

# 宇宙の大規模構造と 宇宙論

松原隆彦

(名古屋大学)

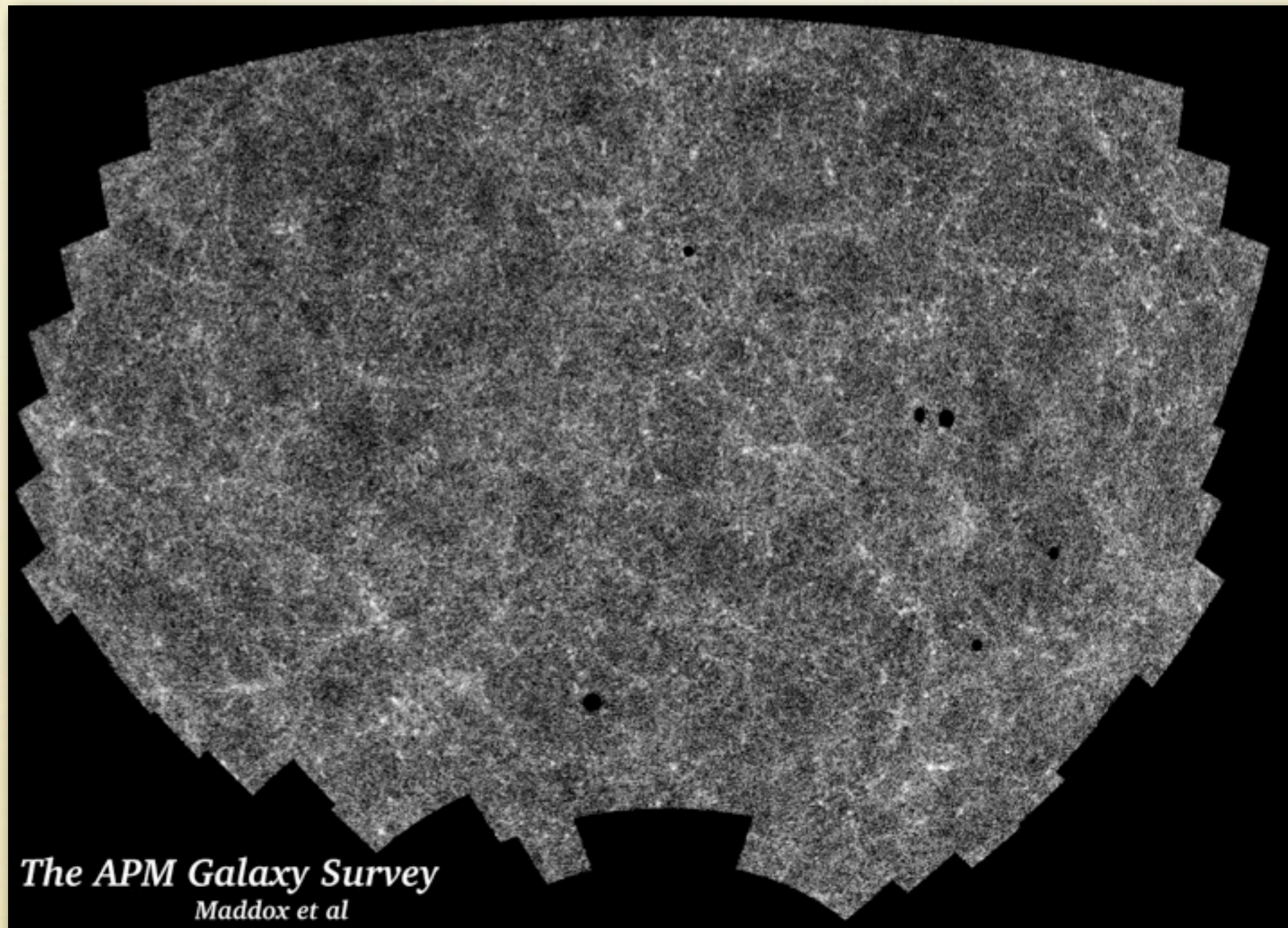
天文天体物理若手夏の学校@蒲郡

2011/8/3



# 宇宙の大規模構造

