

心より感謝いたします。

# 講演内容

宇宙の大規模構造にもとづく観測的宇宙論の舞台裏  
(裏事情?)

観測的宇宙論と宇宙の大規模構造

受賞の対象となった研究の紹介

まとめと展望

# 観測的宇宙論

- 宇宙の成り立ち・進化を、観測に立脚して**ボトムアップ的**に理論体系化する宇宙論の研究分野  
(c.f. 素粒子宇宙論)
- さまざまな観測による精査を経て、無矛盾な宇宙像を築く

主導的な役割を果たしてきた観測が

**宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の非等方性**

**宇宙の大規模構造**

今回はこちら

# 宇宙の大規模構造

宇宙論的スケールにわたって存在する質量分布の非一様性

メガパーセク (Mpc) ~ ギガパーセク (Gpc)

※  $1 \text{ Mpc} = 10^6 \text{ pc} \sim 300 \text{ 万光年}$

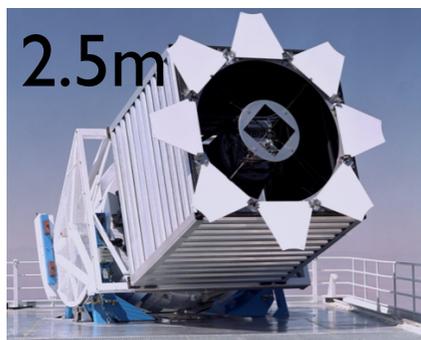
標準的シナリオでは

- 質量分布の大半は冷たい暗黒物質 (Cold Dark Matter, CDM)
- 原始密度ゆらぎを種に、宇宙膨張の影響下で  
重力不安定性により構造が発達・進化  
(→宇宙論の情報を豊富に含む)

銀河赤方偏移サーベイによる銀河の3次元地図をもとに  
研究が進められている (最近では重力レンズなどもある)

# 銀河赤方偏移サーベイ

～ 大規模構造を探る窓 ～



スローンデジタル  
スカイサーベイ  
(ニューメキシコ)



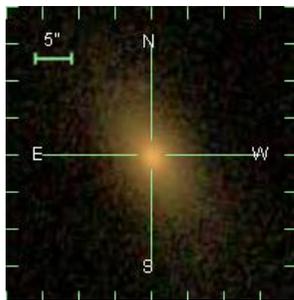
すばる望遠鏡  
(ハワイ)

光学望遠鏡で銀河1個1個  
を分光（スペクトル）観測  
→ 銀河の赤方偏移  $z$  を決定

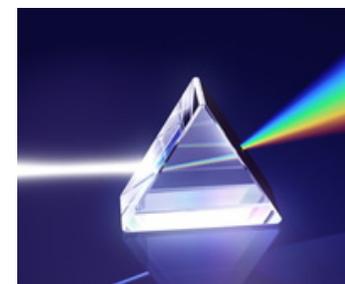
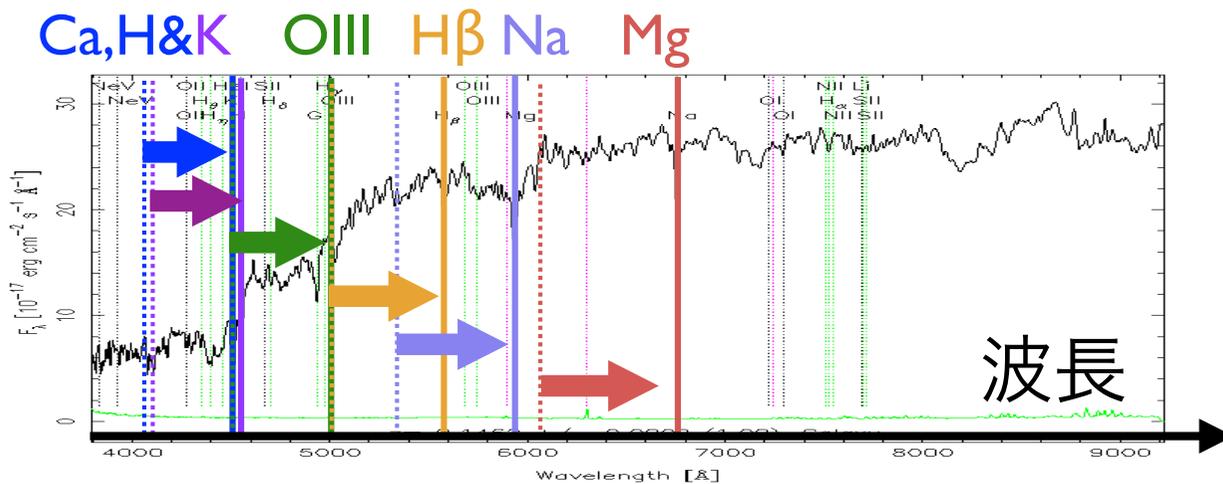
$$z = \Delta\lambda / \lambda$$

(奥行き of ‘距離’ 指標に)

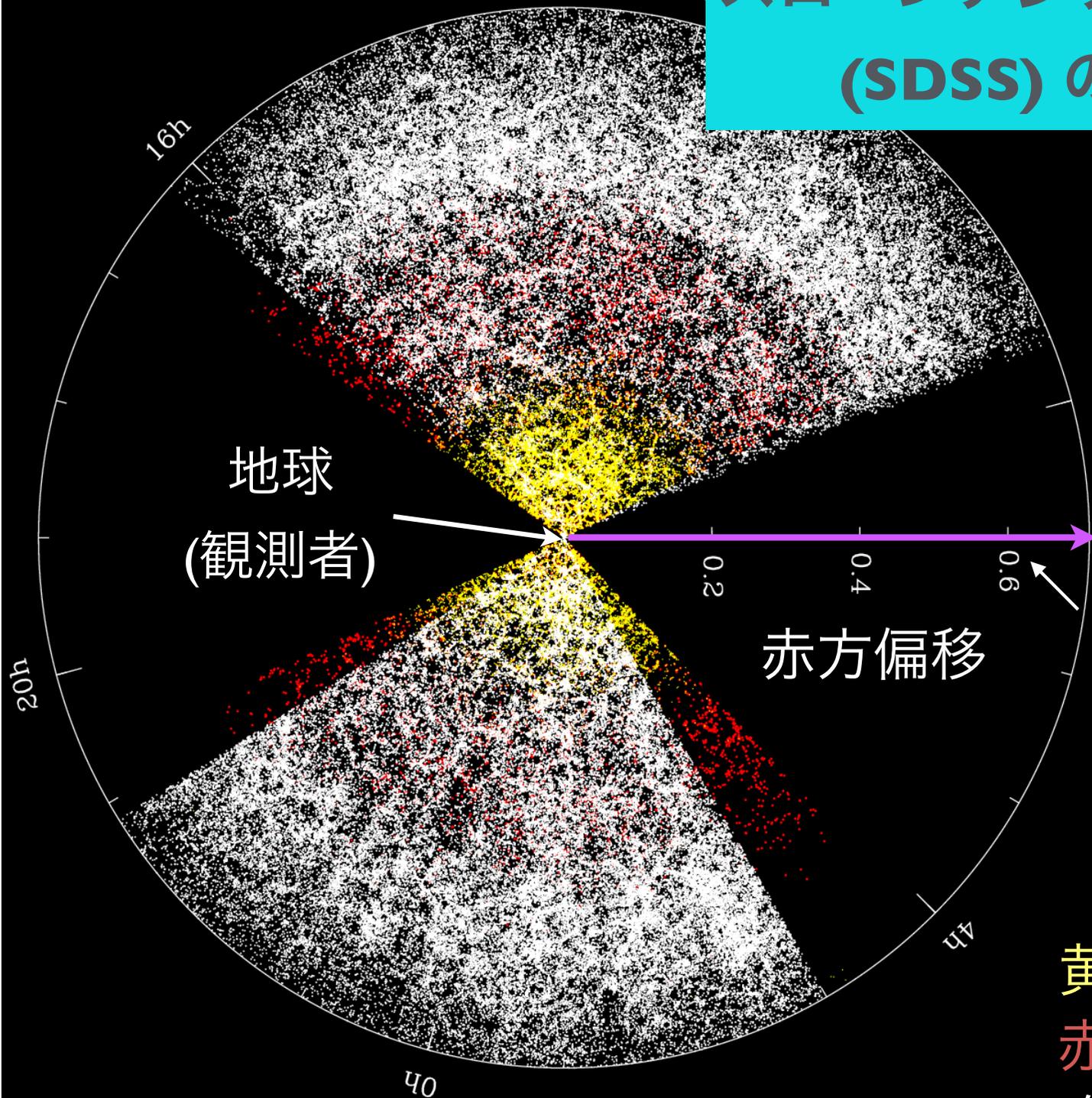
遠方銀河



SDSS SkyServer



# スローンデジタルスカイサーベイ (SDSS) の銀河カタログ



カタログから断面  
を切り取ったもの

地球  
(観測者)

赤方偏移

約60億年前

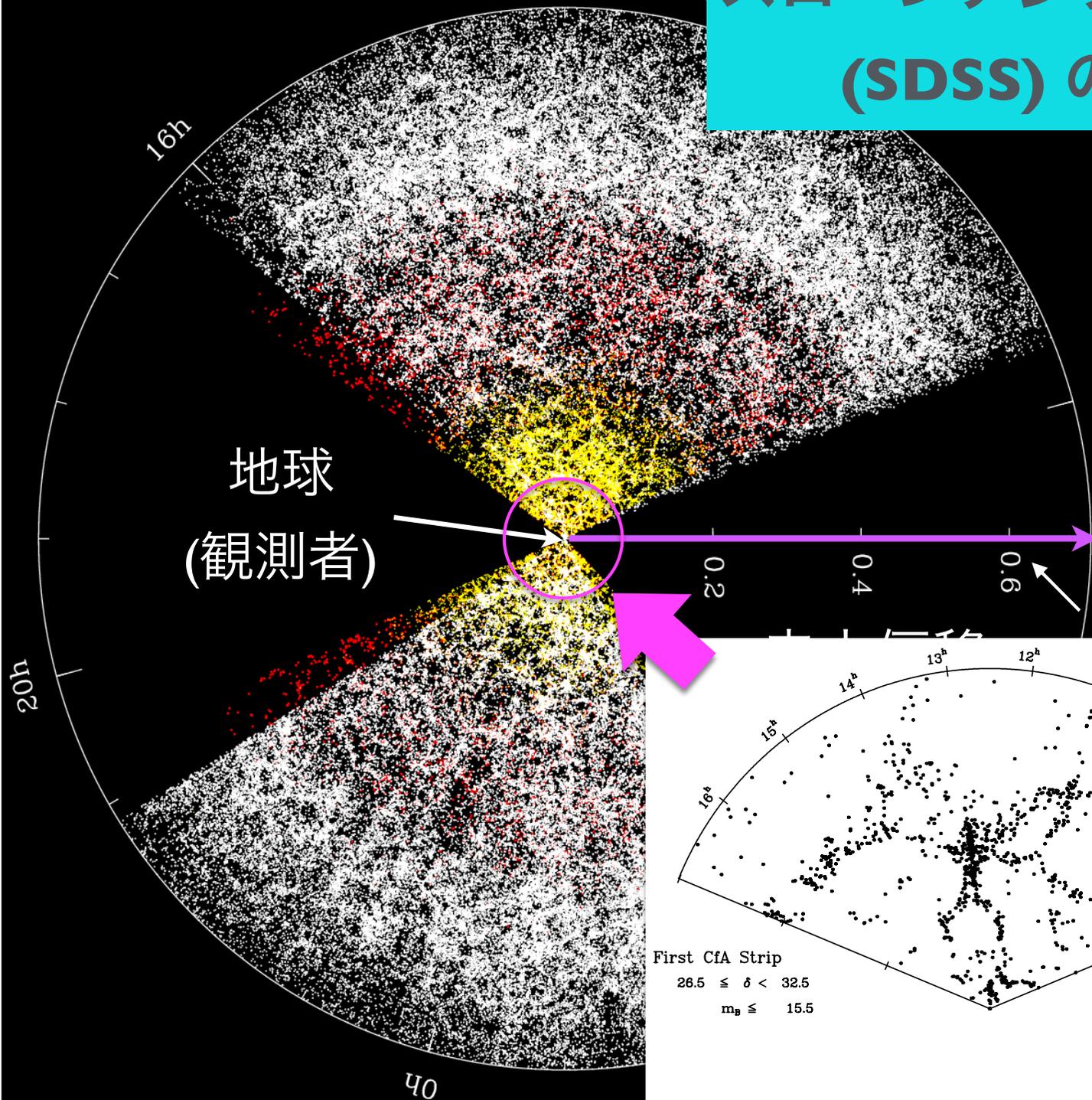
※ 途中段階のもの

黄 : SDSS-II main

赤 : SDSS-II LRG

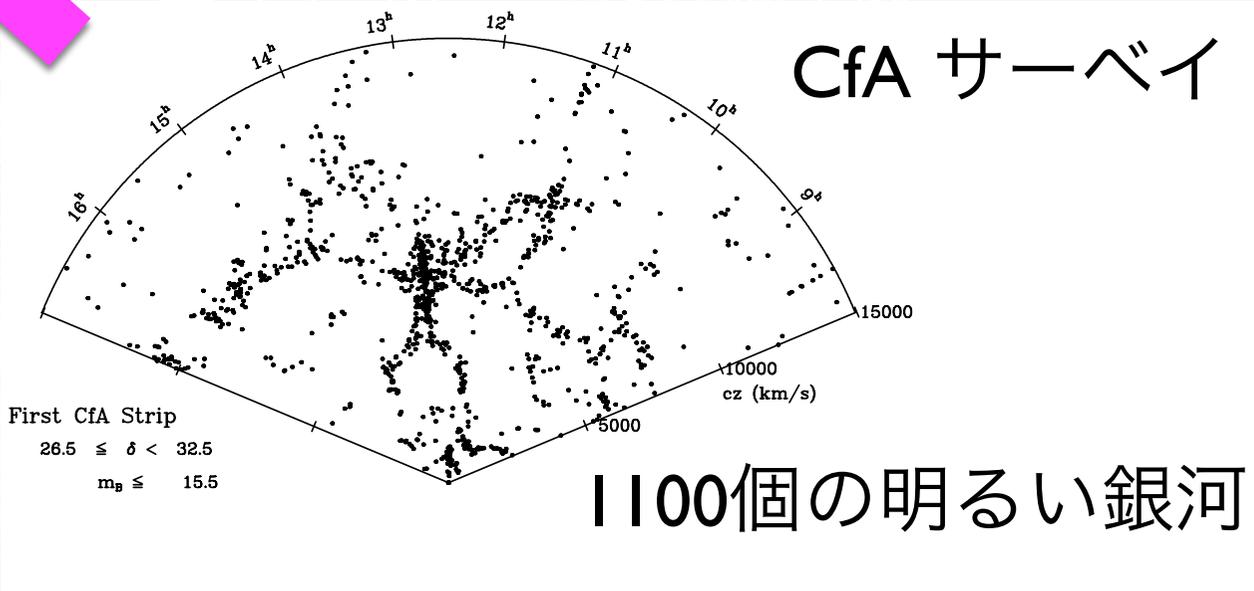
白 : SDSS-III CMASS

# スローンデジタルスカイサーベイ (SDSS) の銀河カタログ



カタログから断面を切り取ったもの

約60億年前

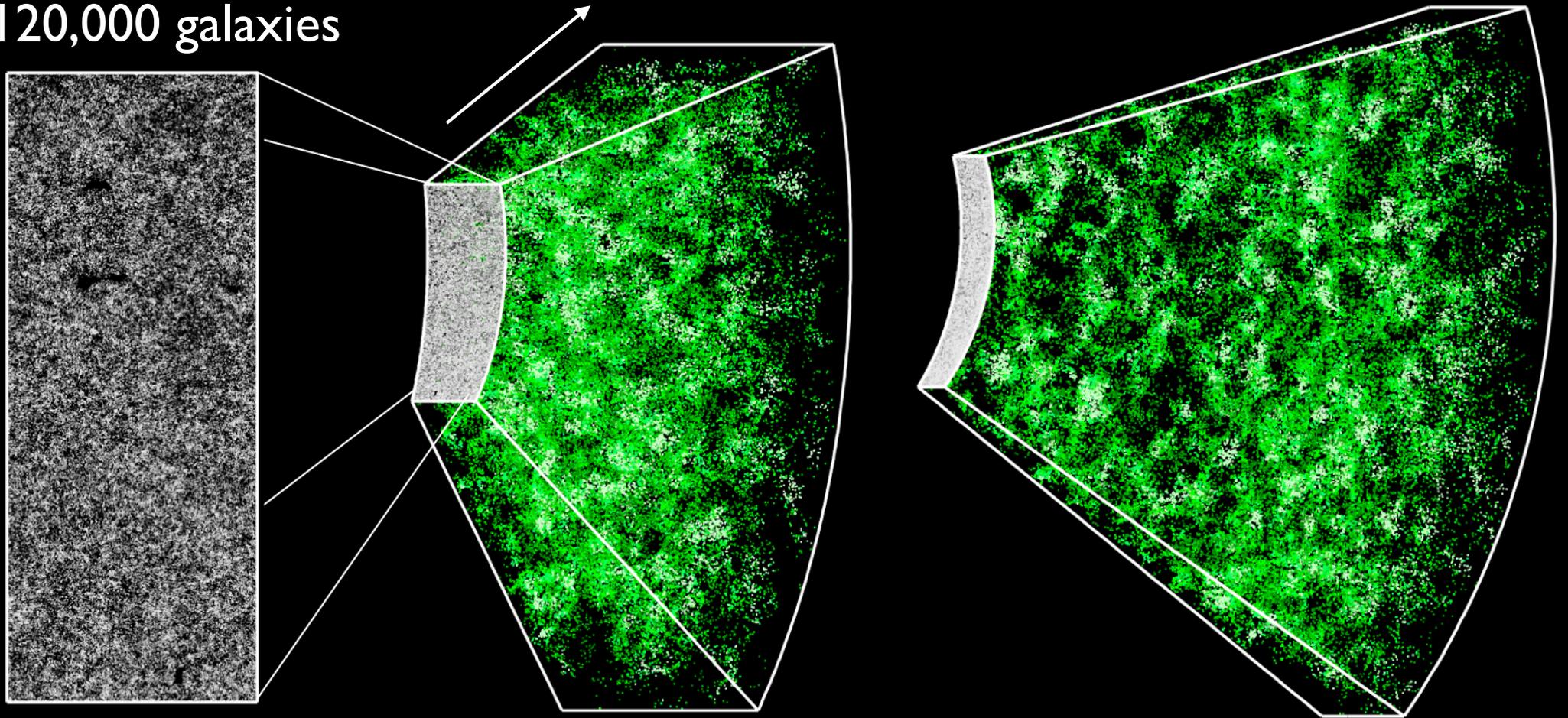


1100個の明るい銀河

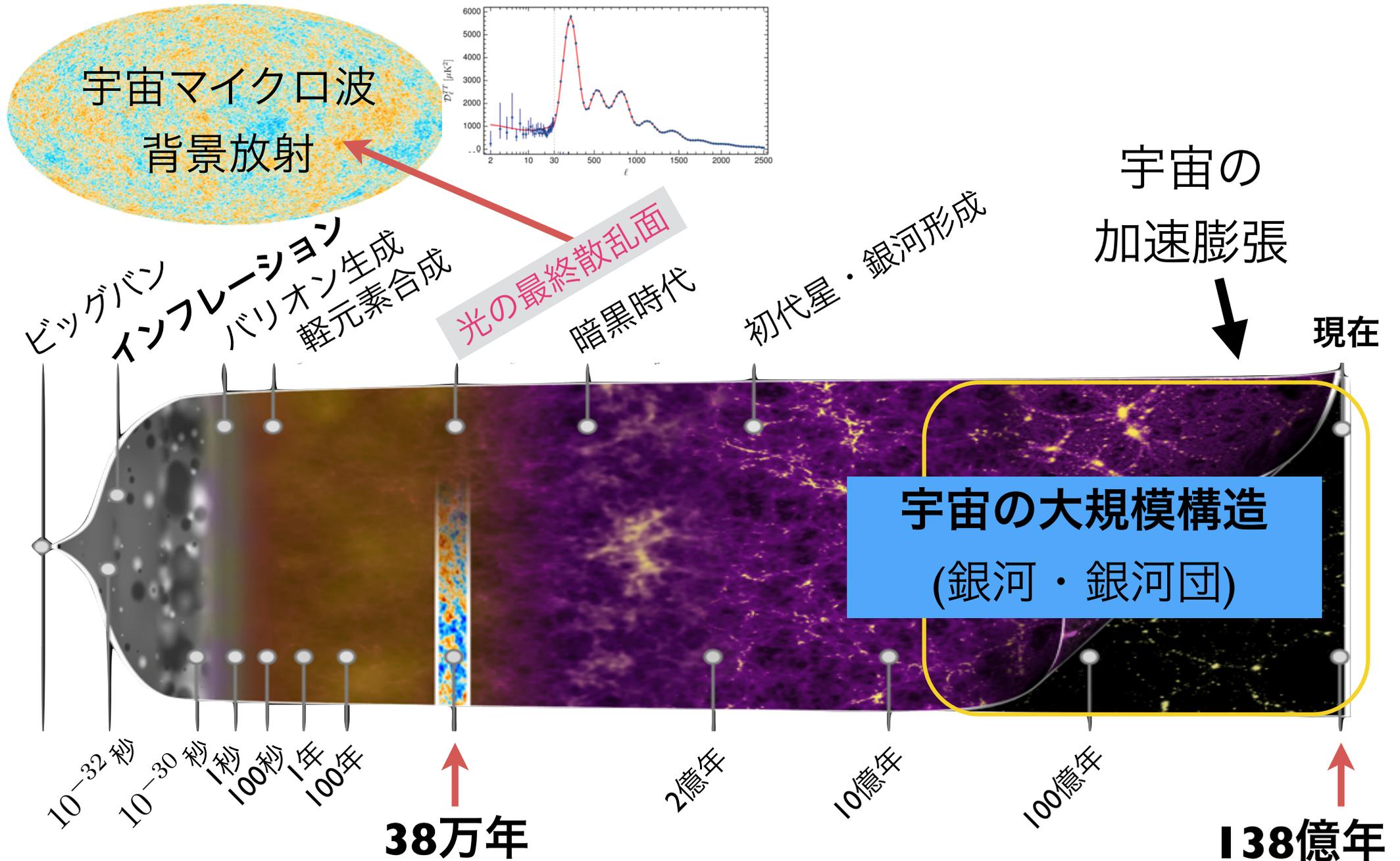
# 銀河分布の3次元地図

赤方偏移

120,000 galaxies



# 宇宙の進化史



# 宇宙論的情報

質量分布のランダムな空間パターンの統計的性質から

- 原始密度ゆらぎの性質
- 宇宙のエネルギー組成・宇宙膨張則に関する

宇宙論パラメーター



インフレーションモデルの制限

ダークエネルギーの性質（状態方程式）

ニュートリノ質量和の制限

宇宙論スケールでの重力のテスト

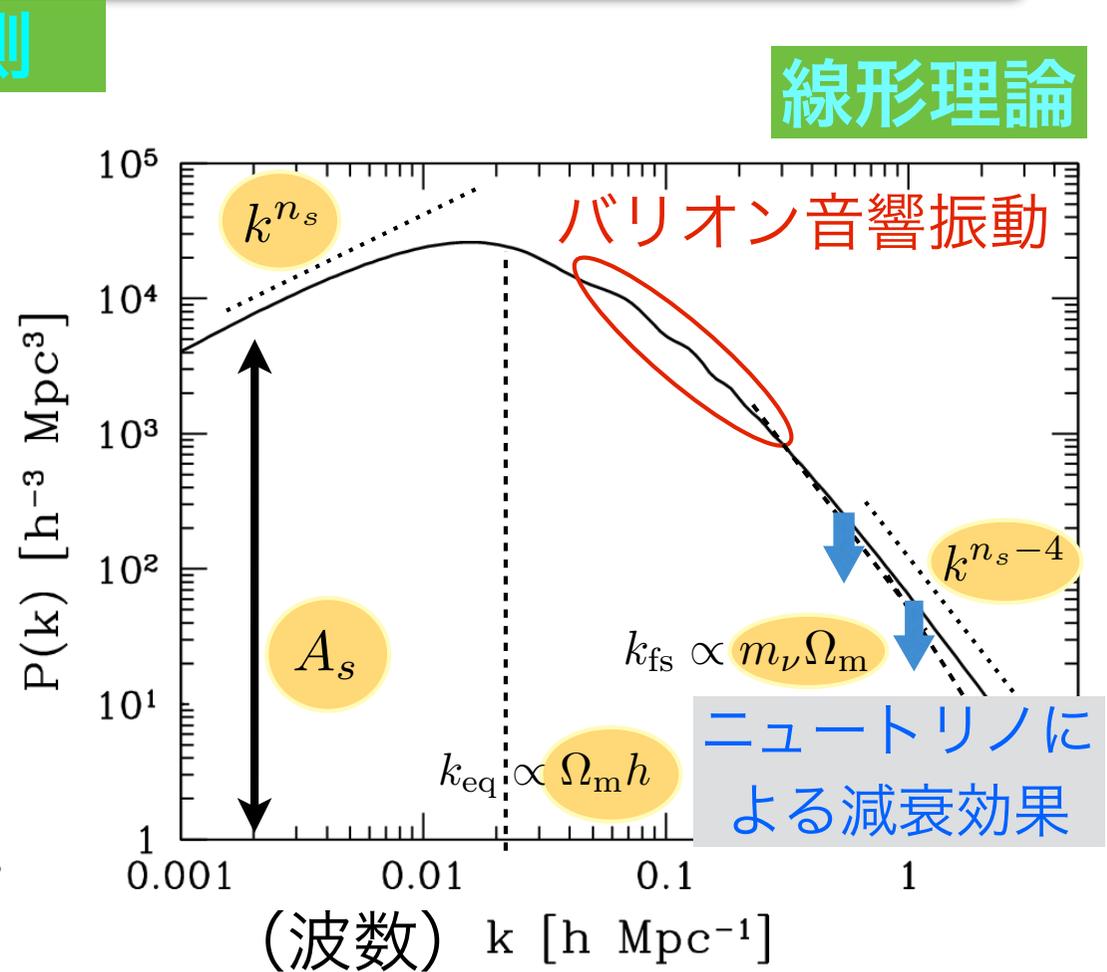
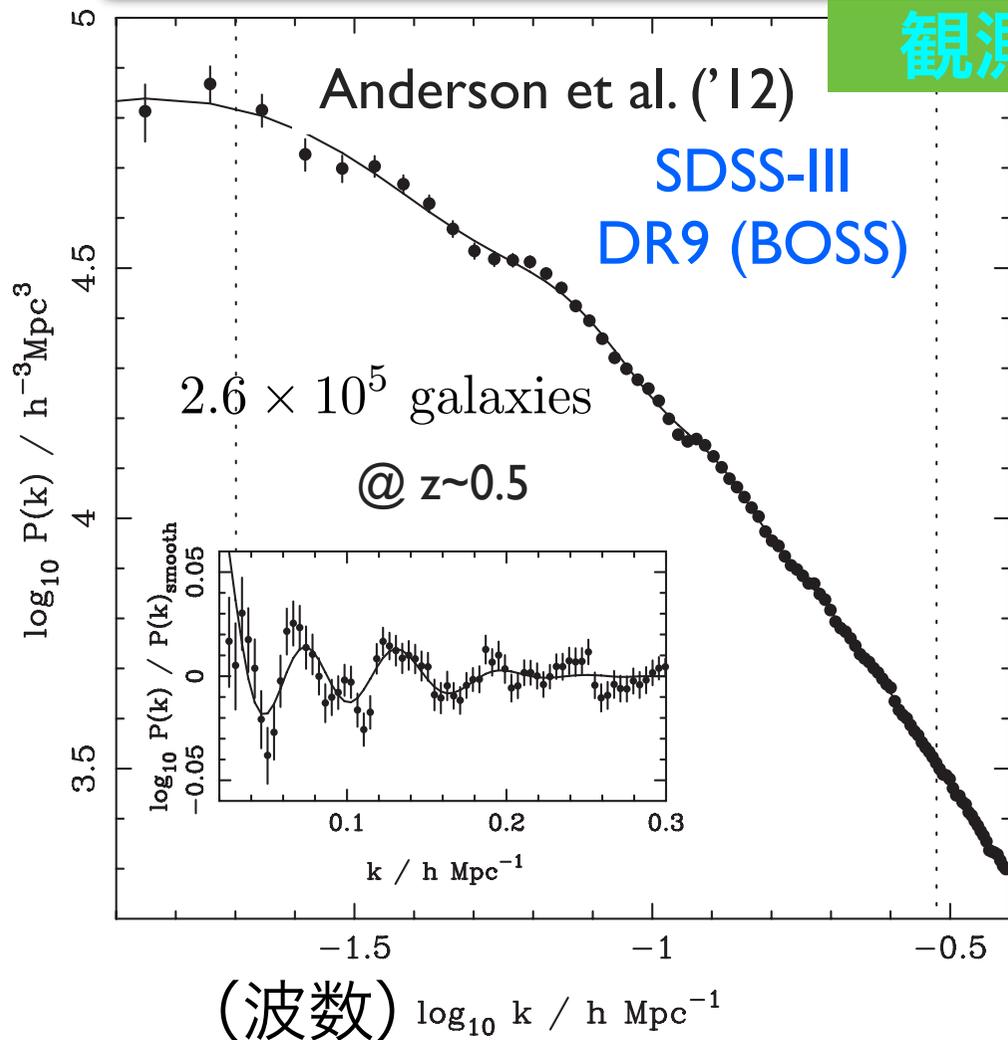
CMBから得られない情報も含む

# パワースペクトル

密度場

$$\delta(\vec{x}) = \frac{n(\vec{x})}{\bar{n}} - 1 = \frac{1}{\sqrt{V}} \sum_{\vec{k}} \delta(\vec{k}) e^{i\vec{k}\cdot\vec{x}}$$

$$P(k) = \frac{1}{N_k} \sum_{|\vec{k}|=k} |\delta(\vec{k})|^2$$



# 精密宇宙論観測の到来

望遠鏡を占有化し、これまで以上に深く広域にサーベイを行う



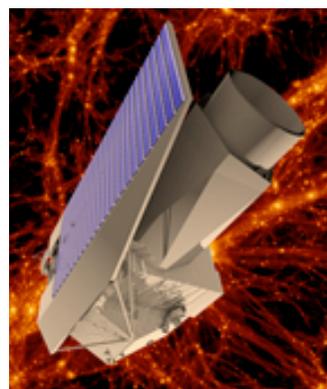
BOSS  
(~2014)

eBOSS  
(2014~)



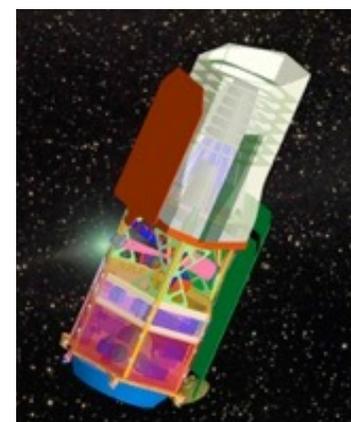
DESI  
(2018+)

LSST (2022+)



WFIRST  
(2024+)

EUCLID  
(2020)



**FastSound**  
(2012~2014)

**SuMIRe**  
(2014~)

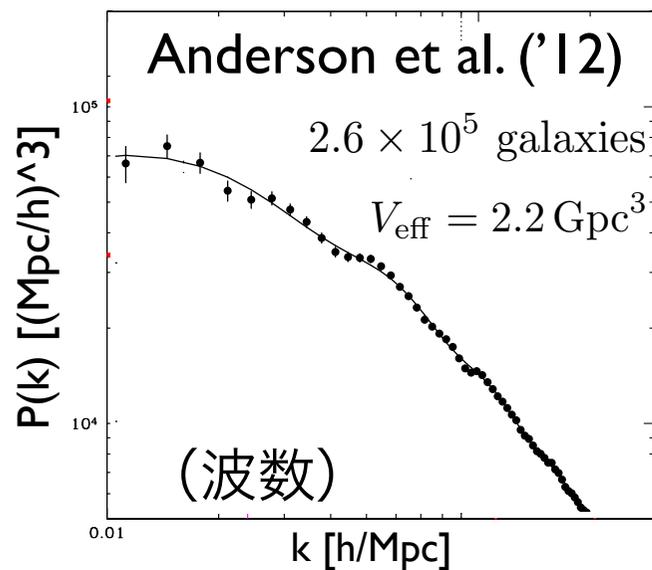
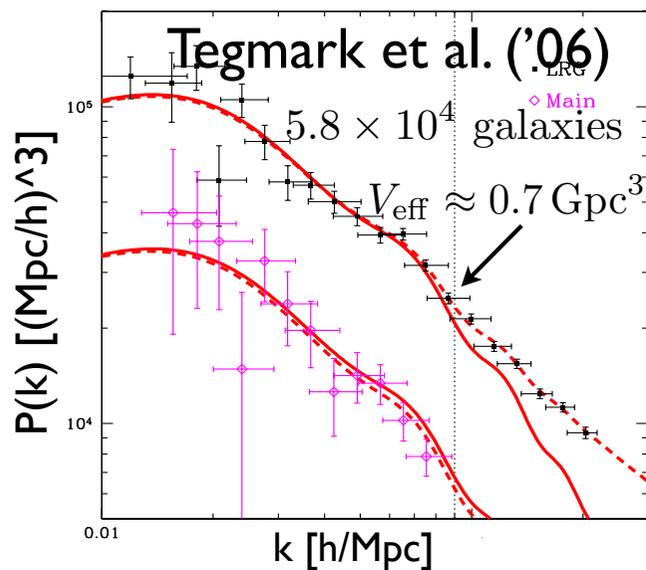
Hyper-Suprime Cam  
Prime Focus Spectrograph

すばる望遠鏡による宇宙論観測



# 精密宇宙論における不安

大規模観測により観測データの統計精度は飛躍的に向上



$10^7 \sim 10^9$  galaxies  
 $V_{\text{eff}} \gtrsim 10 \text{ Gpc}^3$   
~1% precision

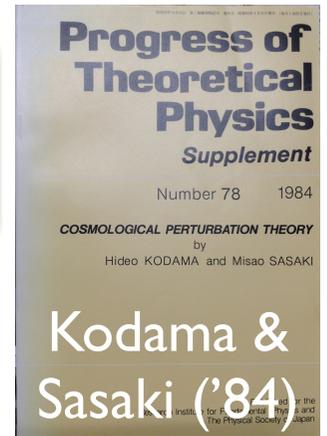
質のよい統計データで新しい宇宙論が拓ける可能性  
その一方、

観測・理論双方の系統誤差が結論に影響を与える可能性  
(その影響を考慮すべき、理論テンプレートに取り込むべき)

# 理論と観測をつなぐ

線形理論

パブリックなCMBボルツマンコードによる高精度・高速計算 (camb, class,...)