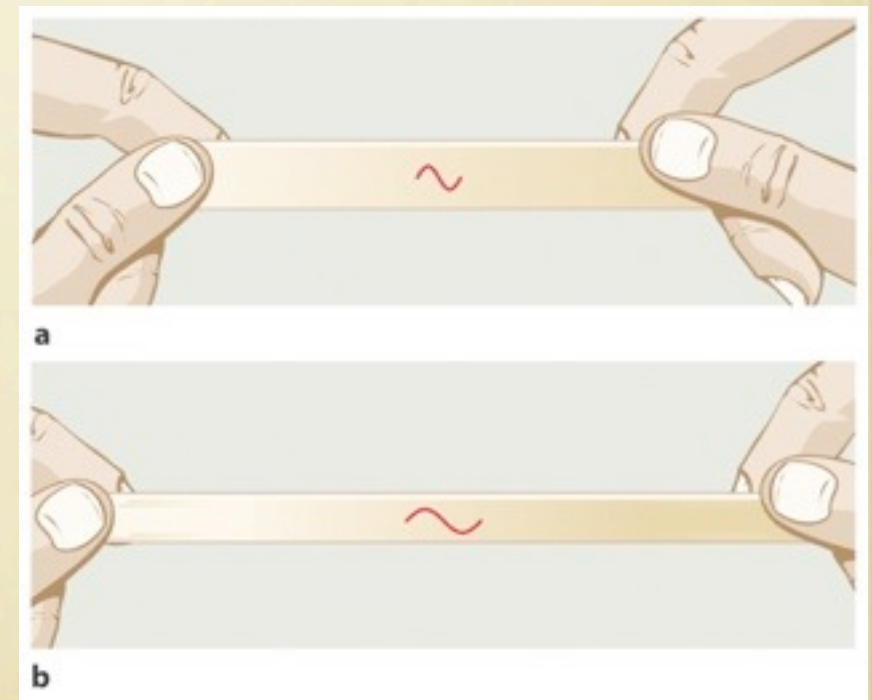
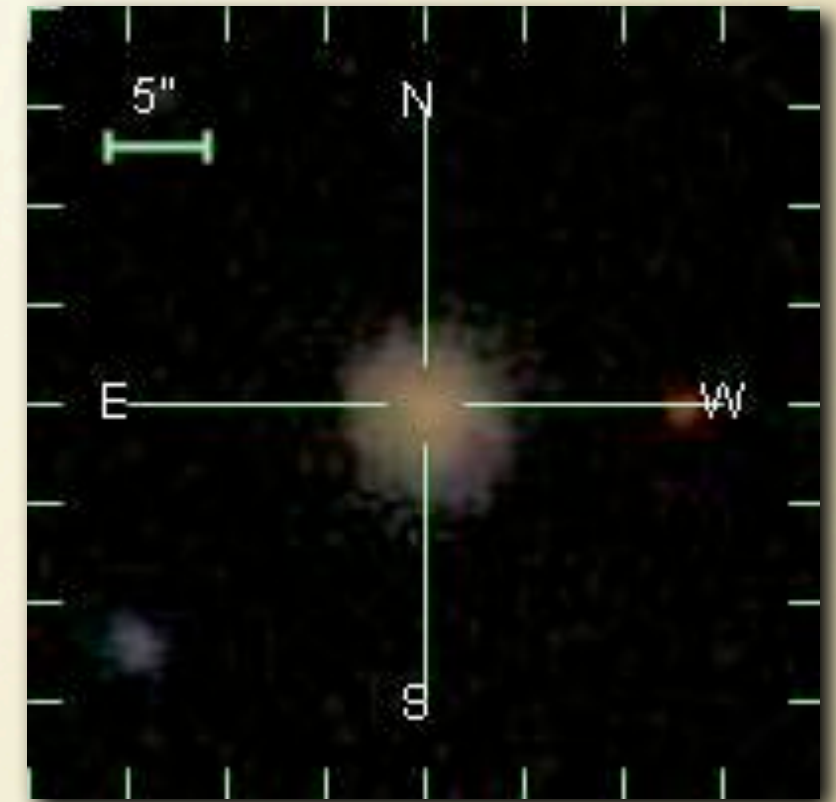
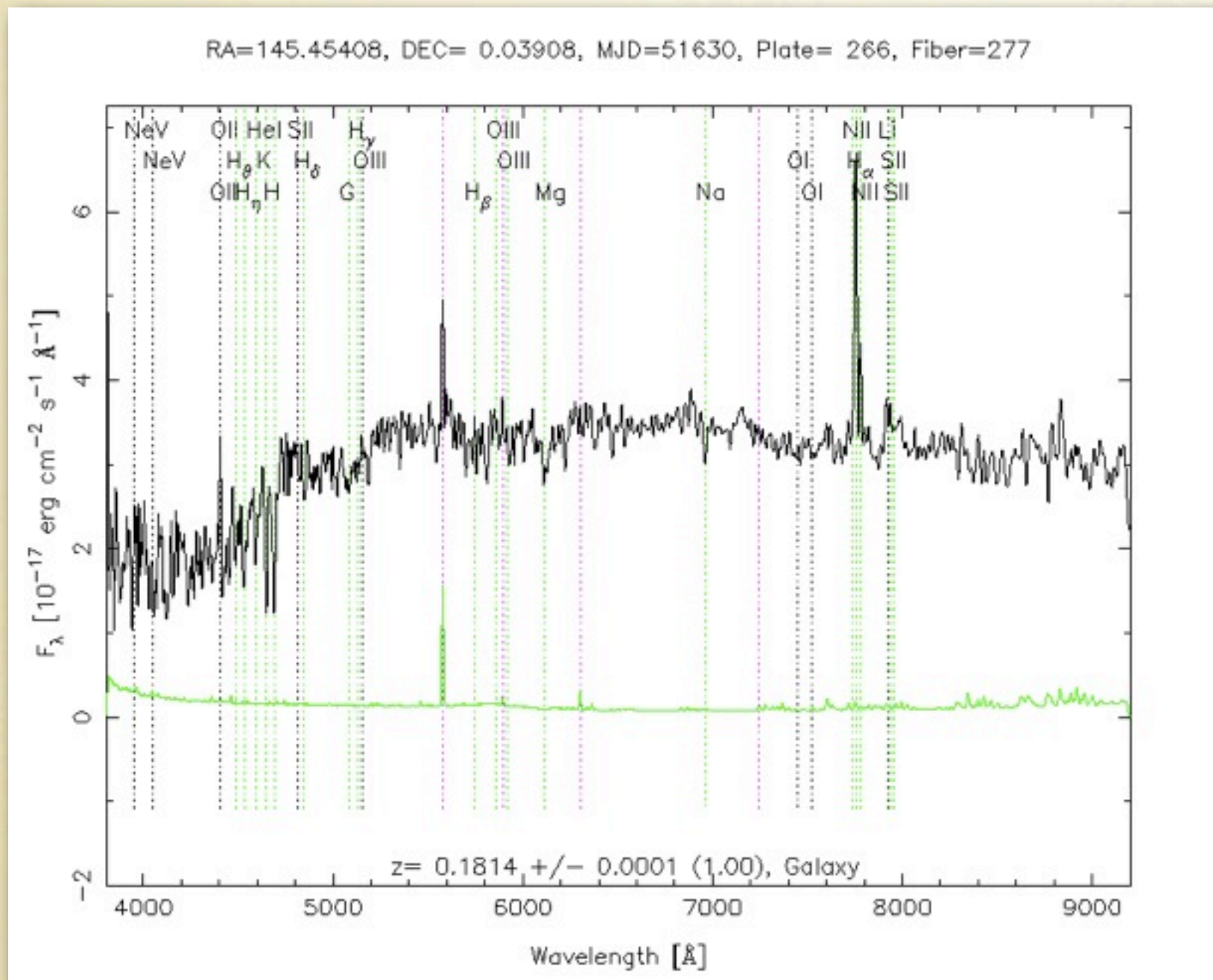
- APMサーベイ





# 赤方偏移サーベイ

- 銀河の典型的なスペクトル

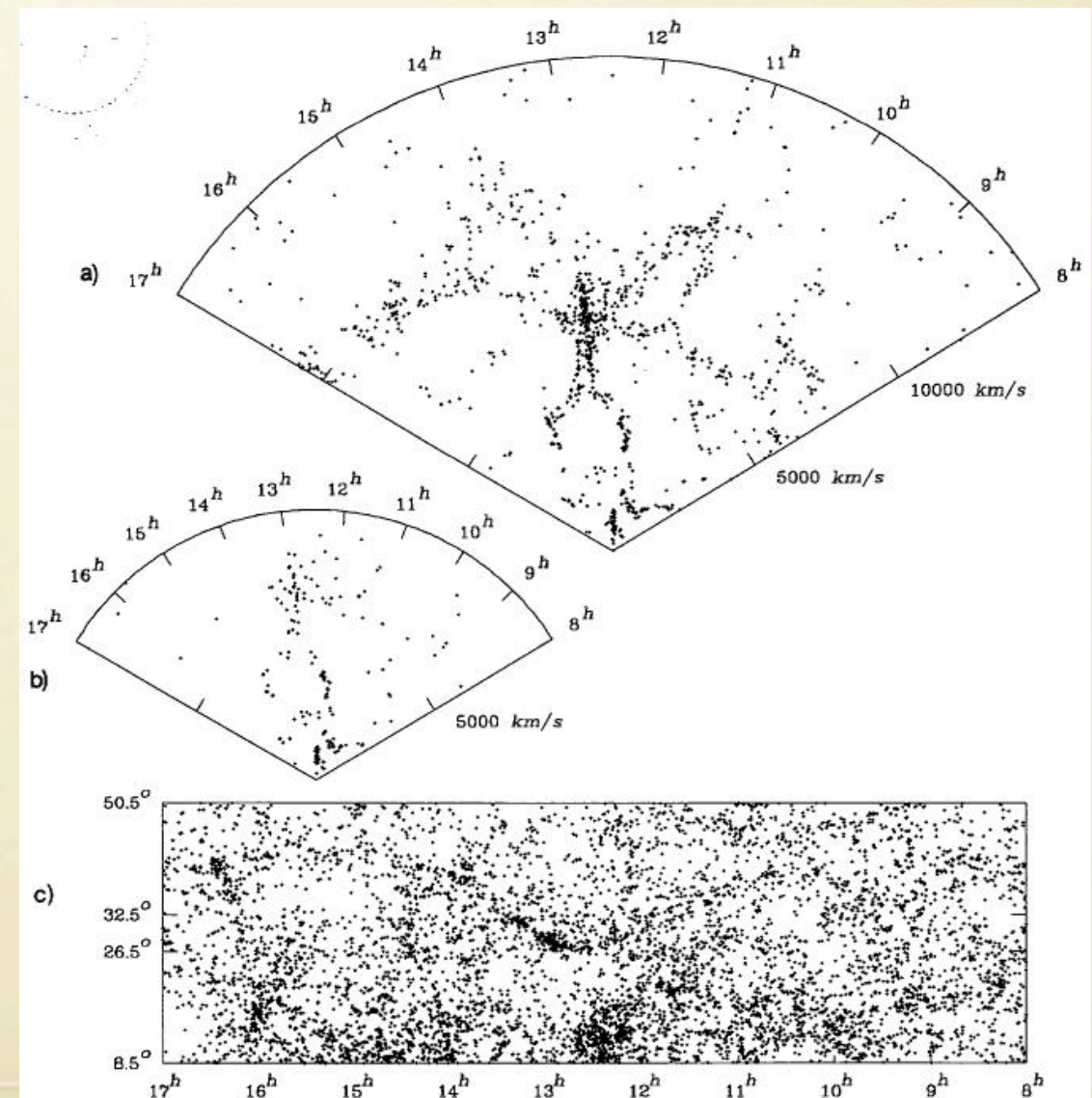




# 例：CfA survey

- ゲラーたち(1986)