質量密度ゆらぎ:  $\delta \equiv \frac{\rho_m}{\bar{\rho}_m} - 1$

非線形重力進化

赤方偏移空間ゆがみ

銀河バイアス

非線形な  
系統的効果

観測銀河の個数密度ゆらぎ:  $\delta_{\text{gal}} \equiv \frac{n_{\text{gal}}}{\bar{n}_{\text{gal}}} - 1$

# 10年前までは、

宇宙論パラメータ解析に  
用いられた理論テンプレート  
(Tegmark et al.'06)

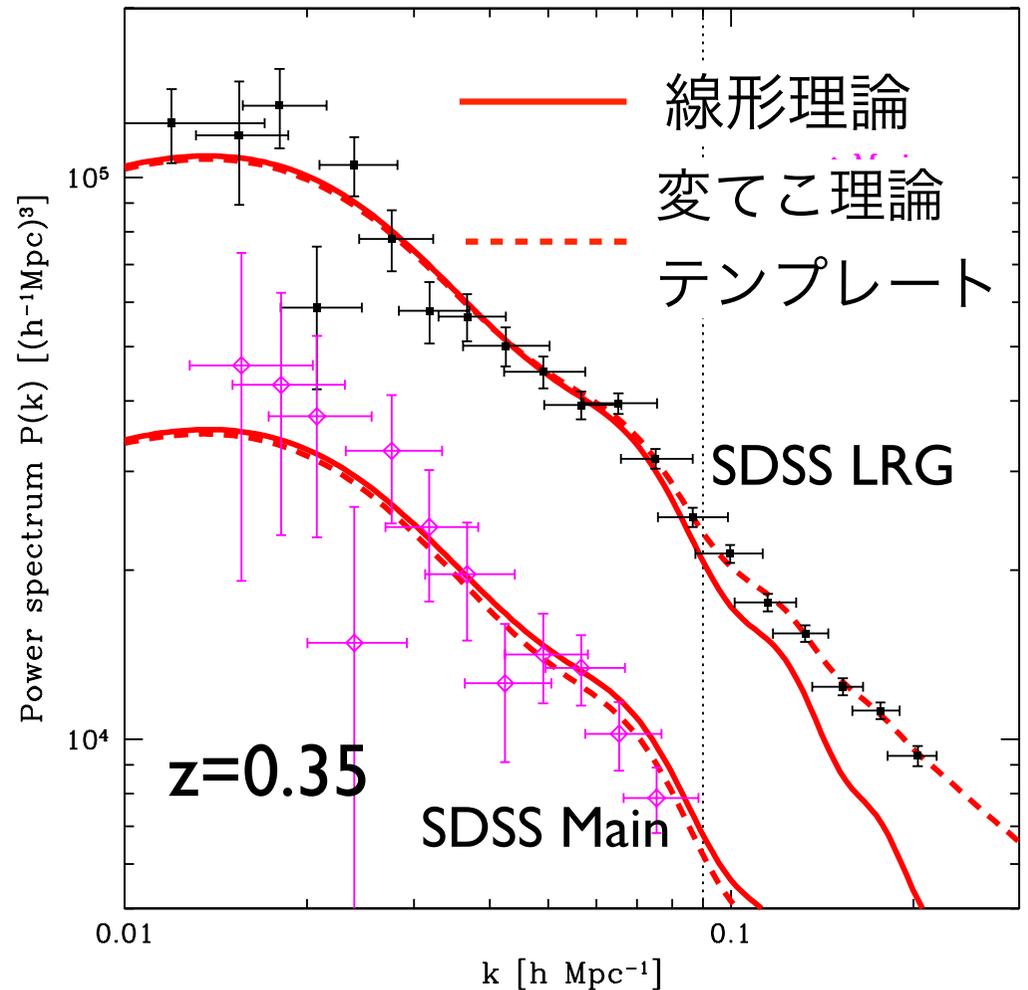
$$P_g(k) = P_{\text{dewiggled}}(k) b^2 \frac{1 + Q_{\text{nl}} k^2}{1 + 1.4k},$$

$$P_{\text{dewiggled}}(k) = W(k)P(k) + [1 - W(k)]P_{\text{nowiggle}}(k)$$

$$W(k) \equiv e^{-(k/k_*)^2/2}$$

線形理論

● : フィッティングパラメーター



引用件数 1000以上

これからの精密観測では許されない

# 受賞の対象となった業績

宇宙の大規模構造の重力進化計算に対する

✓ 摂動論的計算手法の開発・発展

• 再和法による摂動計算の精度向上・高速

• 修正重力理論での計算方法

• 赤方偏移空間ゆがみの理論モデル

• ニュートリノに質量がある場合の取り扱い

✓ 銀河サーベイの理論テンプレートの作成・観測への応用

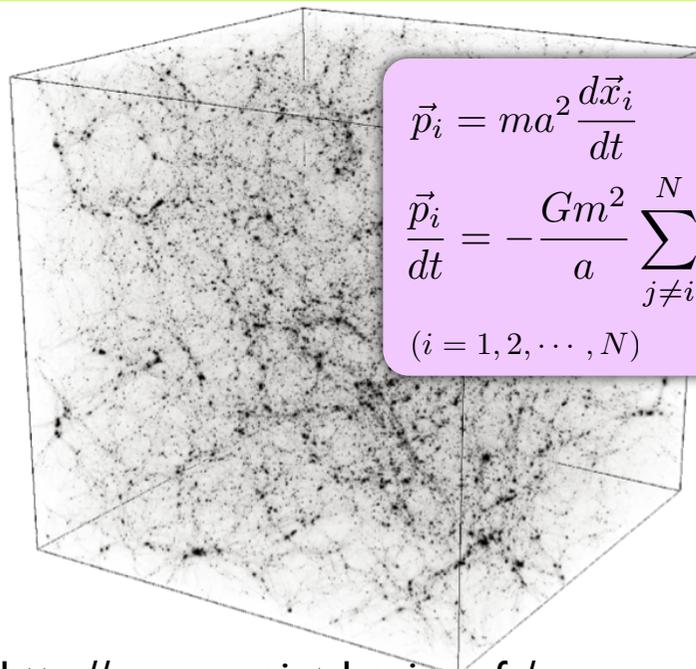
# 大規模構造研究の理論ツール

線形理論を越えて、冷たい暗黒物質が優勢

の宇宙の構造形成を取り扱う代表的手法

(その派生・発展版にフィッティング公式、ハローモデルなど)

## 宇宙論的N体シミュレーション

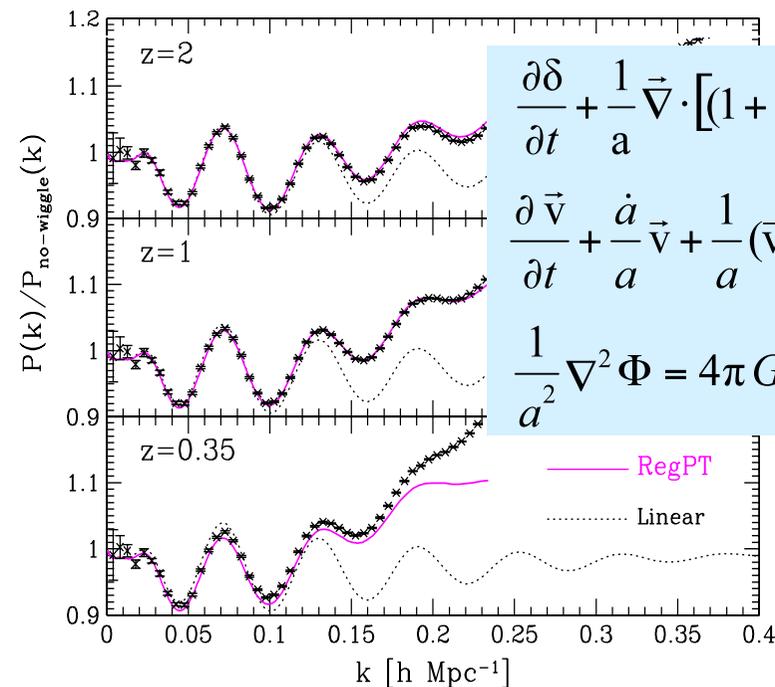


$$\vec{p}_i = ma^2 \frac{d\vec{x}_i}{dt}$$
$$\frac{d\vec{p}_i}{dt} = -\frac{Gm^2}{a} \sum_{j \neq i}^N \frac{\vec{x}_i - \vec{x}_j}{|\vec{x}_i - \vec{x}_j|^3}$$

( $i = 1, 2, \dots, N$ )

<http://www.projet-horizon.fr/>

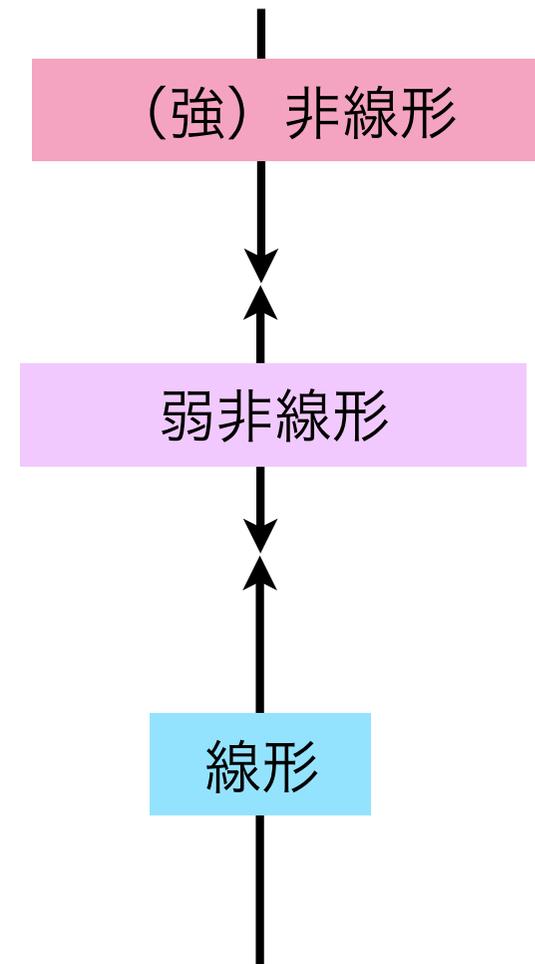
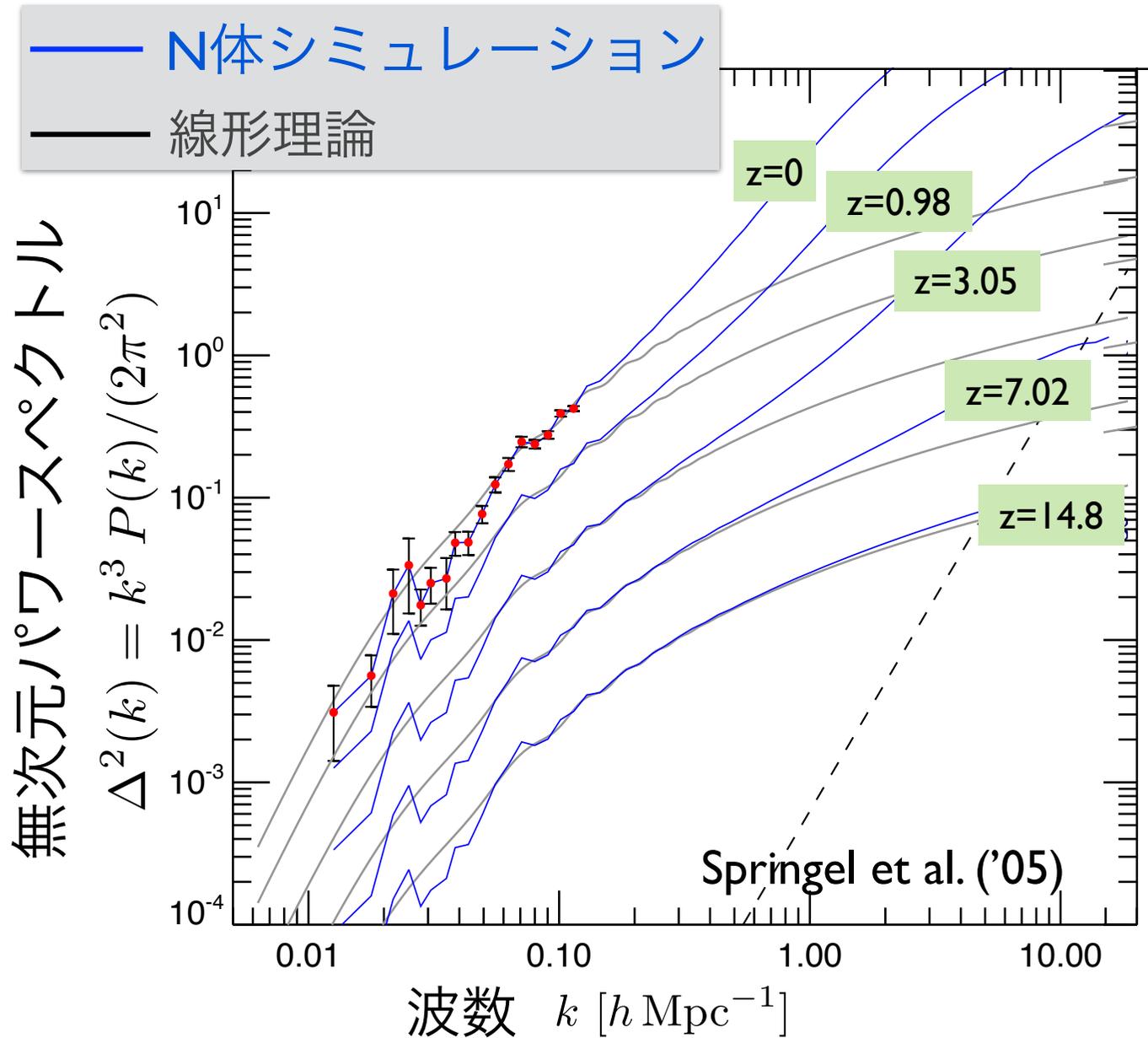
## 摂動論による解析計算



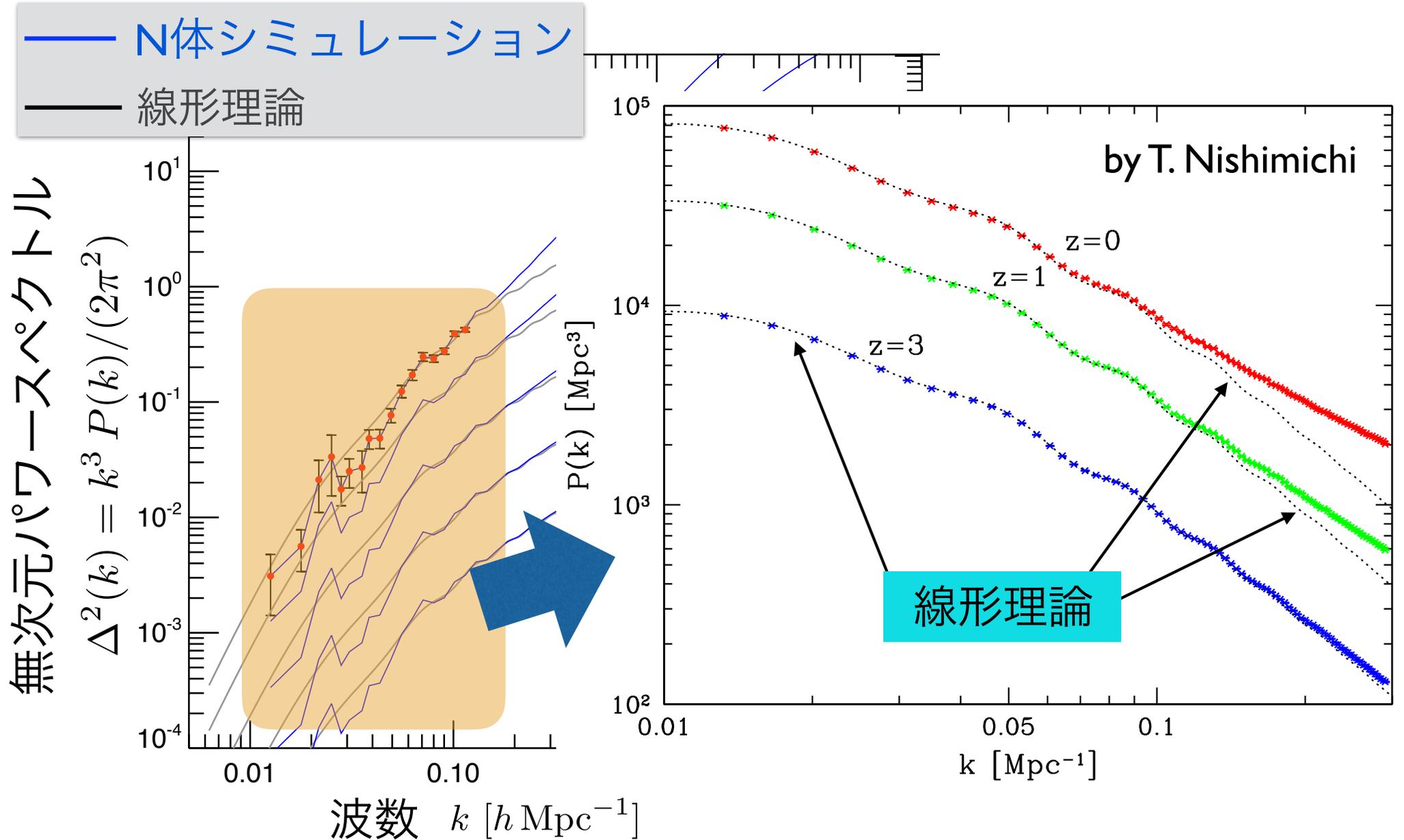
$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{1}{a} \vec{\nabla} \cdot [(1 + \delta) \vec{v}] = 0$$
$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \frac{\dot{a}}{a} \vec{v} + \frac{1}{a} (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} = -\frac{1}{a} \vec{\nabla} \Phi$$
$$\frac{1}{a^2} \nabla^2 \Phi = 4\pi G \bar{\rho}_m \delta$$

AT et al. ('12)

# パワースペクトルの非線形重力進化



# パワースペクトルの非線形重力進化



# 大規模構造の摂動論

ゆらぎの波長  $\ll$  ハッブル半径

弱い重力  $\rightarrow$  ニュートン重力

冷たい暗黒物質(CDM) + バリオン  $\approx$  圧力ゼロの渦なし流体

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{1}{a} \vec{\nabla} \cdot [(1 + \delta) \vec{v}] = 0$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \frac{\dot{a}}{a} \vec{v} + \frac{1}{a} (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} = -\frac{1}{a} \vec{\nabla} \Phi$$

$$\frac{1}{a^2} \nabla^2 \Phi = 4\pi G \bar{\rho}_m \delta$$

(single-stream approx.)

Juszkiewicz ('81), Vishniac ('83), Goroff et al. ('86), Suto & Sasaki ('91), Makino, Sasaki & Suto ('92), Jain & Bertschinger ('94), ...

standard PT

$$|\delta| \ll 1$$

$$\delta = \delta^{(1)} + \delta^{(2)} + \delta^{(3)} + \dots \quad \langle \delta(\mathbf{k}; t) \delta(\mathbf{k}'; t) \rangle = (2\pi)^3 \delta_D(\mathbf{k} + \mathbf{k}') P(|\mathbf{k}|; t)$$

# 摂動計算をちょっとだけ

## n次の摂動解

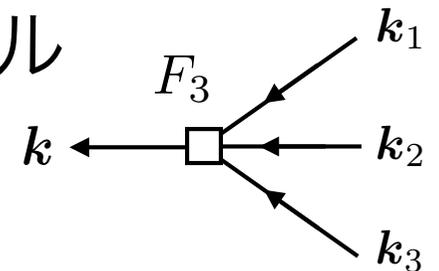
$$\delta^{(n)}(\mathbf{k}; t) = \int \frac{d^3 \mathbf{k}_1 \cdots d^3 \mathbf{k}_n}{(2\pi)^{3(n-1)}} \delta_{\text{D}}(\mathbf{k} - \mathbf{k}_{12\dots n}) \underbrace{F_n(\mathbf{k}_1, \dots, \mathbf{k}_n; t)}_{\text{摂動論カーネル}} \delta_0(\mathbf{k}_1) \cdots \delta_0(\mathbf{k}_n),$$

初期密度場 (確率場)

## パワースペクトル

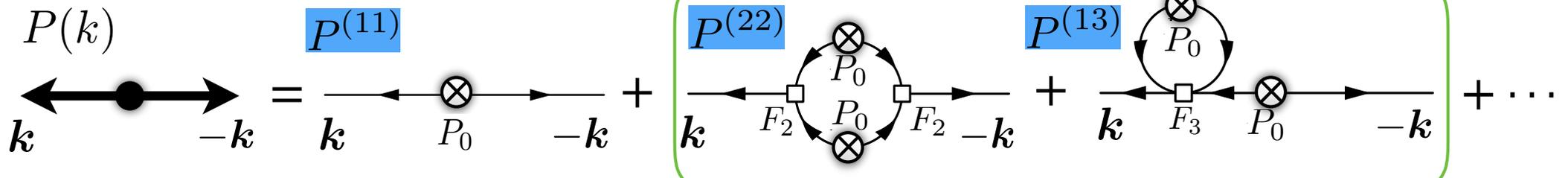
$$\langle \delta(\mathbf{k}; t) \delta(\mathbf{k}'; t) \rangle = (2\pi)^3 \delta_{\text{D}}(\mathbf{k} + \mathbf{k}') P(|\mathbf{k}|; t)$$

摂動論カーネル



➡  $P(k) = P^{(11)}(k) + P^{(22)}(k) + P^{(13)}(k) + \dots$

## ダイアグラム表現



leading order  
(線形 or ツリー)

next-to-leading order (ループ)

# 先駆的研究

## パワースペクトルに対する解析的表式 (Iループ)

Suto & Sasaki ('91)

Makino, Sasaki & Suto ('92)

VOLUME 66, NUMBER 3

PHYSICAL REVIEW LETTERS

21 JANUARY 1991

### Quasilinear Theory of Cosmological Self-Gravitating Systems

Yasushi Suto and Misao Sasaki

*Uji Research Center, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Uji 611, Japan*

(Received 18 June 1990)

Nonlinear effects of self-gravitating systems in cosmology are considered on the basis of perturbation theory. In particular, we examine several cases in which evolution of the power spectrum of density fluctuations can be analytically calculated. In some cases, nonlinearity suppresses the growth of fluctuations relative to linear theory, and the power transfer via nonlinear mode coupling is sensitive to the specific shape of the underlying fluctuation spectrum. The result is in good agreement with recent numerical simulations.

PACS numbers: 98.60.Mp, 05.45.+b, 98.80.Dr

PHYSICAL REVIEW D

VOLUME 46, NUMBER 2

15 JULY 1992

### Analytic approach to the perturbative expansion of nonlinear gravitational fluctuations in cosmological density and velocity fields

Nobuyoshi Makino

*Uji Research Center, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Uji 611, Japan  
and Department of Physics, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima 724, Japan*

Misao Sasaki

*Department of Physics, Kyoto University, Kyoto 606, Japan*

Yasushi Suto

*Uji Research Center, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Uji 611, Japan*

(Received 5 February 1992)

Equations of self-gravitating systems in the Universe are solved by expanding as perturbation series in Fourier space. The formulas for the higher-order terms are given for density and velocity fields. We ap-

pt, artificial two-body relaxation, and so on. Hence, of great value to check the numerical simulation and validity by other analytical methods. In this paper, we present a quasilinear perturbation analysis, following the formalism developed by Juszkiewicz<sup>3</sup> and Anic<sup>4</sup> to see the weakly nonlinear effect on the cosmological density fluctuations. We found that the higher-order perturbations can be analytically integrated to give power-law-type spectra of density fluctuations. The results clearly illustrate the role of primordial spectrum on the subsequent nonlinear evolution of cosmological gravitating systems, as suggested by the earlier numerical works.<sup>1,2</sup>

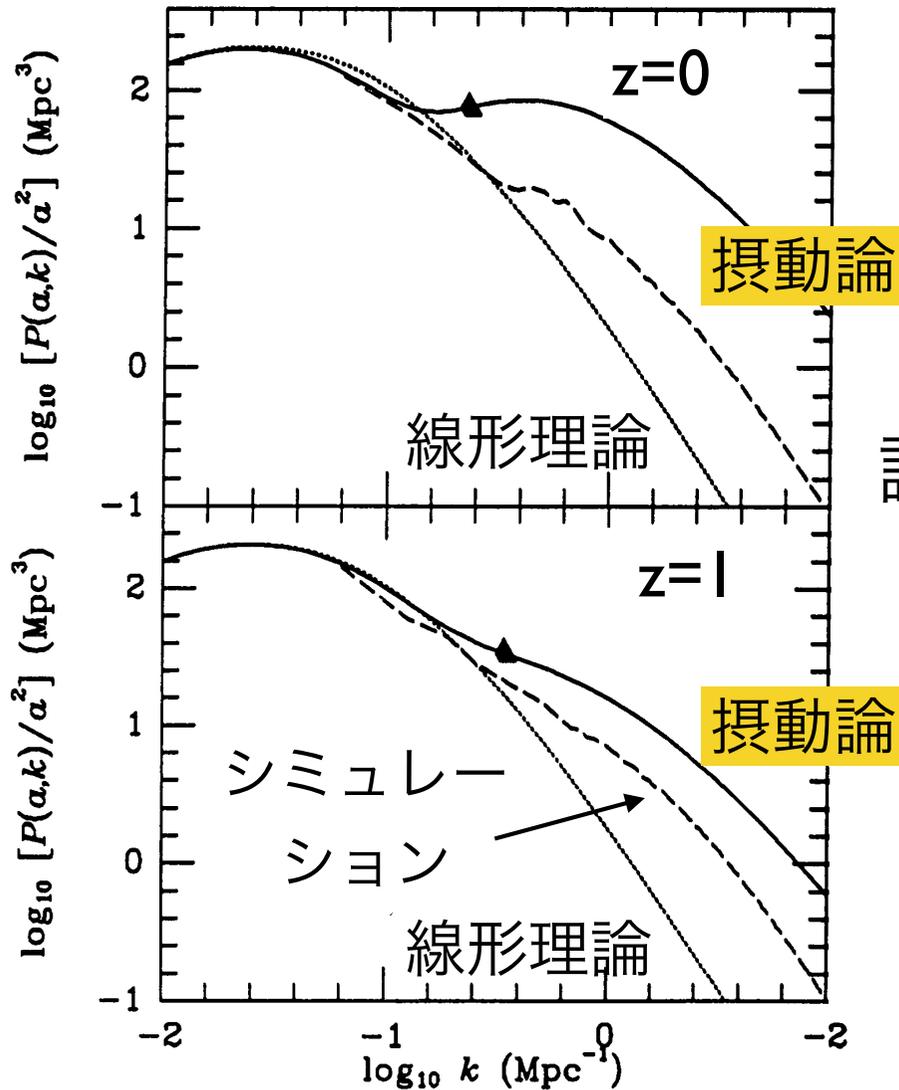
We expand the density fluctuations as a perturbation series:

$$\delta(\mathbf{k}, t) \equiv \delta_1(\mathbf{k}, t) + \delta_2(\mathbf{k}, t) + \delta_3(\mathbf{k}, t) + \dots,$$

where the expressions for the above perturbations can be found in Ref. 4. To second order, the spectrum reduces

# 摂動論は使えない！...？

## CDMスペクトル



定性的にしかシミュレーションのふるまいと一致しない！？

当時のシミュレーションは、摂動論が適用できる領域で十分な精度・解像度がなかった

ボックスサイズ：100Mpc

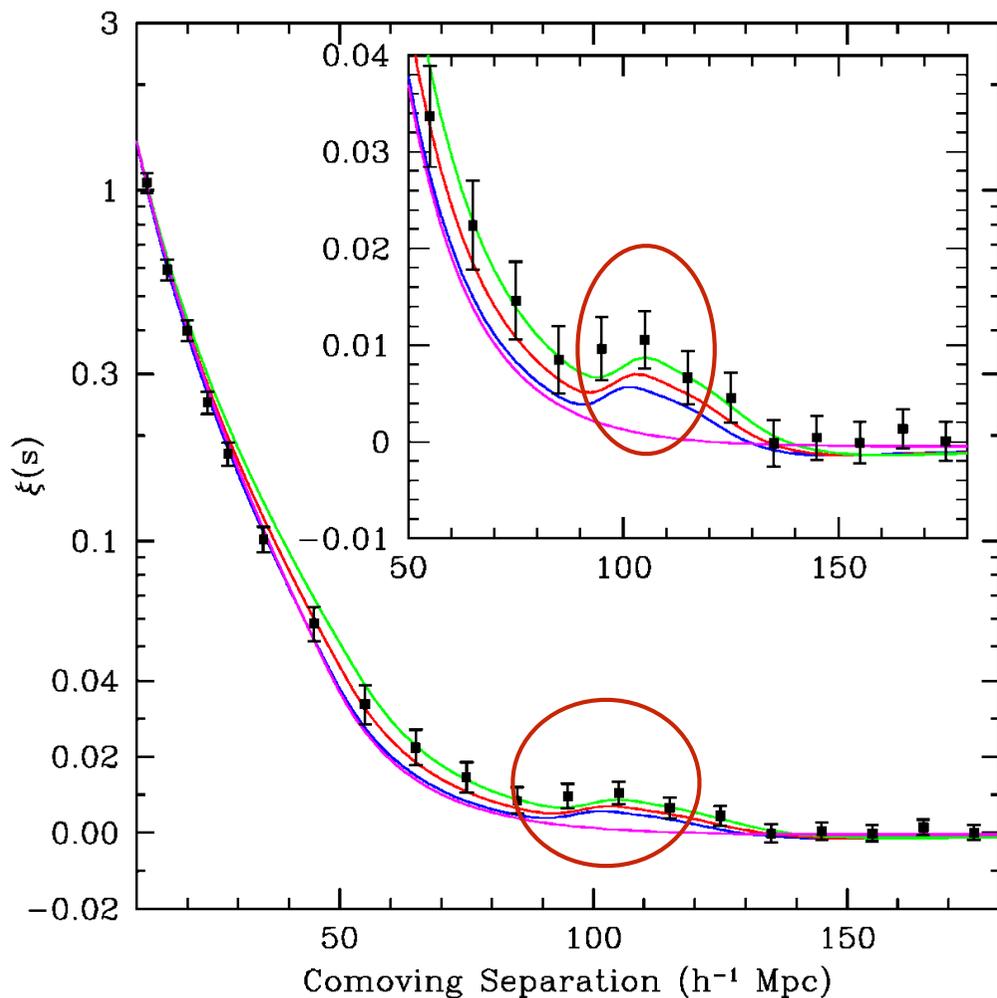
粒子数： $144^3$

Jain & Bertchinger ('94)

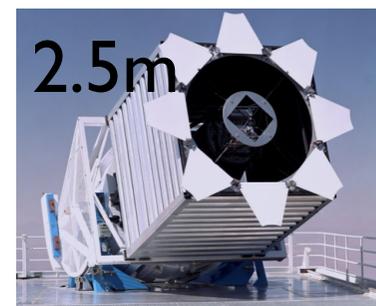
また、そんな大スケールの観測もなかった

# バリオン音響振動の検出！

2点相関関数  $\xi(s) = \int \frac{dk}{2\pi^2} k^2 P(k) \frac{\sin(ks)}{ks}$

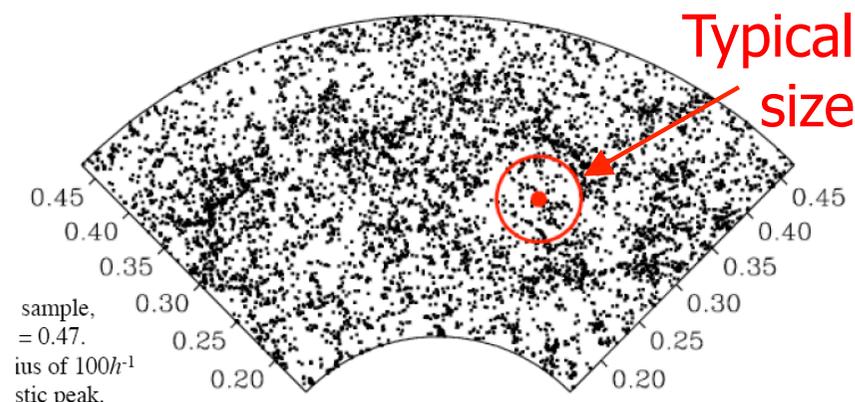


スローンデジタル  
スカイサーベイ



43,000個の明るい銀河 (LRG)

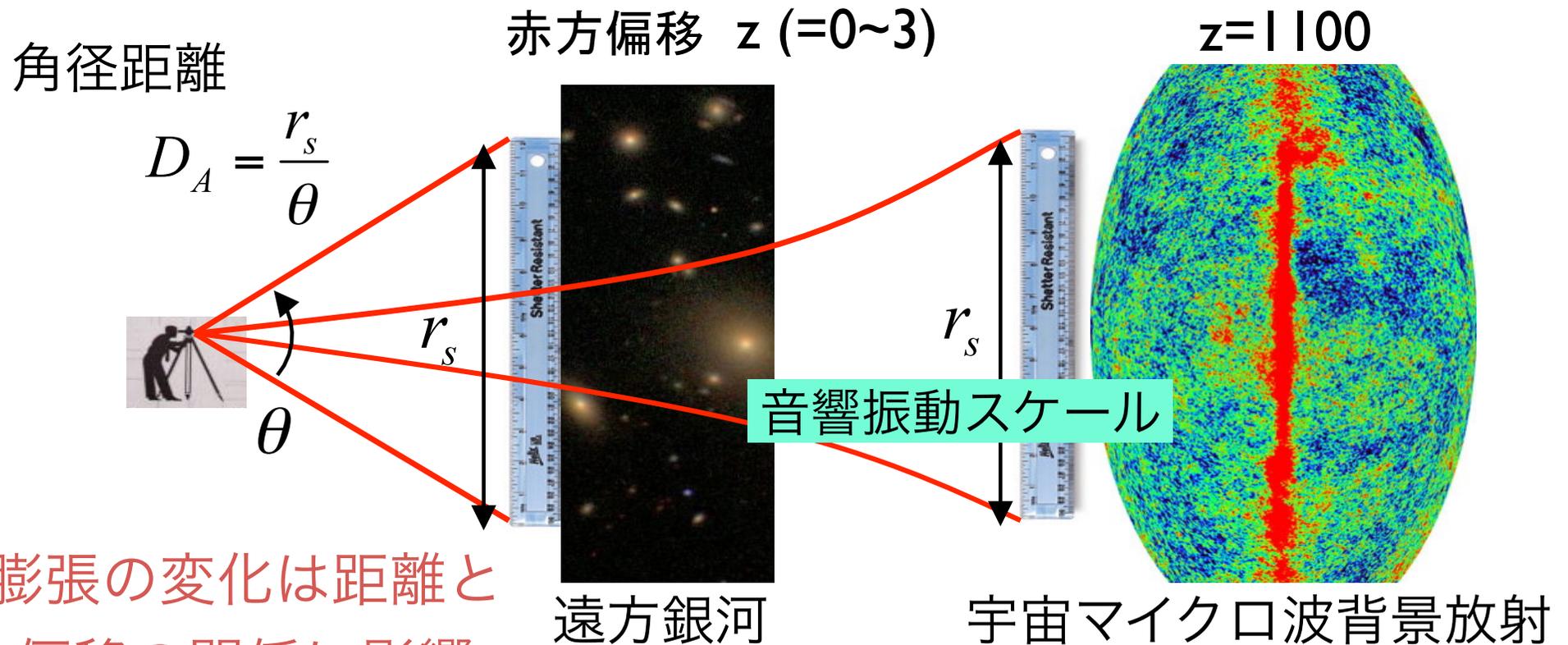
@ z=0.3



Eisenstein et al. ('05)

# バリオン音響振動

- 宇宙晴れ上がり前のバリオン-光子流体の痕跡  
(⇔ 宇宙マイクロ波背景放射に現れる音響振動)
- 振動スケールは「標準ものさし」になる  
→ 遠方宇宙の宇宙膨張診断 (加速膨張の起源に迫る手がかり)



宇宙膨張の変化は距離と  
赤方偏移の関係に影響

# 日本でも宇宙論観測を

すばる望遠鏡を準占有化することで本格的な宇宙論の  
サーベイ観測を行う機運が生じた

FastSound プロジェクト (2012年~2016年)

SuMIRe プロジェクト (2014年~)