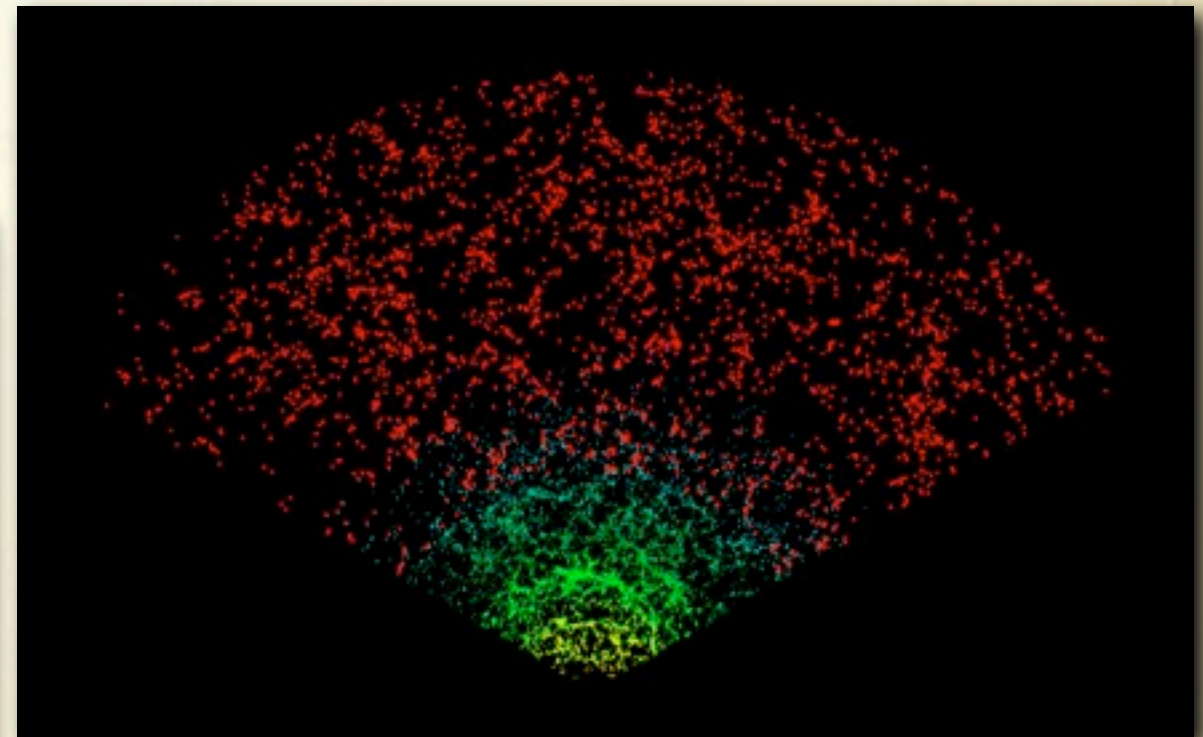
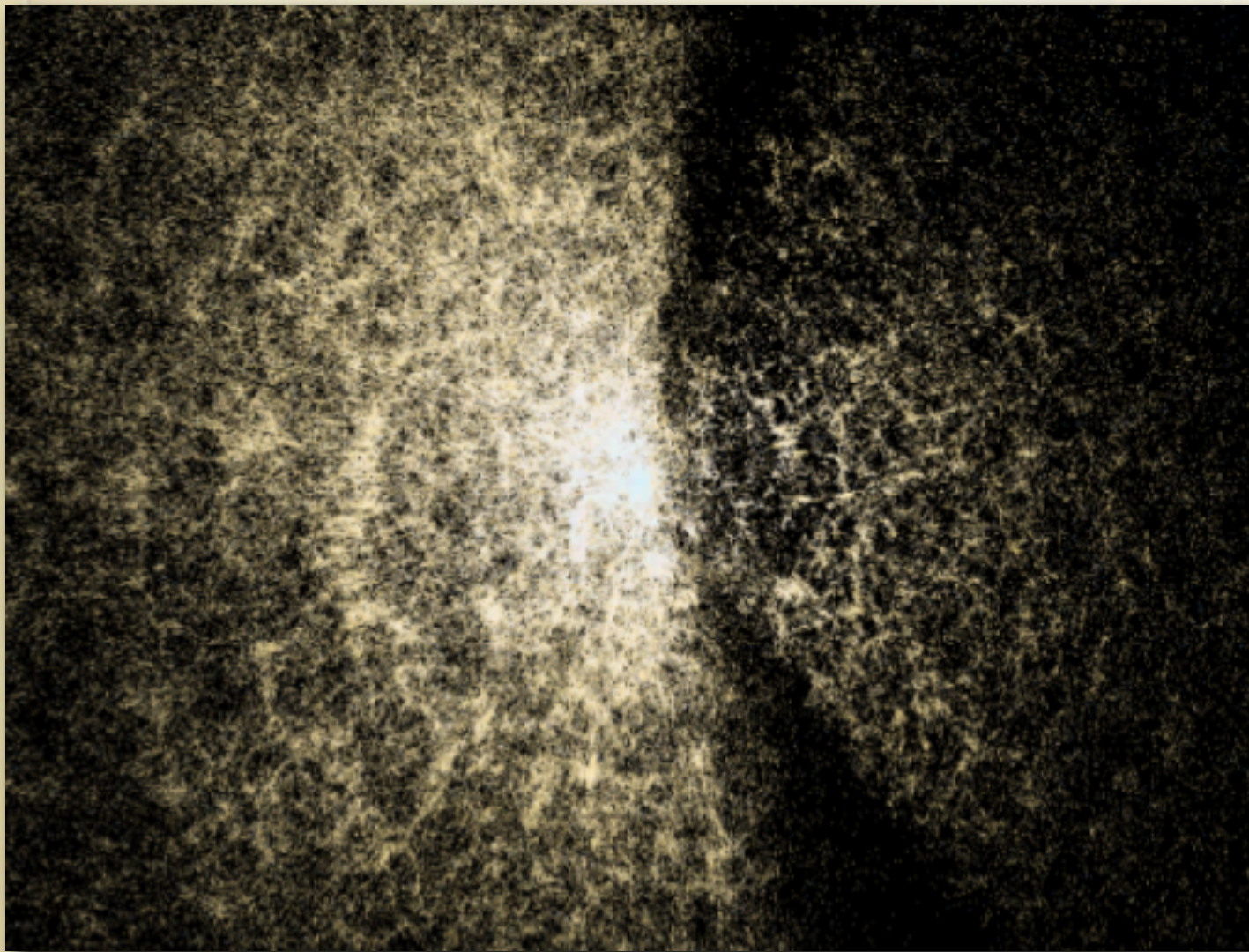
- 予想外の大スケール (~100Mpc)に構造を発見し、大規模構造が宇宙論にとって重要な観測になる



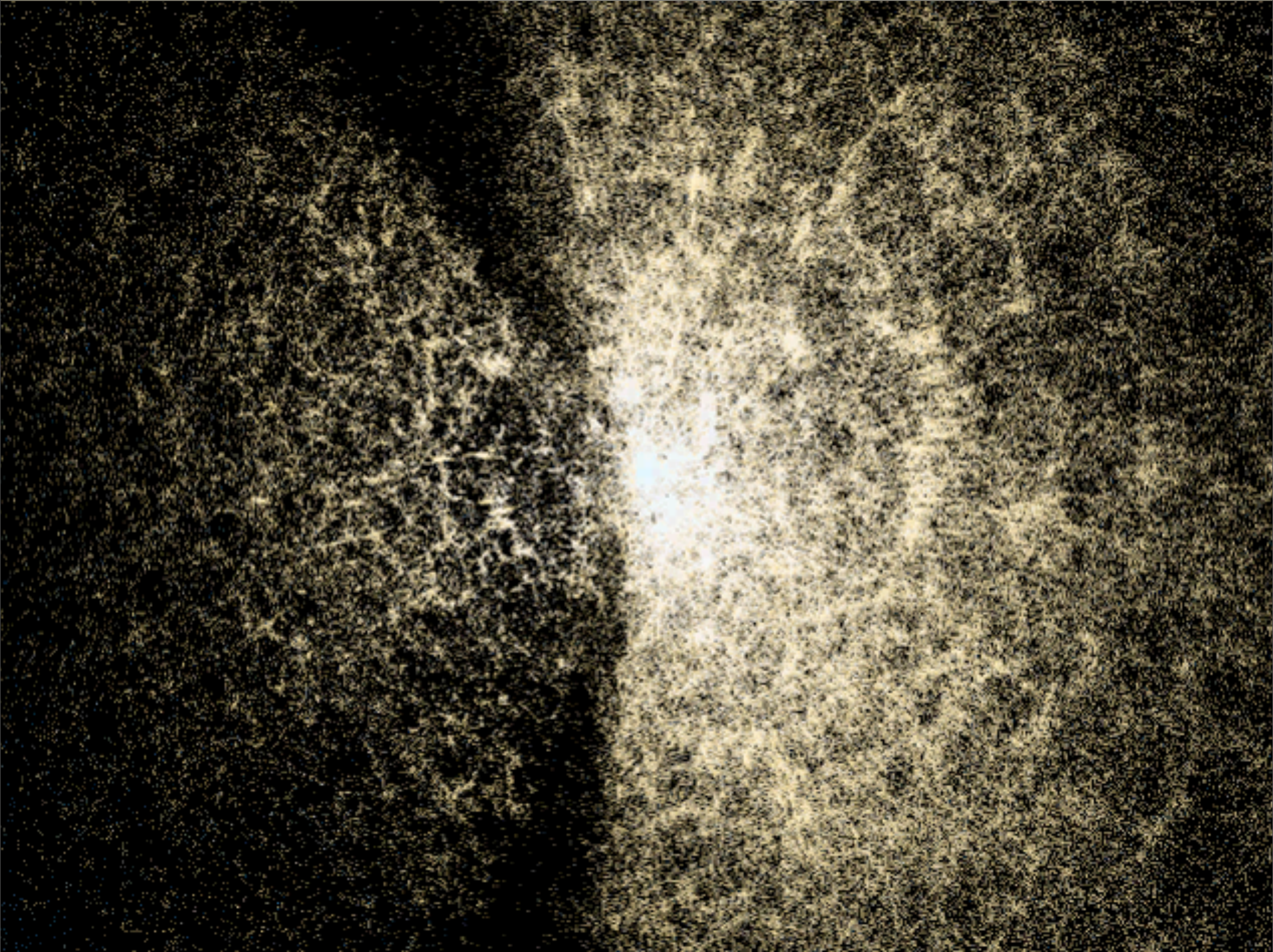


# 赤方偏移サーベイ

- Sloan Digital Sky Survey (SDSS, 2001-2008): これまで  
史上最大の赤方偏移サーベイ







2011年8月3日水曜日



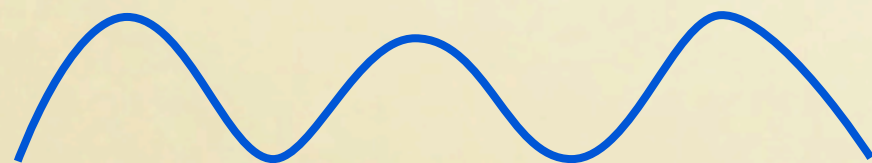
# 大規模構造の形成

- ゆらぎの線形成長と非線形成長、天体形成

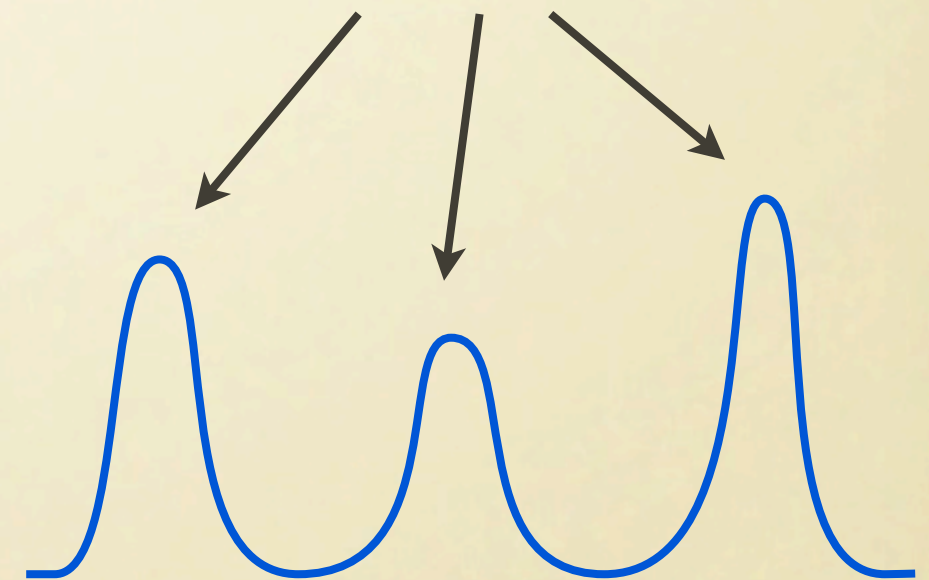
線形成長



非線形成長



天体形成の場所



# 大規模構造の力学

- ダークマターの空間分布

- 空間的密度ゆらぎ  $\delta(\mathbf{x}, t) \equiv \frac{\rho(\mathbf{x}, t) - \bar{\rho}(t)}{\bar{\rho}(t)}$

- 膨張宇宙における無衝突粒子の発展方程式

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

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

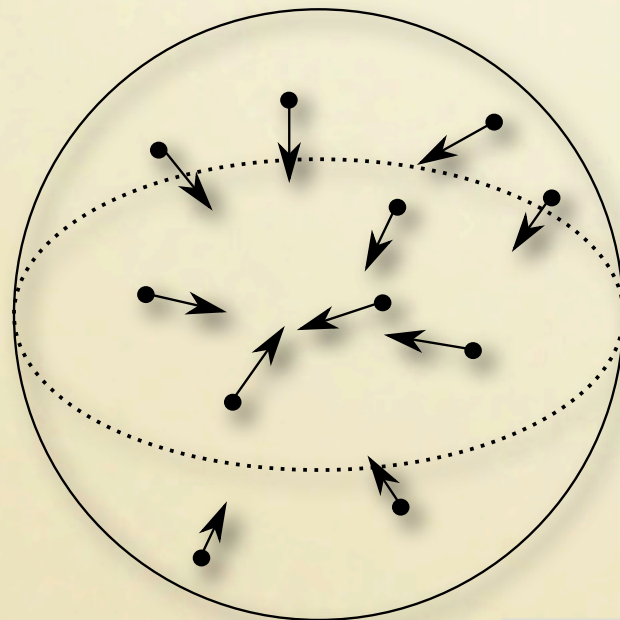
Poisson: 
$$\Delta \Phi = 4\pi G a^2 \bar{\rho} \delta$$



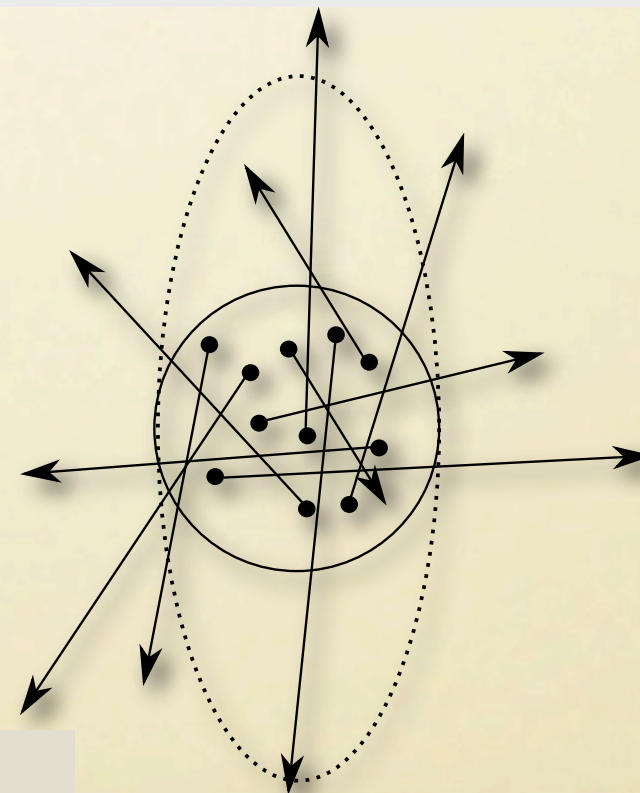
# 赤方偏移空間変形

- 赤方偏移サーベイにおける天体の空間分布は、実際のものとは異なる
  - 天体までの奥行き方向の距離は赤方偏移で測定する
  - 銀河の特異速度により分布が視線方向へ変形

大スケール：  
“Kaiser effect”