サイエンス検討会

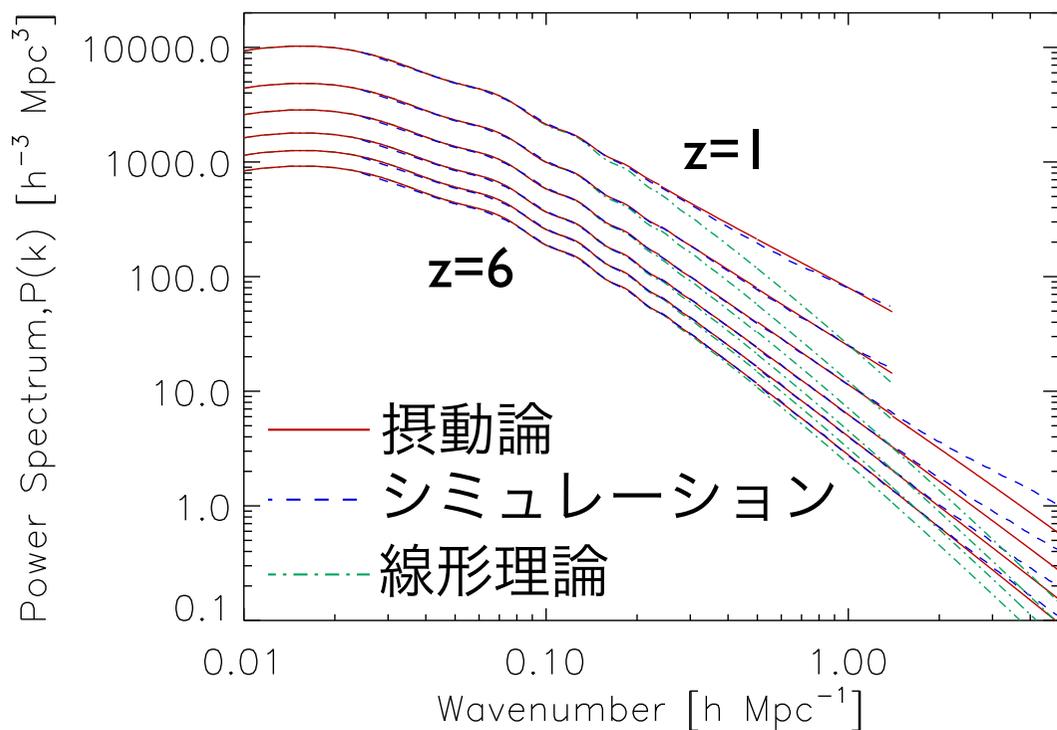
→ 「観測の精度が上がるなら理論の精度も何とかしないと」



周りにも興味を持つ学生が集まりだした (当時、東大所属)

# 摂動論の再生

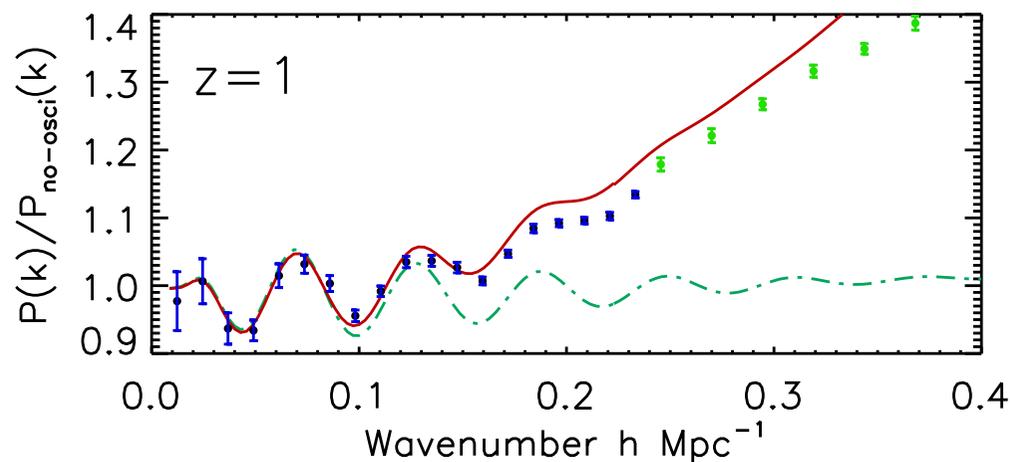
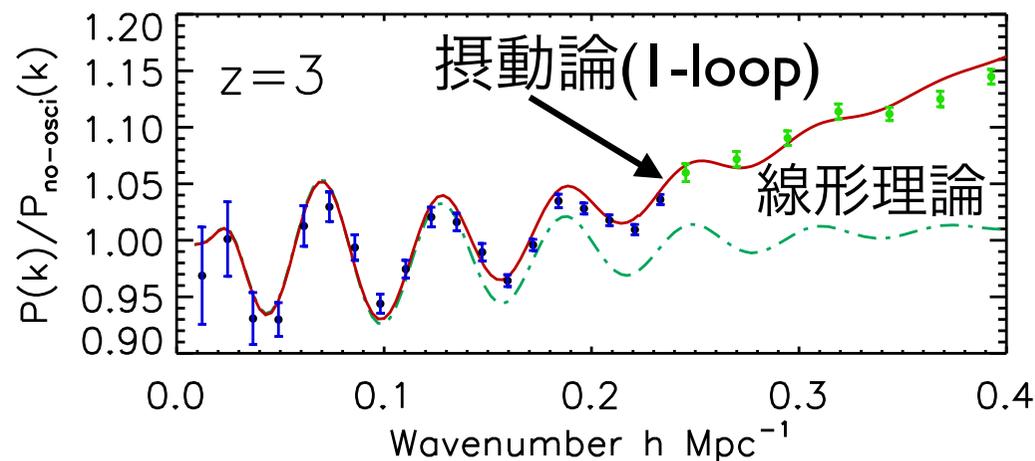
バリオン音響振動に対する非線形進化の記述に使える！



Jeong & Komatsu ('06)

これはおもしろそうだ！

シミュレーションの精度は？ 摂動論も改良の余地あり？



# 摂動論の改良

精度の向上と適用範囲を広げたい

流体方程式にもとづく摂動計算だから流体力学を学べ

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 674:617–635, 2008 February 20  
© 2008. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

AT & Hiramatsu ('08)

A CLOSURE THEORY FOR NONLINEAR EVOLUTION OF COSMOLOGICAL POWER SPECTRA

ATSUSHI TARUYA AND TAKASHI HIRAMATSU

Research Center for the Early Universe (RESCEU), School of Science, University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan

*Received 2007 August 23; accepted 2007 November 12*

ABSTRACT

We apply a nonlinear statistical method in turbulence to the cosmological perturbation theory and derive a closed set of evolution equations for matter power spectra. The resultant closure equations consistently recover the one-loop results of standard perturbation theory, and beyond that, it is still capable of treating the nonlinear evolution of matter

パワースペクトルの非摂動な発展方程式を導出

乱流の統計理論で知られる近似法をもとに、モーメント連鎖方程式から閉じた方程式系を得る (完結近似)

# 完結近似

AT & Hiramatsu ('08)

従来の摂動論

$$\begin{array}{c}
 \overleftrightarrow{P(k)} \\
 \begin{array}{c}
 \xleftarrow{k} \bullet \xrightarrow{-k} \\
 = \\
 \xleftarrow{k} \otimes \xrightarrow{-k} + \\
 \xleftarrow{k} \begin{array}{c} \text{---} \square \text{---} \\ \text{---} \otimes \text{---} \\ \text{---} \square \text{---} \\ \text{---} \otimes \text{---} \\ \text{---} \square \text{---} \end{array} \xrightarrow{-k} + \\
 \xleftarrow{k} \begin{array}{c} \text{---} \square \text{---} \\ \text{---} \otimes \text{---} \\ \text{---} \square \text{---} \end{array} \xrightarrow{-k} + \dots
 \end{array}
 \end{array}$$

非摂動量（プロパゲーター）を用いて展開を書き直して、1ループレベルで打ち切る

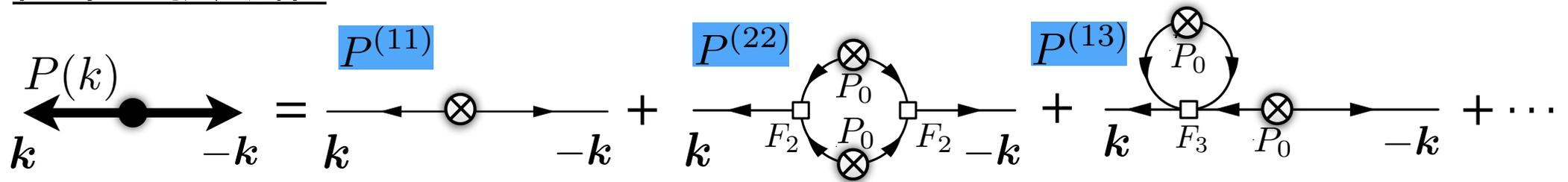
パワース ペクトル プロパ ゲーター	$  \begin{array}{c}  \overleftrightarrow{P_{ab}(k;t,t')} \\  \xleftarrow{t} \bullet \xrightarrow{t'} \\  = \\  \xleftarrow{t} \otimes \xrightarrow{t'} + 2 \xleftarrow{t} \begin{array}{c} \text{---} \bullet \text{---} \\ \text{---} \bullet \text{---} \\ \text{---} \bullet \text{---} \end{array} \xrightarrow{t'} \\  \text{1-loop}  \end{array}  $
	$  \begin{array}{c}  \overleftrightarrow{G_{ab}(k t,t')} \\  \xleftarrow{t} \text{---} \xrightarrow{t'} \\  = \\  \xleftarrow{t} \text{---} \xrightarrow{t'} + 4 \xleftarrow{t} \begin{array}{c} \text{---} \bullet \text{---} \\ \text{---} \bullet \text{---} \\ \text{---} \bullet \text{---} \end{array} \xrightarrow{t'} \\  \text{1-loop} \\  s_1 \quad s_2  \end{array}  $

これを時間発展方程式として定式化（非線形な積分微分方程式）

# 完結近似

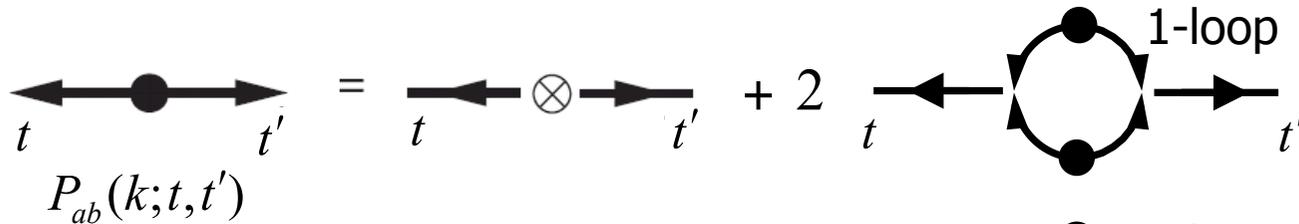
AT & Hiramatsu ('08)

## 従来の摂動論

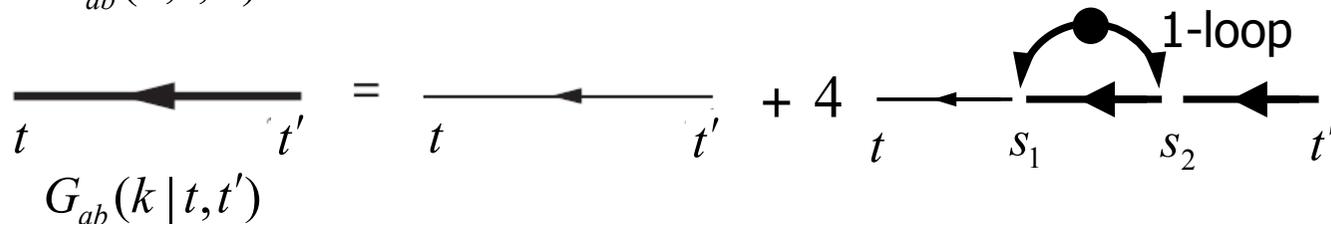


非摂動量（プロパゲーター）を用いて展開を書き直して、1ループレベルで打ち切る

パワース  
ペクトル



プロパ  
ゲーター

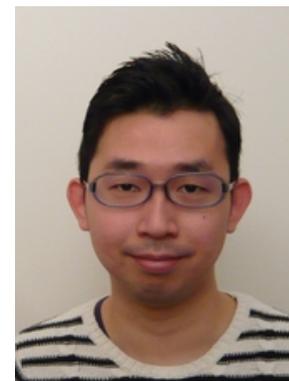
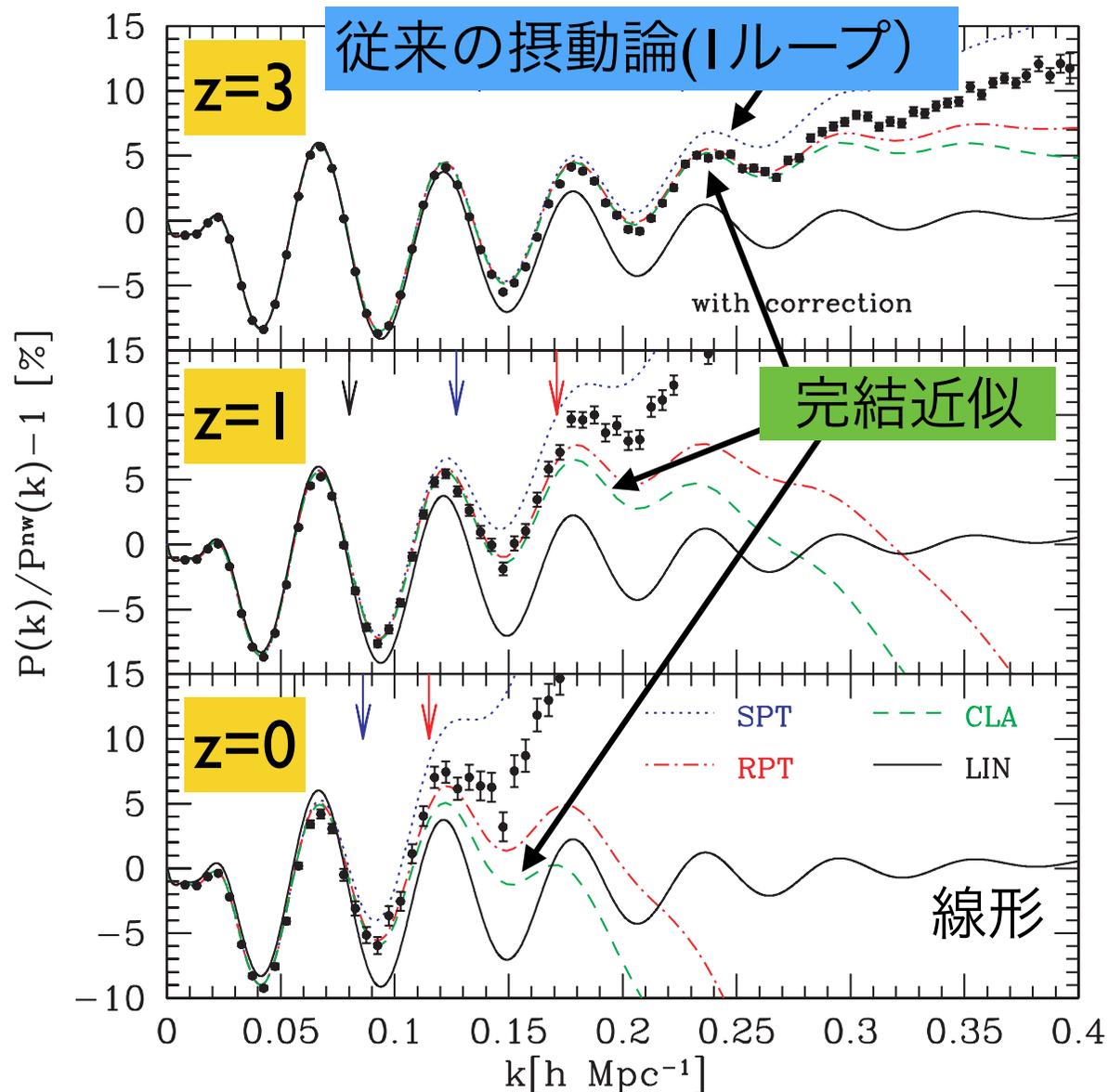


平松尚志  
(立教大)

これを時間発展方程式として定式化（非線形な積分微分方程式）

# これはいける！

ボルン近似で解析計算した結果とシミュレーションを比較



西道啓博  
(カブリIPMU)