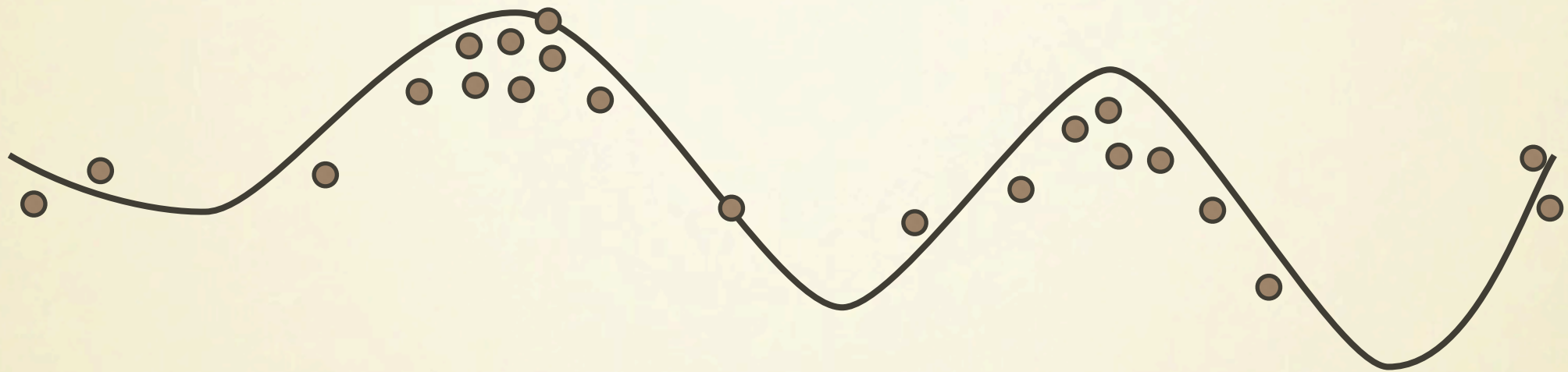
小スケール：  
“Fingers-of-God” effect



視線方向



# バイアス



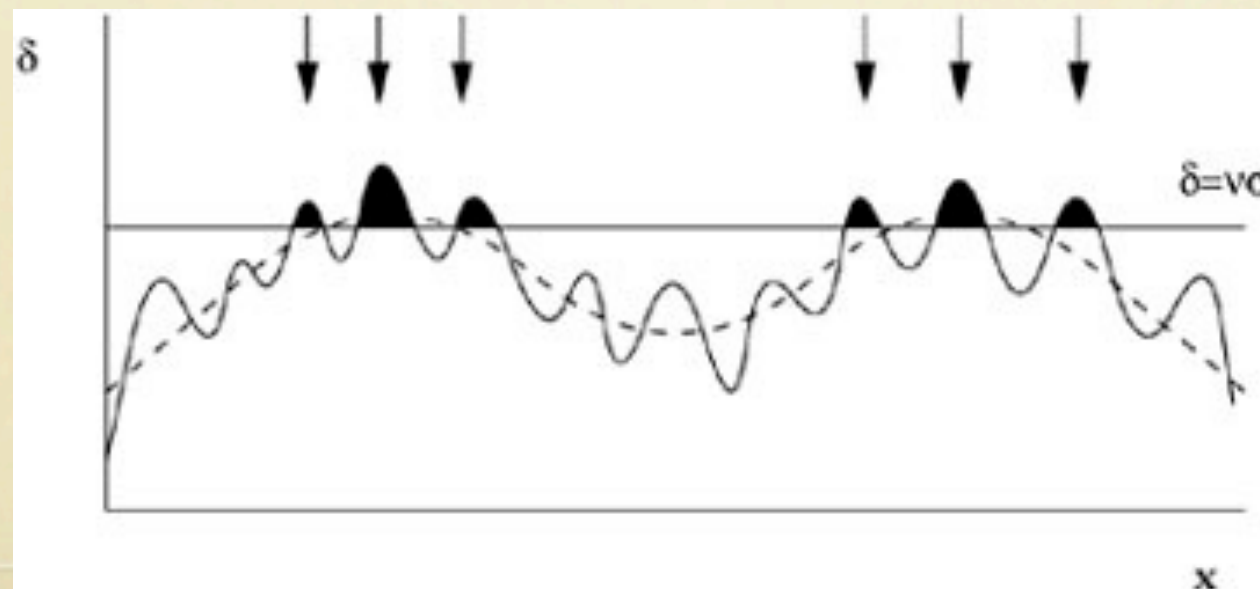
- 一般に、質量密度  $\neq$  天体数密度
- 観測では、天体数密度を使って質量密度を見積もる必要がある
- 天体数密度は質量密度の「バイアスされた」トレーサー
  - その関係は一般に非線形、非局所的

$$\delta_m(\mathbf{x}) = \frac{\rho_m(\mathbf{x})}{\bar{\rho}_m} - 1 \quad \Leftrightarrow \quad \delta_X(\mathbf{x}) = \frac{\rho_X(\mathbf{x})}{\bar{\rho}_X} - 1$$



# バイアス

- 銀河形成が完全に理解されていればバイアスに不定性はないが、  
—実際にはそうではない
- 銀河形成は複雑な非線形過程だが、大スケールにおいては「ハローバイアス」というモデルが有用であることがわかってきた
  - ハローバイアス (Mo & White 1996)
    - Extended Press-Schechter理論に基づく
    - 大スケールで平均した線形密度ゆらぎ  $\delta_0$  の値が与えられたときの、条件付き Press-Schechter 型質量関数を計算  $n(M|\delta_0)$





# 大規模構造を使って宇宙を測る

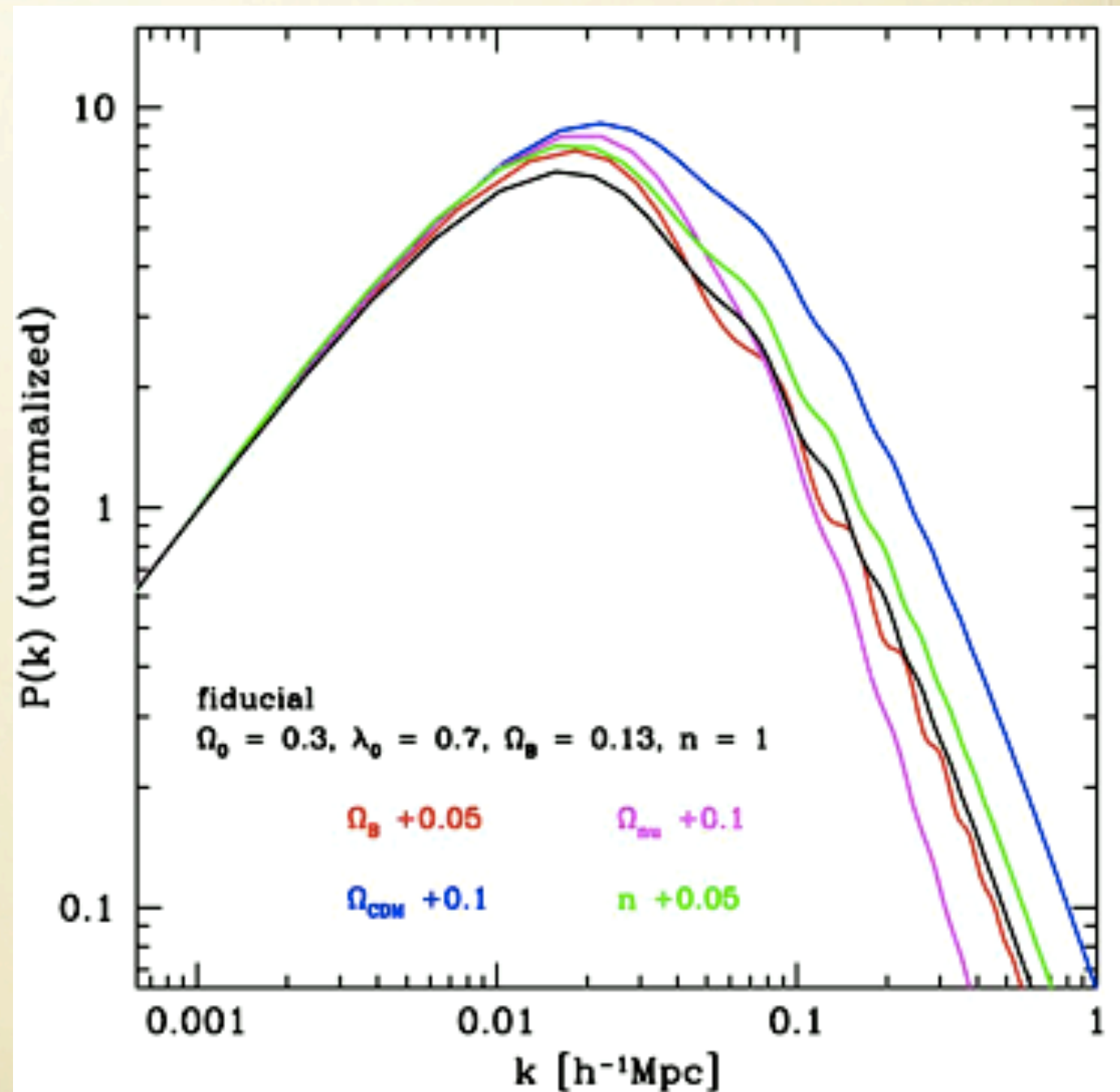
- 大規模構造は宇宙の初期ゆらぎを種にして形成される
  - 初期宇宙を探るための手がかりになる
    - 初期スペクトルや非ガウス性
    - インフレーション理論などへの制限
- 大規模構造の特徴的なパターンは宇宙を測定するための standard ruler (標準ものさし)
  - 宇宙の膨張率や曲率を測定することが可能
    - バリオン音響振動
    - ダークエネルギーなどへの制限



# パワースペクトル

- 波長ごとのゆらぎの大きさ (横軸：波数)

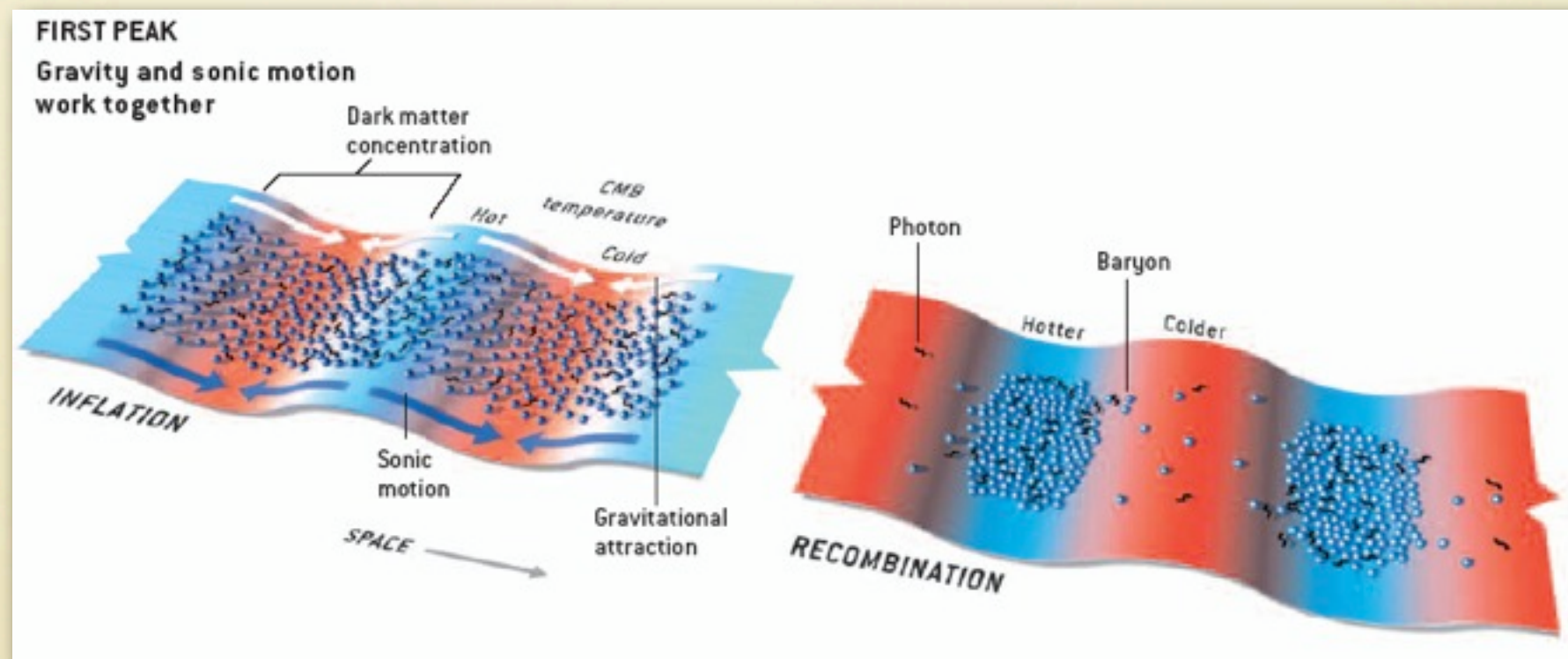
- 宇宙論パラメータごとに異なる依存性
- ダークマター量
- バリオン量
- ニュートリノ質量
- 初期ゆらぎ指数
- etc





# バリオン音響振動

- バリオン音響振動 (Baryon Acoustic Oscillations, BAO)
  - 宇宙初期において光子とバリオンが強く結合
  - 圧力を持つ流体 ⇒ 音波振動
  - 晴れ上がりにより結合が切れるまで振動が続き、その後は位相が固定