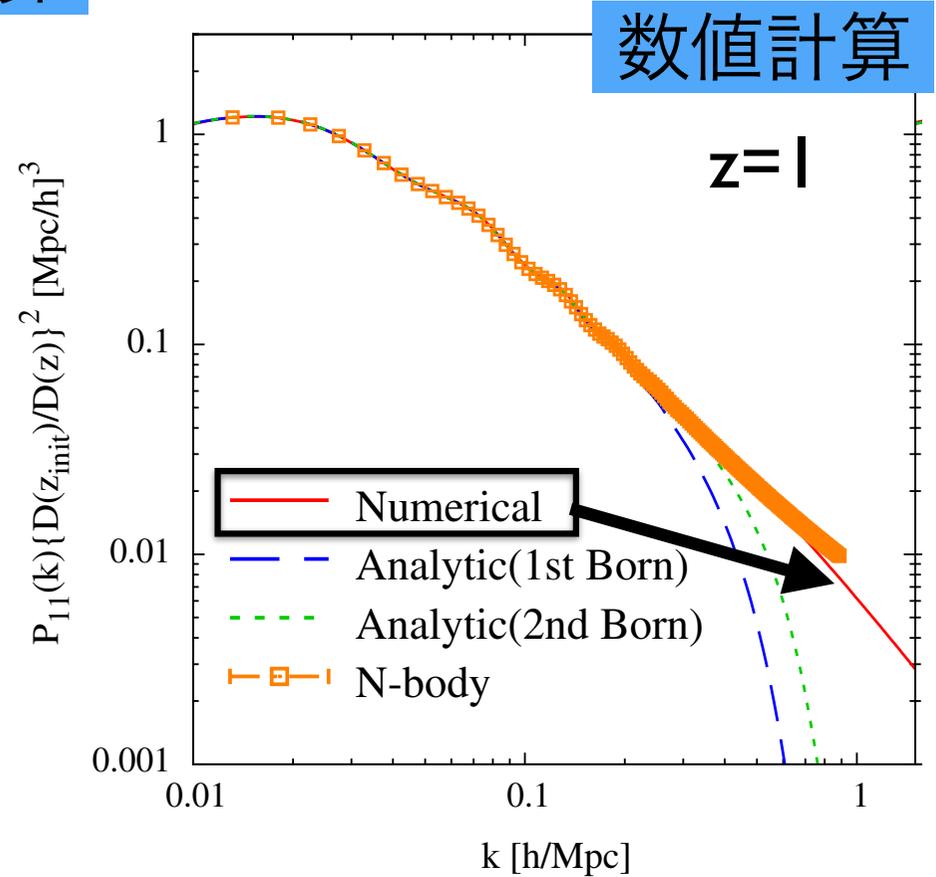
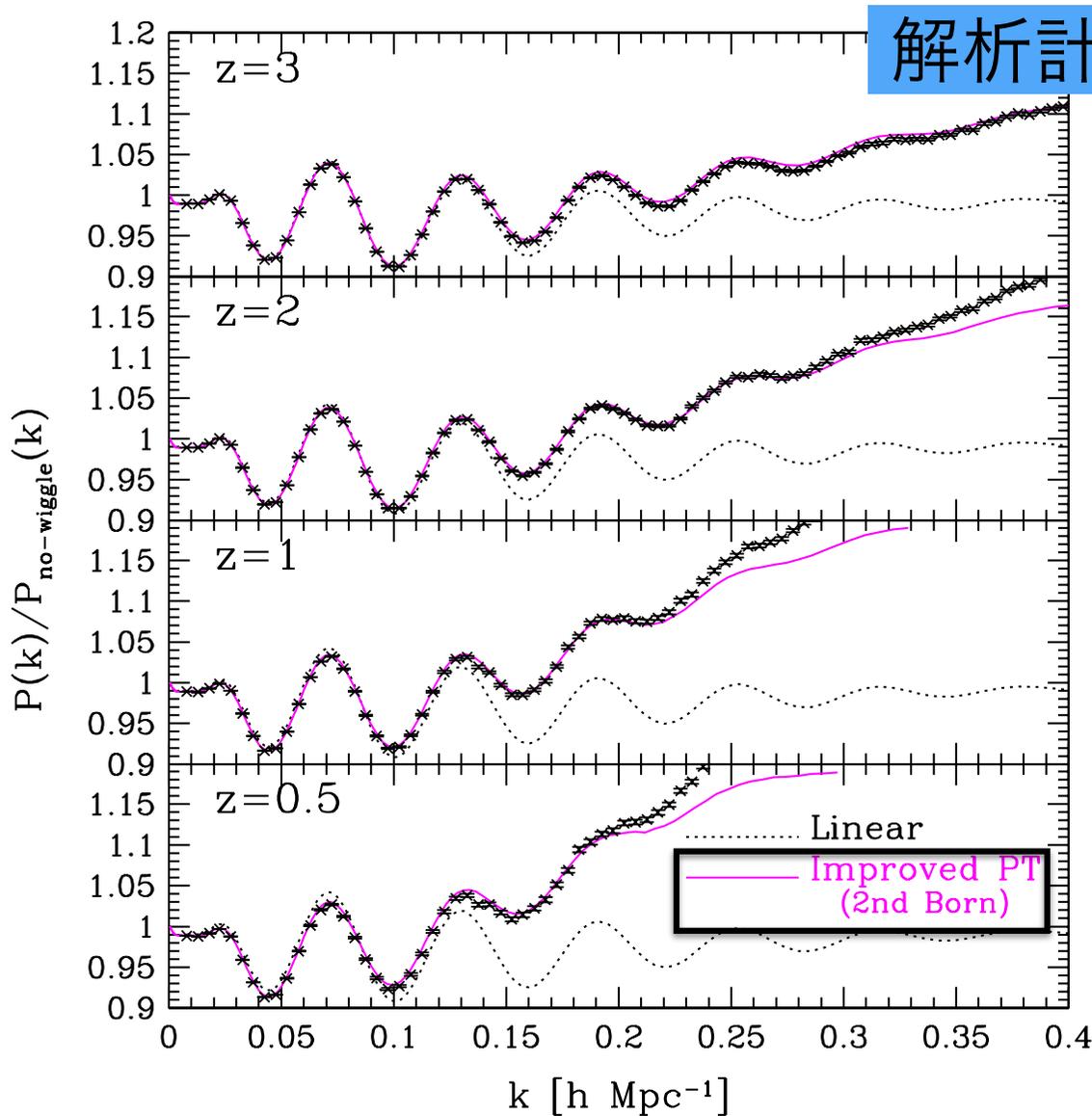
シミュレーションの精度と収束性を入念にチェック

従来の摂動論よりシミュレーションとよく合う！

Nishimichi, Shirata, AT,  
Yahata, Saito, Suto et al. ('09)

# けっこういける！

高次のオーダーまで入れるとさらに適用範囲が広がった



Hiramatsu & AT ('09)

AT, Nishimichi, Saito & Hiramatsu ('09)

# 群雄割拠

ほぼ同時期に発表された摂動計算の改良方法（2006~2008年）

*Renormalized Perturbation theory*



R. Scoccimarro

*Lagrangian resummation theory*



T. Matsubara



M. Crocce

*Time-RG approach*



M. Pietroni

*Multi-point propagator expansion*



F. Bernardeau  
(現IAP所長)

*Large-N expansion*



P. Valageas

比較的早い時期に出版し、シミュレーションをもとにその有効性を示したこともあり、我々の論文も認知されるようになった

# 群雄割拠

ほぼ同時期に発表された

*Renormalized Perturbation th*



R. Scoccimarro



M. Crocce

*Multi-point propagator expan*



F. Bernardeau  
(現IAP所長)

招へいしてもらったきっかけで  
共同研究が始まる

彼の提案した定式化で摂動計算  
の高速化するアイデアを思いつく

→ 計算コードをパブリック化

**RegPT**

計算時間が劇的に短縮  
(数時間が数秒に)

[http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~atsushi.taruya/regpt\\_code.html](http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~atsushi.taruya/regpt_code.html)

AT, Bernardeau, Nishimichi & Codis ('12)

比較的早い時期に出版し、シミュレーションをもとにその有効性を示したこともあり、我々の論文も認知されるようになった

# いまもうひとつの問題

重力進化の記述だけでは観測に応用できない

## 赤方偏移空間ゆがみ (Redshift-space distortions, RSD)

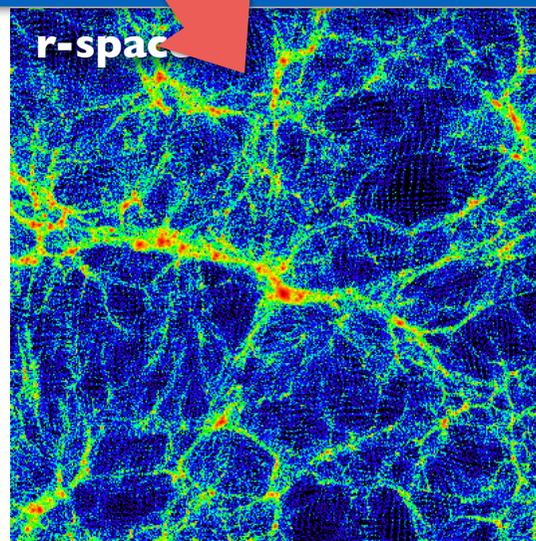
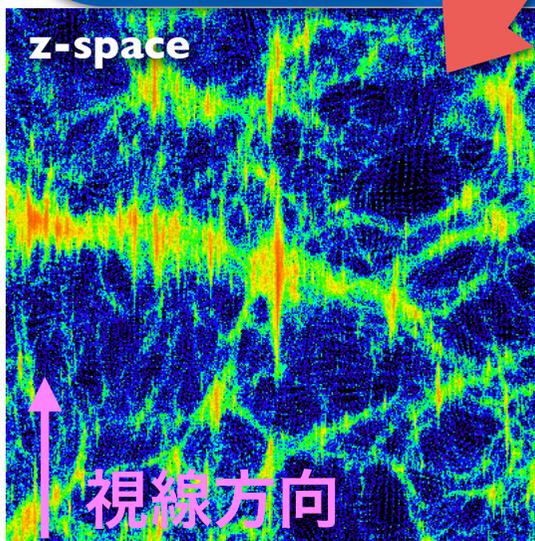
分光観測で銀河の赤方偏移を決定する際、銀河の固有運動によるドップラーシフトが混入して見かけの位置がずれる

観測される

見かけの位置  
(赤方偏移空間)

実際の位置

$$\vec{s} = \vec{r} + \frac{(\vec{v} \cdot \hat{z})}{a H(z)} \hat{z}; \quad \begin{cases} \vec{v} & : \text{銀河の速度場} \\ \hat{z} & : \text{観測者の視線方向} \end{cases}$$



観測される大規模構造  
が非等方に

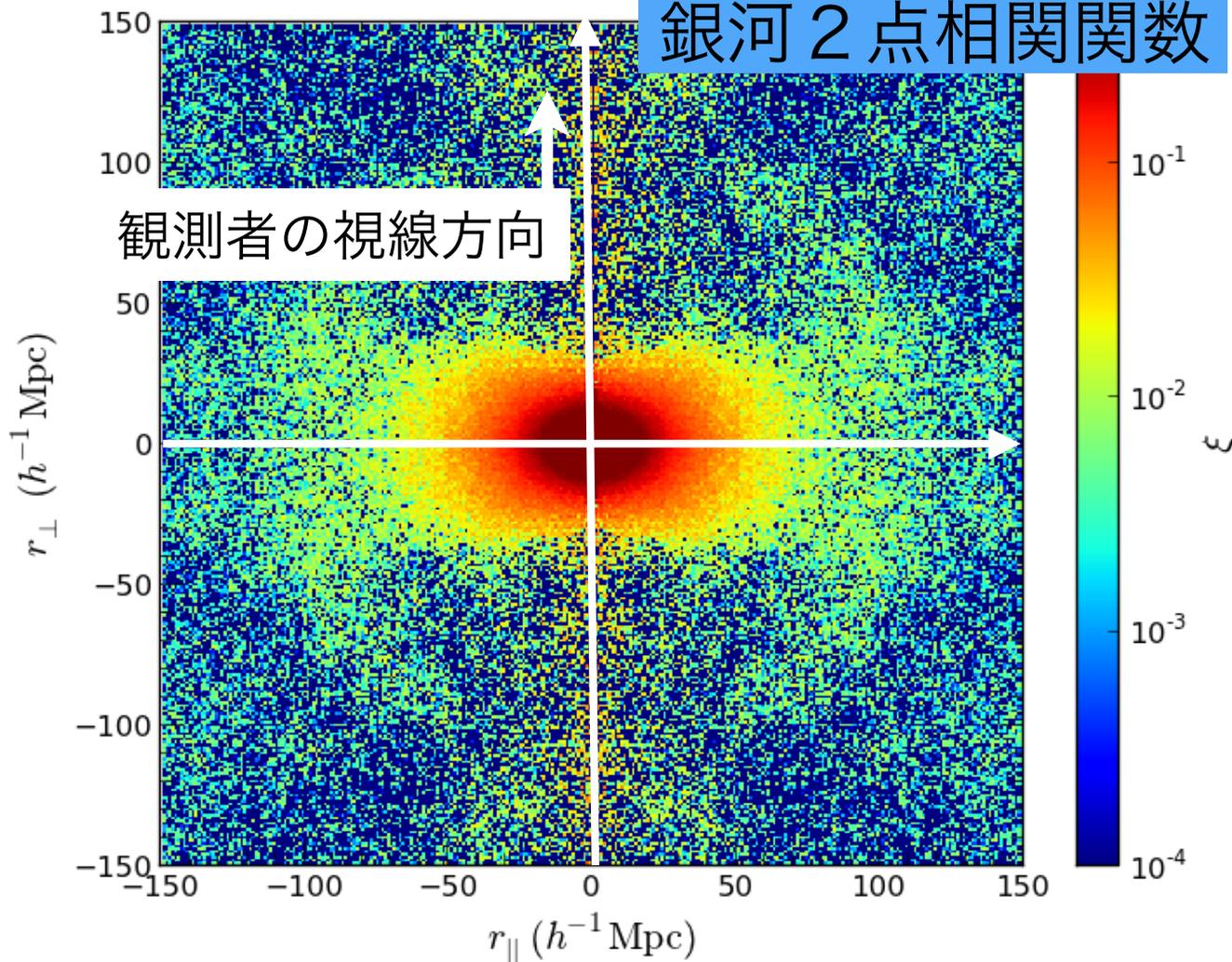
観測の解釈がより複雑に

シミュレーション：西道

# いまもうひとつの問題

重力進化の記述だけでは観測に応用できない

## 銀河 2 点相関関数



Samushia et al.('13)

## RSD)

銀河の固有運動に  
の位置がずれる

銀河の速度場  
観測者の視線方向

れる大規模構造  
が非等方に  
の解釈がより複雑に

ーション：西道

# 逆転の発想

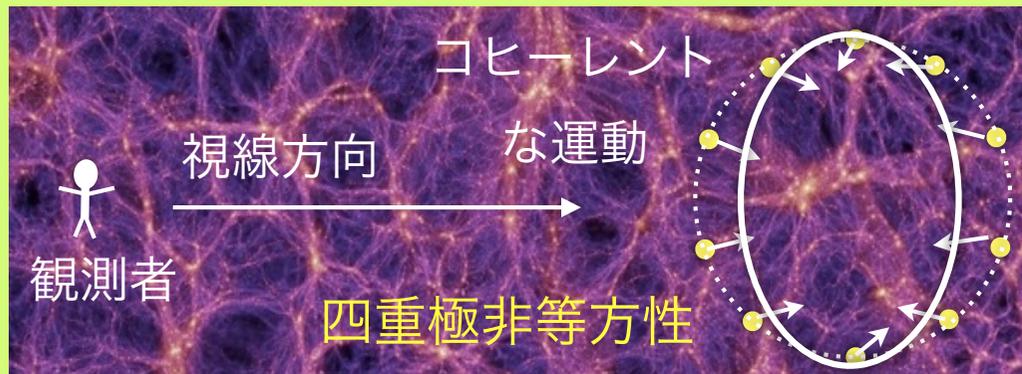
線形Kaiser 公式 (Kaiser '87)

$$\delta^{(S)}(\vec{k}) = (1 + f\mu^2) \delta(\vec{k})$$

$\mu$  : 波数ベクトルと視線方向の方向余弦

赤方偏移空間の密度場

実空間の密度場



重力由来の密度ゆらぎの成長率

$$f(z) \equiv \frac{d \ln D_+}{d \ln a}$$

線形成長因子

スケール因子

赤方偏移空間ゆがみから成長率パラメーター ' $f$ ' を決定することで宇宙論的スケールで重力のテストができる！

e.g., Linder ('08); Guzzo et al. ('08); Yamamoto et al. ('08); Percival & White ('09)

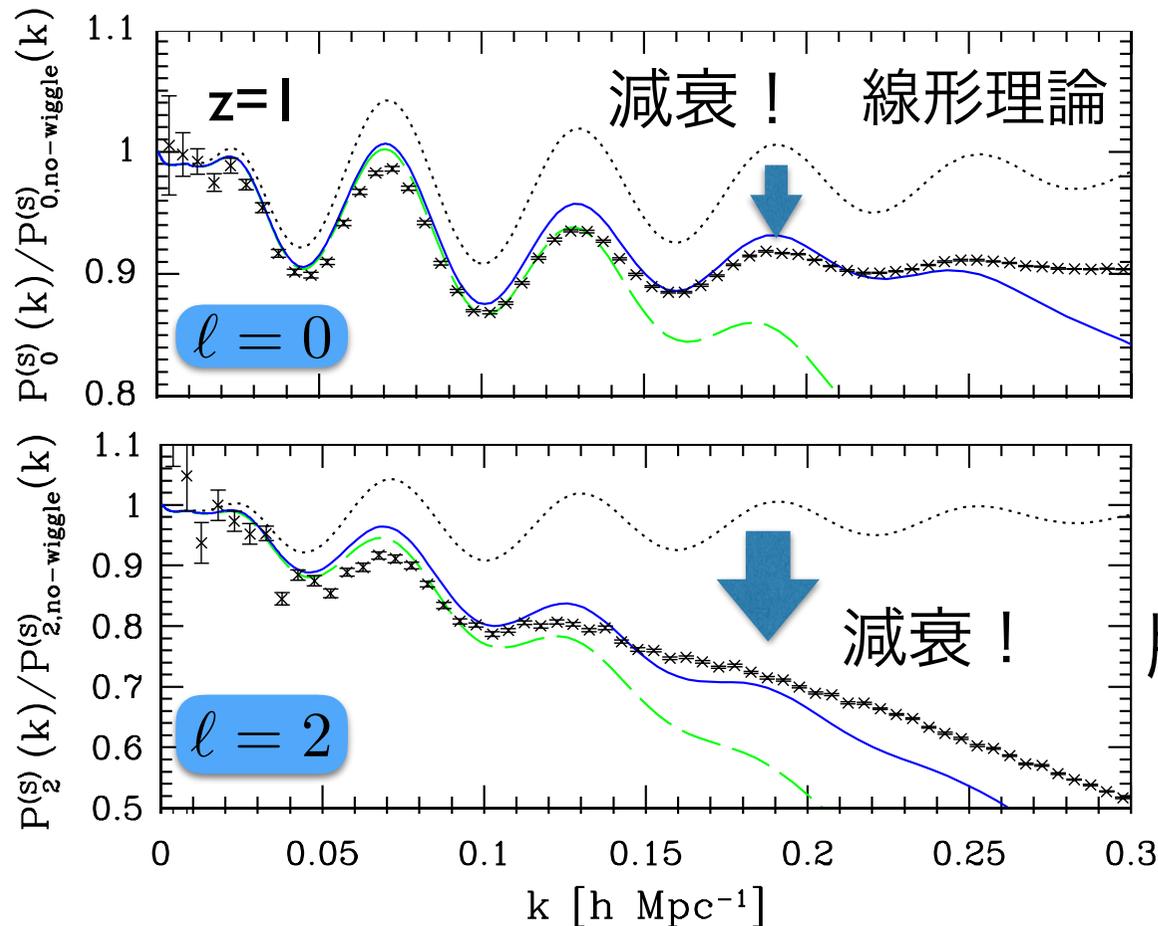
バリオン音響振動の観測とともに重要なサイエンスゴールに

# 神の指

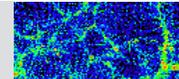


多重極展開

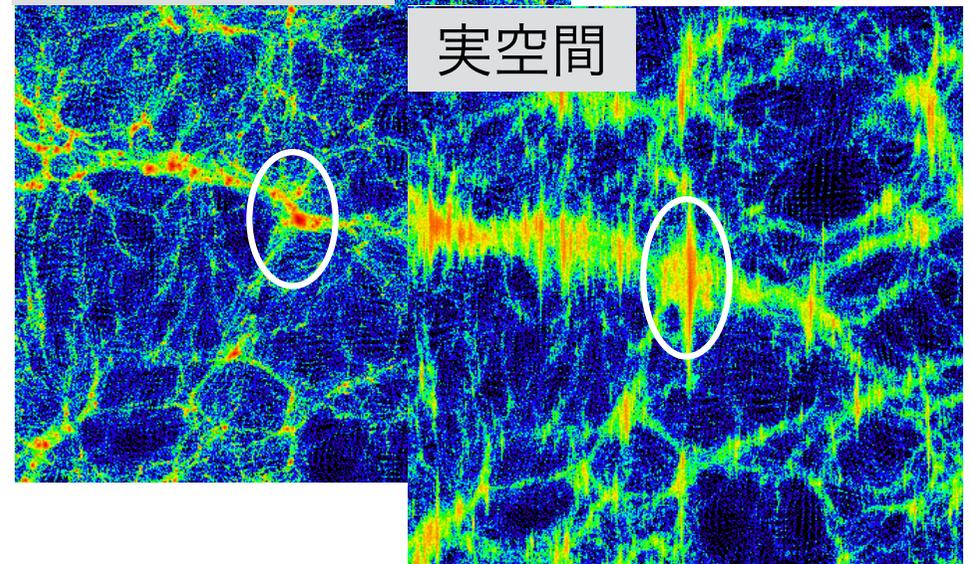
$$P^{(S)}(k, \mu) = \sum_{\ell=\text{even}} P_{\ell}^{(S)}(k) \mathcal{P}_{\ell}(\mu)$$



赤方偏移空間



実空間



線形Kaiser公式の非線形拡張  
版に減衰項をつけた半現象論  
モデルにもとづく摂動計算

- 2ループ
- - 1ループ

何か足りない

# 赤方偏移空間歪みの理論モデル

赤方偏移空間のパワースペクトルの厳密な表式は知られていた：

$$P^{(S)}(\mathbf{k}) = \int d^3\mathbf{x} e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{x}} \left\langle e^{-ik\mu f\Delta u_z} \{ \delta(\mathbf{r}) + f\nabla_z u_z(\mathbf{r}) \} \{ \delta(\mathbf{r}') + f\nabla_z u_z(\mathbf{r}') \} \right\rangle$$

結構ややこしい

$u_z$  : 規格化された視線方向の速度場

$$\Delta u_z \equiv u_z(\mathbf{r}) - u_z(\mathbf{r}')$$

$$\mathbf{x} \equiv \mathbf{r} - \mathbf{r}'$$

いろいろ考えた末、半現象論モデルを改良する方針に

長波長展開をして補正項を導出：

AT, Nishimichi & Saito ('10)

$$P^{(S)}(k, \mu) = e^{-(k\mu f\sigma_v)^2} [P_{\delta\delta}(k) + 2f\mu^2 P_{\delta\theta}(k) + f^2\mu^4 P_{\theta\theta}(k) + A(k, \mu) + B(k, \mu)]$$

減衰項

非線形 Kaiser 項

高次モーメント由来  
の補正項

➡ TNSモデルと呼ばれるようになった

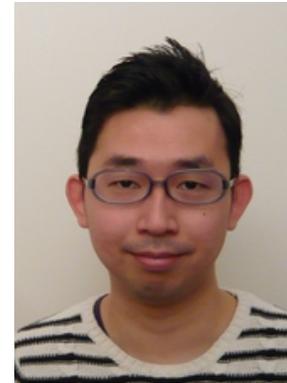
# 赤方偏移空間歪みの理論モデル

赤方偏移空間のパワースペクトルの厳密な表式は知られていた：

$$P^{(S)}(\mathbf{k}) = \int d^3\mathbf{x} e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{x}} \left\langle e^{-ik\mu f\Delta u_z} \left\{ \delta(\mathbf{r}) + f\nabla_z u_z(\mathbf{r}) \right\} \left\{ \delta(\mathbf{r}') + f\nabla_z u_z(\mathbf{r}') \right\} \right\rangle$$

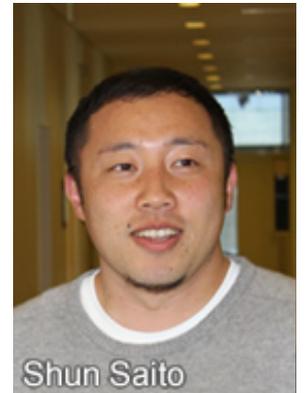
結構ややこしい

$u_z$  :  
 $\Delta u_z$   
 $\mathbf{x} \equiv$



西道啓博

(カブリIPMU)



Shun Saito

斎藤俊

(MPA)

いろいろ考えた末、半現象論で

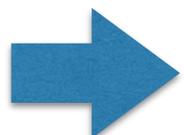
長波長展開をして補正項を導出：

$$P^{(S)}(k, \mu) = e^{-(k\mu f\sigma_v)^2} [P_{\delta\delta}(k) + 2f\mu^2 P_{\delta\theta}(k) + f^2\mu^4 P_{\theta\theta}(k) + A(k, \mu) + B(k, \mu)]$$

減衰項

非線形 Kaiser 項

高次モーメント由来  
の補正項

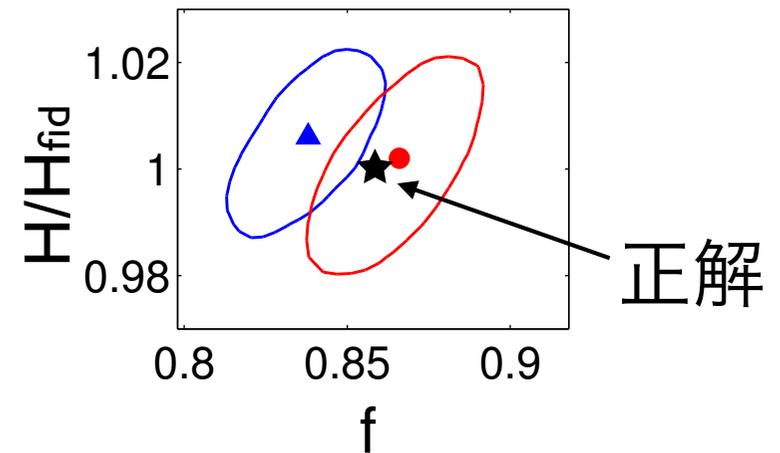
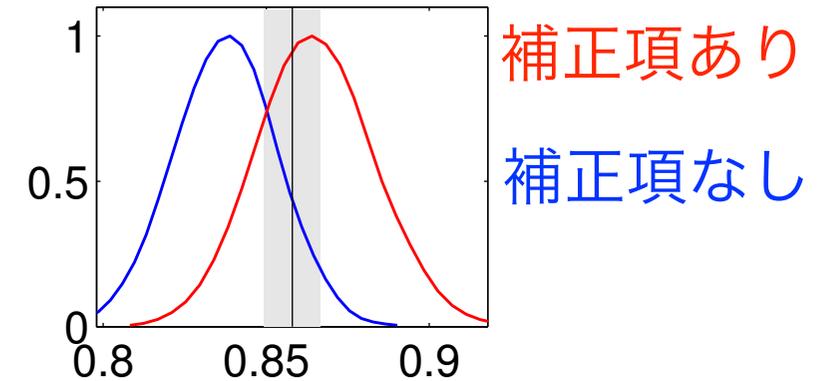
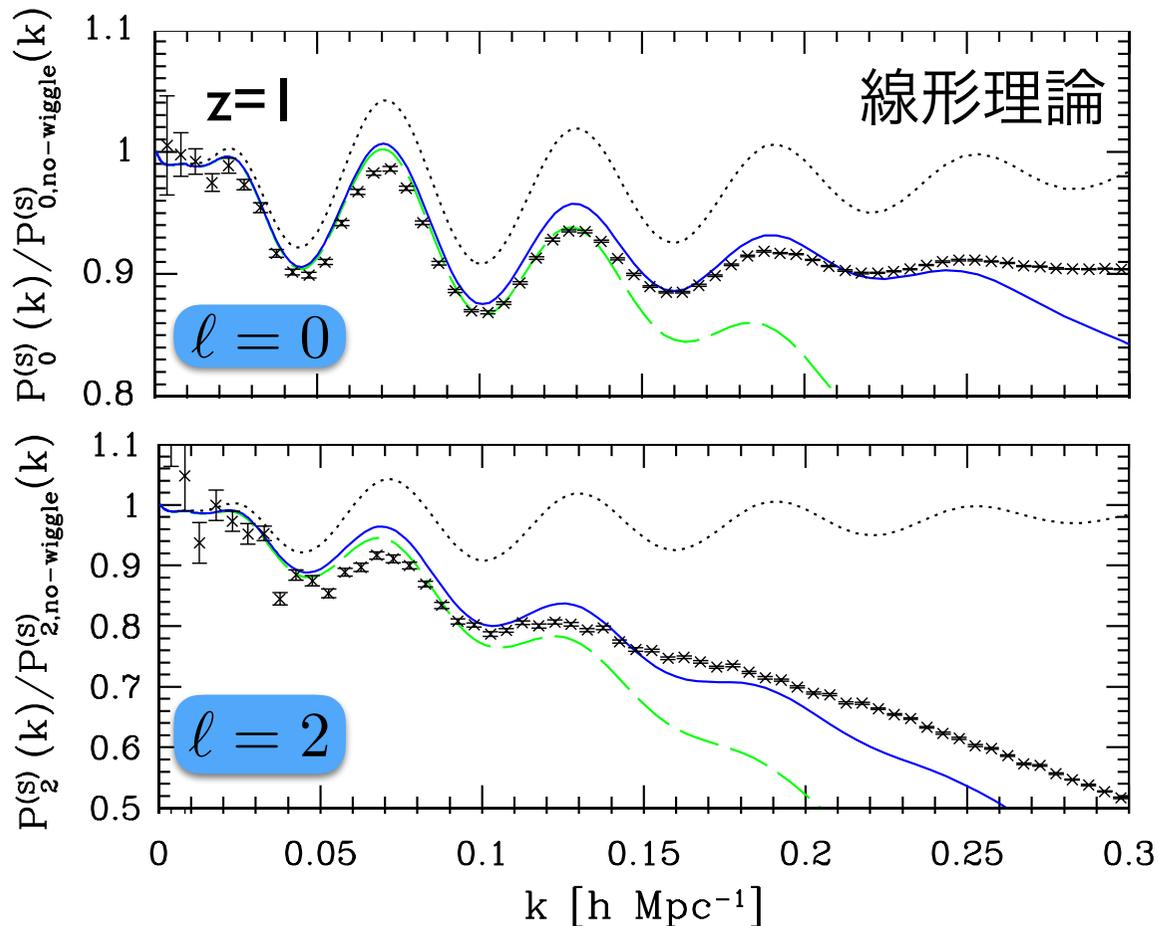


TNSモデルと呼ばれるようになった

# 赤方偏移空間歪みの理論モデル

AT, Nishimichi & Saito ('10)

最初は不満足だったが...



結構シミュレーション結果を再現

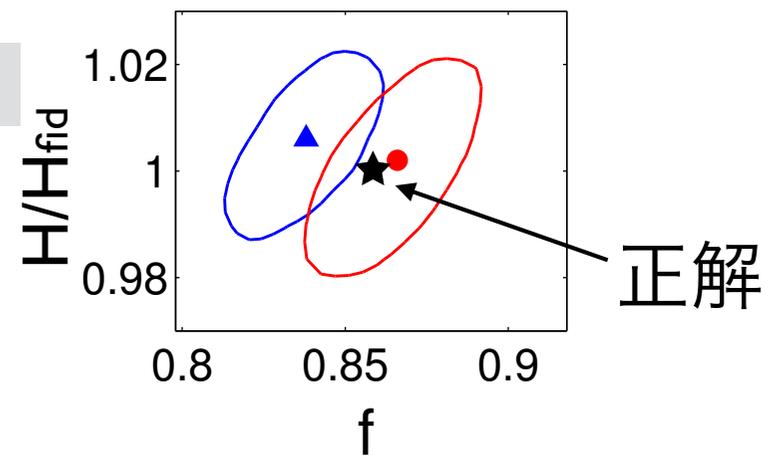
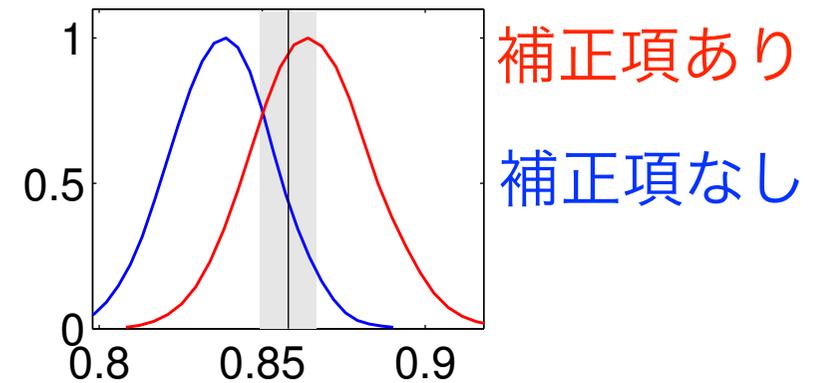
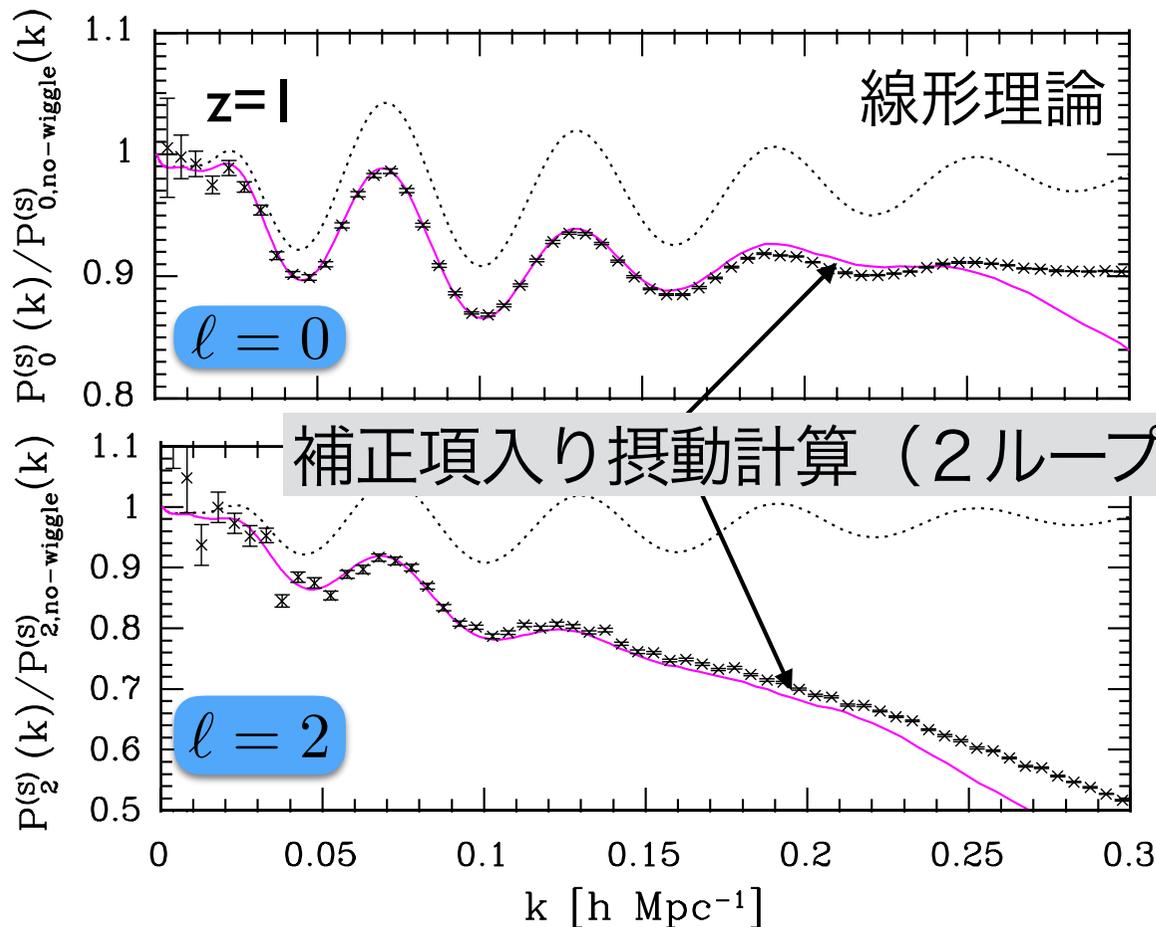
成長率パラメーター ' $f$ '

も正しく決定できる

# 赤方偏移空間歪みの理論モデル

AT, Nishimichi & Saito ('10)

最初は不満足だったが...



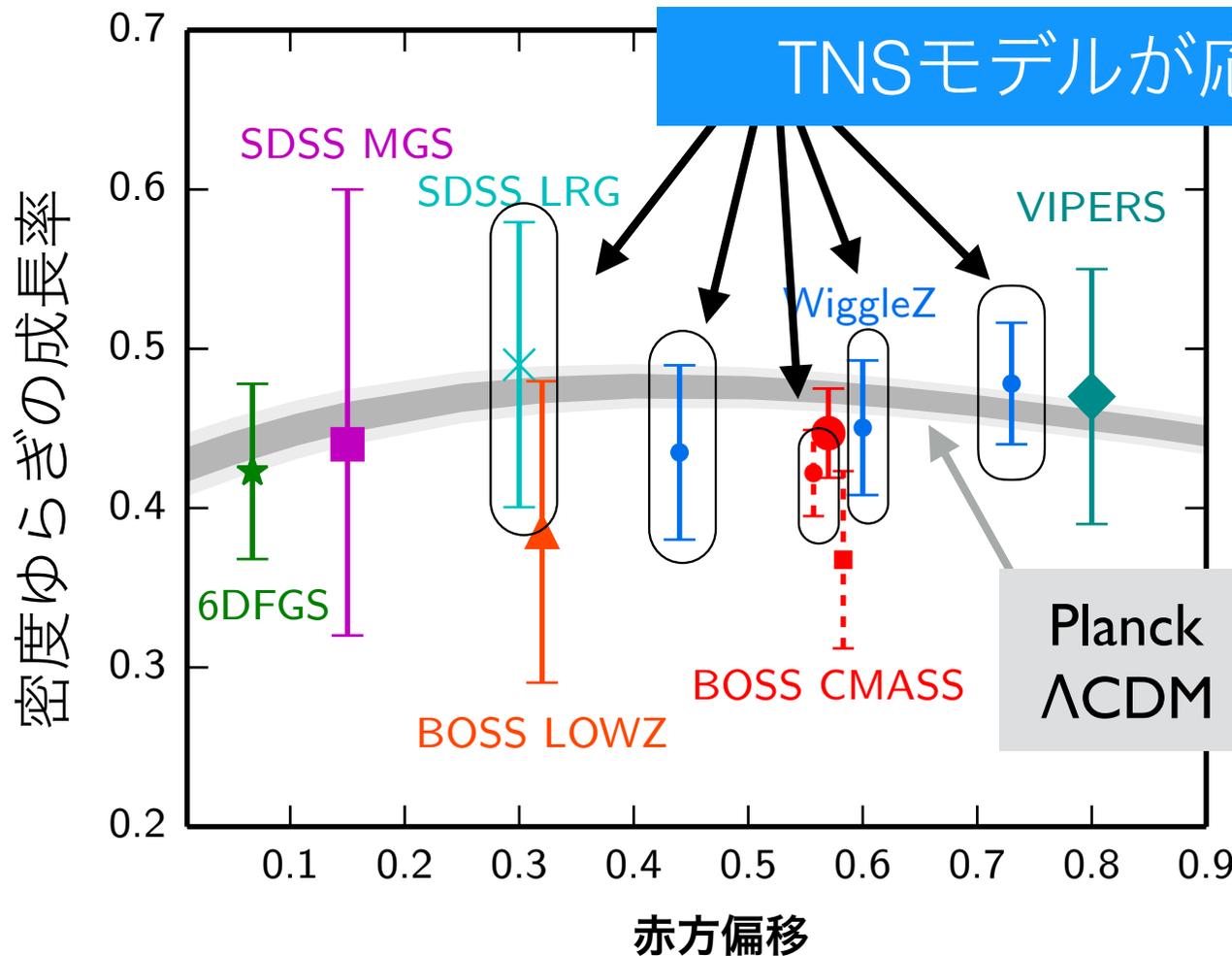
成長率パラメーター ' $f$ '

も正しく決定できる

結構シミュレーション結果を再現

# 観測への応用

観測グループでも関心が集まり、モデルの有効性が検証され、  
やがて実データへと応用され始めた



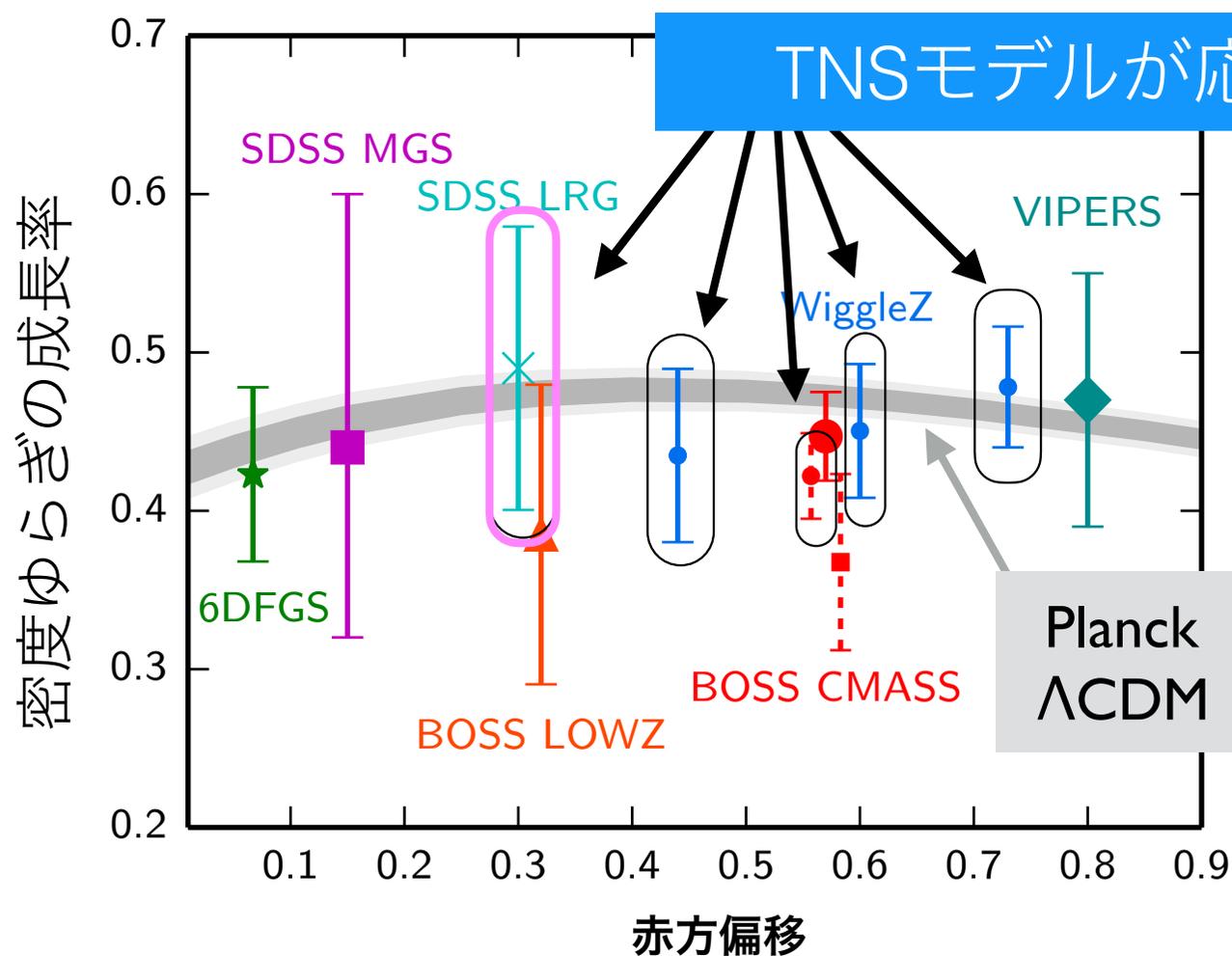
Planck 2015 XIII

最近のSDSS BOSS DR12  
でも使われている

Beutler, Seo, Saito et al. ('16)

# 観測への応用

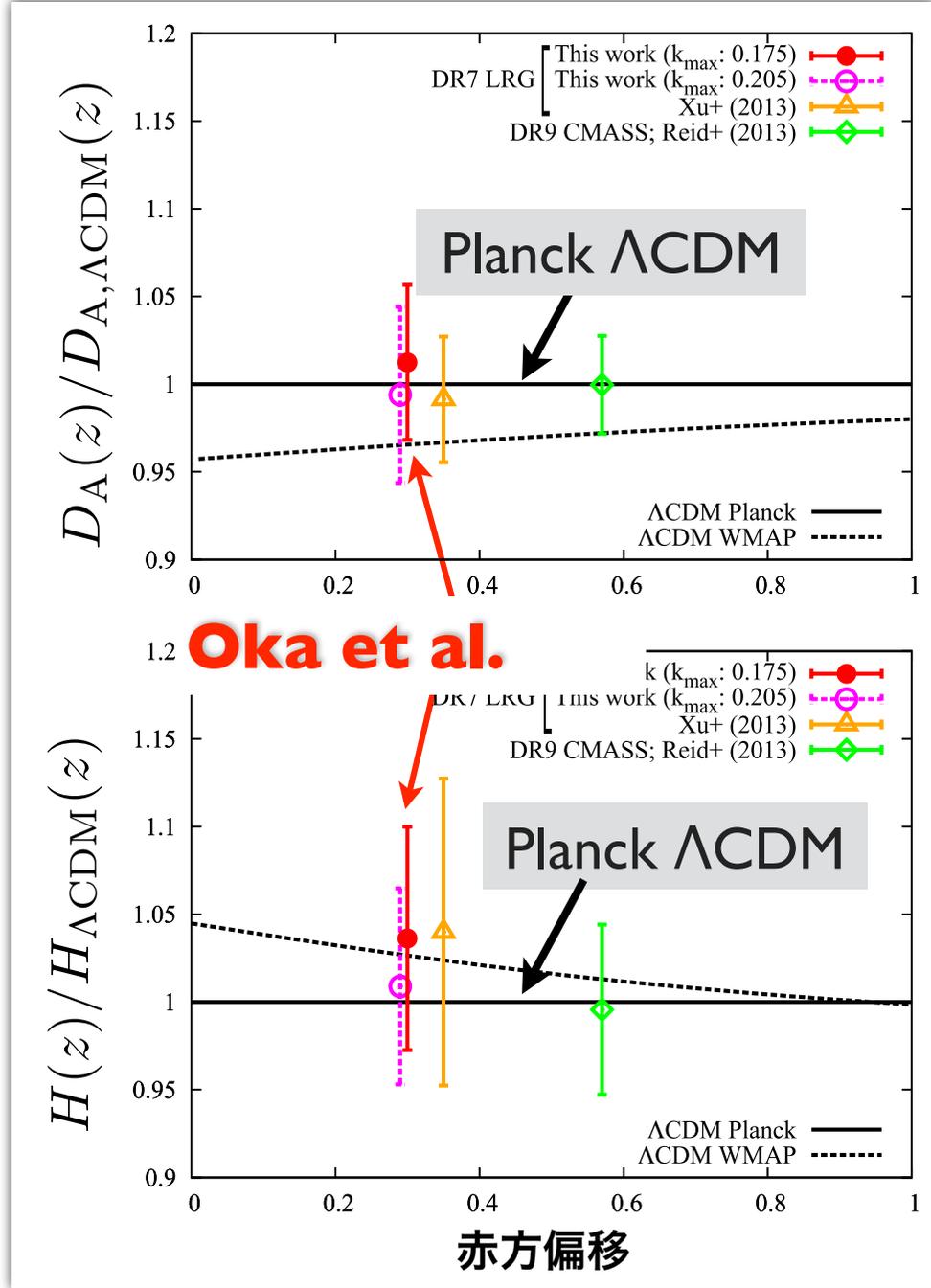
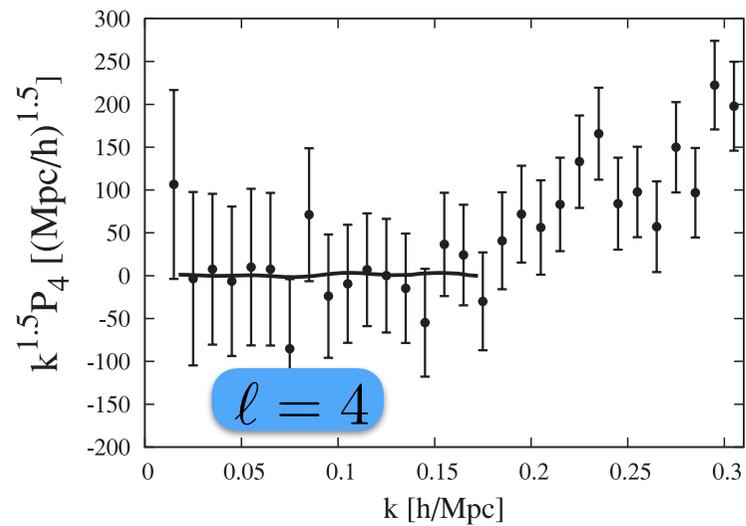
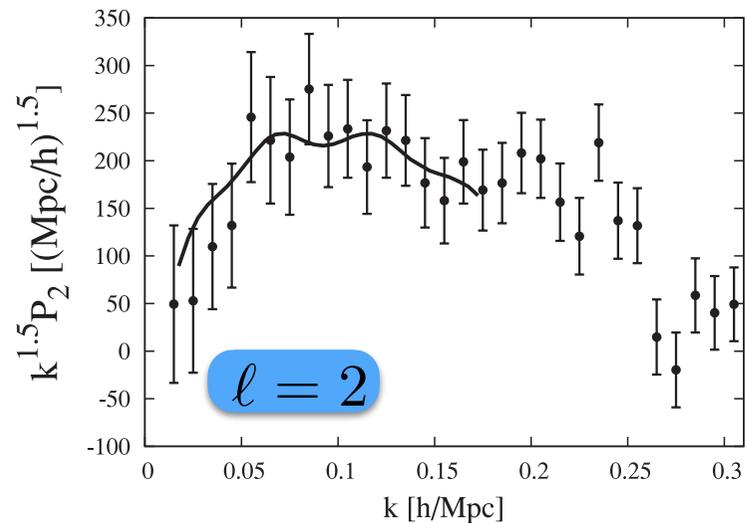
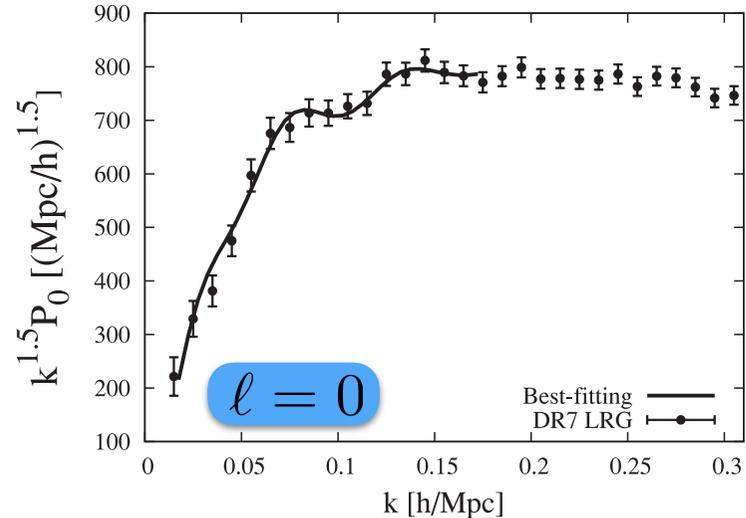
観測グループでも関心が集まり、モデルの有効性が検証され、  
やがて実データへと応用され始めた



Planck 2015 XIII

最近のSDSS BOSS DR12  
でも使われている

Beutler, Seo, Saito et al. ('16)



パワースペクトルから加速膨張と重力理論の同時検証を初めて行う (Oka et al.'14)

# 予想以上に使われた

わかりやすくて手軽さ・汎用性が受けた（計算コードも公開）

引用数：129 (ADS)

- 当時ポスドクでバークレーにいた斎藤くんが、SDSS BOSS チームに関わりデータ解析に用いたことで認知度が上がった

Beutler, Saito et al. ('14), Beutler, Seo, Saito et al. ('16)

- 西道くんがシミュレーションをもとにモデルの詳細に検討を進めたおかげで有効性・実用性を示せた

Nishimichi & Taruya ('11), Ishikawa, Totani, Nishimichi et al. ('14)

若手の活躍と健闘のおかげ！

# 摂動論が広げる可能性

精密宇宙論の時代に入り、銀河サーベイから統計精度の高い大スケールにわたる観測データが得られるようになってきた

… 摂動論にもとづく理論計算が本質的役割を果たす時代

紹介しきれなかった他の研究

- **ニュートリノ**の影響を取り入れた摂動論テンプレート  
→ 観測データへ応用、**ニュートリノ質量和の制限**  
Saito, Takada & AT ('08, '09, '11)
- **修正重力理論**における摂動論 →  **$f(R)$ 重力理論の観測的制限**  
Koyama, AT & Hiramatsu ('09) AT, Nishimichi, Bernardeau & Koyama ('14)  
AT, Koyama, Hiramatsu & Oka ('14) Song, AT, et al. ('15)

→ 日本の観測プロジェクトへの活用に向けてさらに発展

# 課題と展望

観測的応用だけでなく、基礎研究も不可欠

## •重力進化摂動計算の再考・リノベーション

さらに高次に行くと流体方程式にもとづく摂動計算が破綻 (UV問題)

有効理論的アプローチが必要？

より基礎的な記述へ (Vlasove方程式)

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{1}{a} \vec{\nabla} \cdot [(1 + \delta) \vec{v}] = 0$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \frac{\dot{a}}{a} \vec{v} + \frac{1}{a} (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} = -\frac{1}{a} \vec{\nabla} \Phi$$

$$\frac{1}{a^2} \nabla^2 \Phi = 4\pi G \bar{\rho}_m \delta$$

## •銀河バイアスのよりよい理解

質量密度ゆらぎ  $\longleftrightarrow$  銀河の個数密度ゆらぎ

‘nuisance parameters’ をこえた理解が可能か？



共同研究者のみなさま、今まで楽しく研究ができました。ありがとうございました。そしてこれからもよろしくお願ひします。