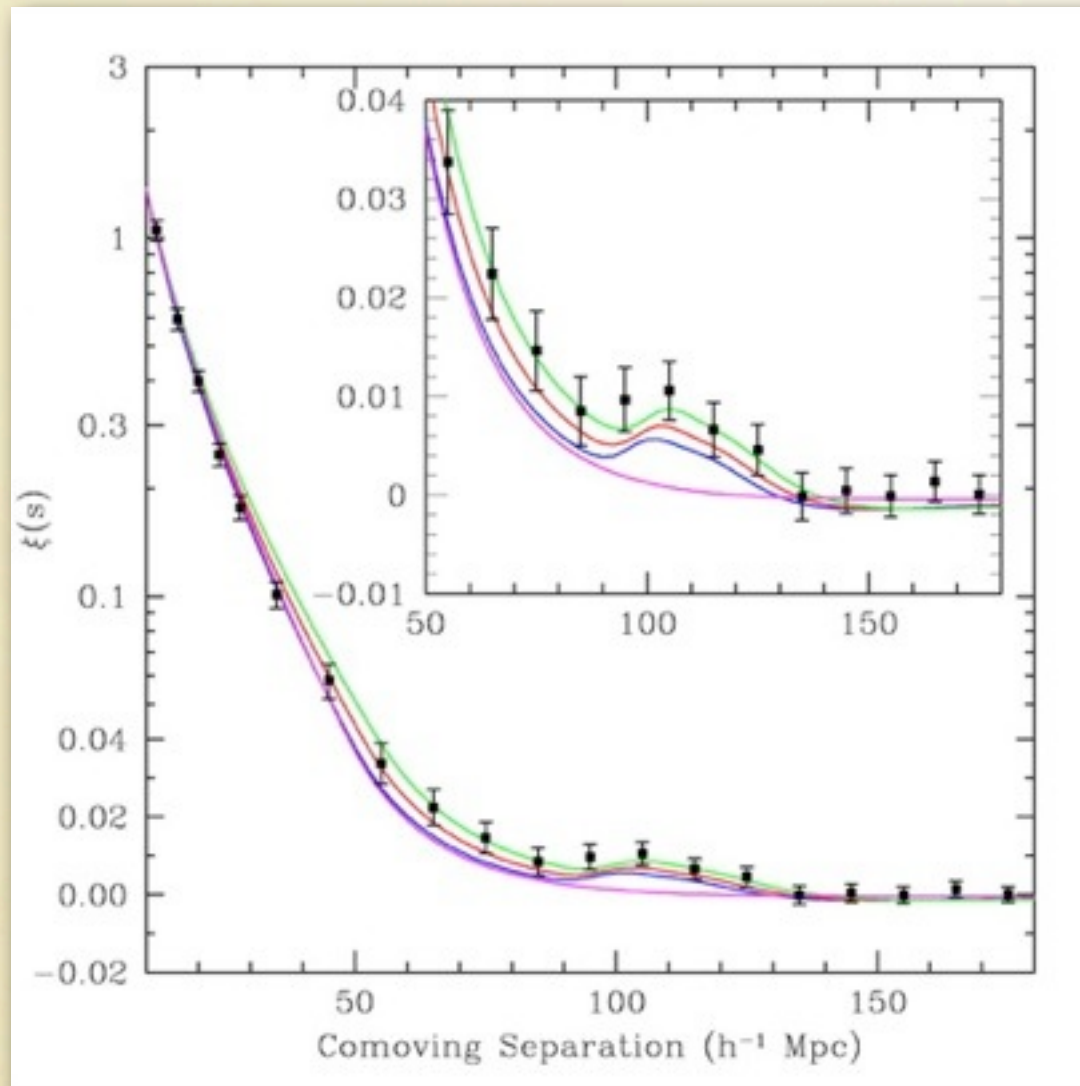


From Hu & White: Scientific American

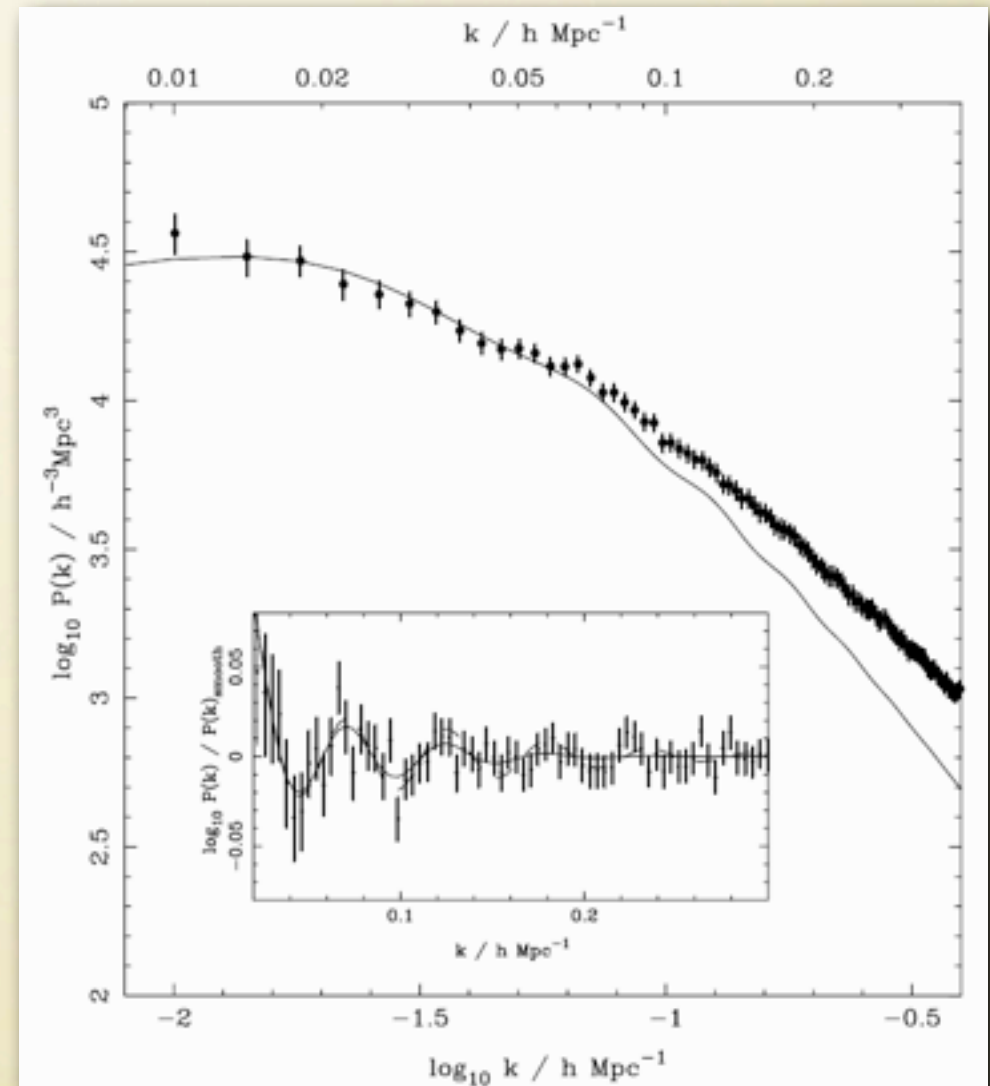


# バリオン音響振動

- 銀河分布におけるバリオン音響振動の痕跡
  - 晴れ上がり時に固定された振動位相は現在の銀河分布に特徴的なスケールを与える



Eisenstein et al. (2005)



Percival et al. (2007)



# バリオン音響振動

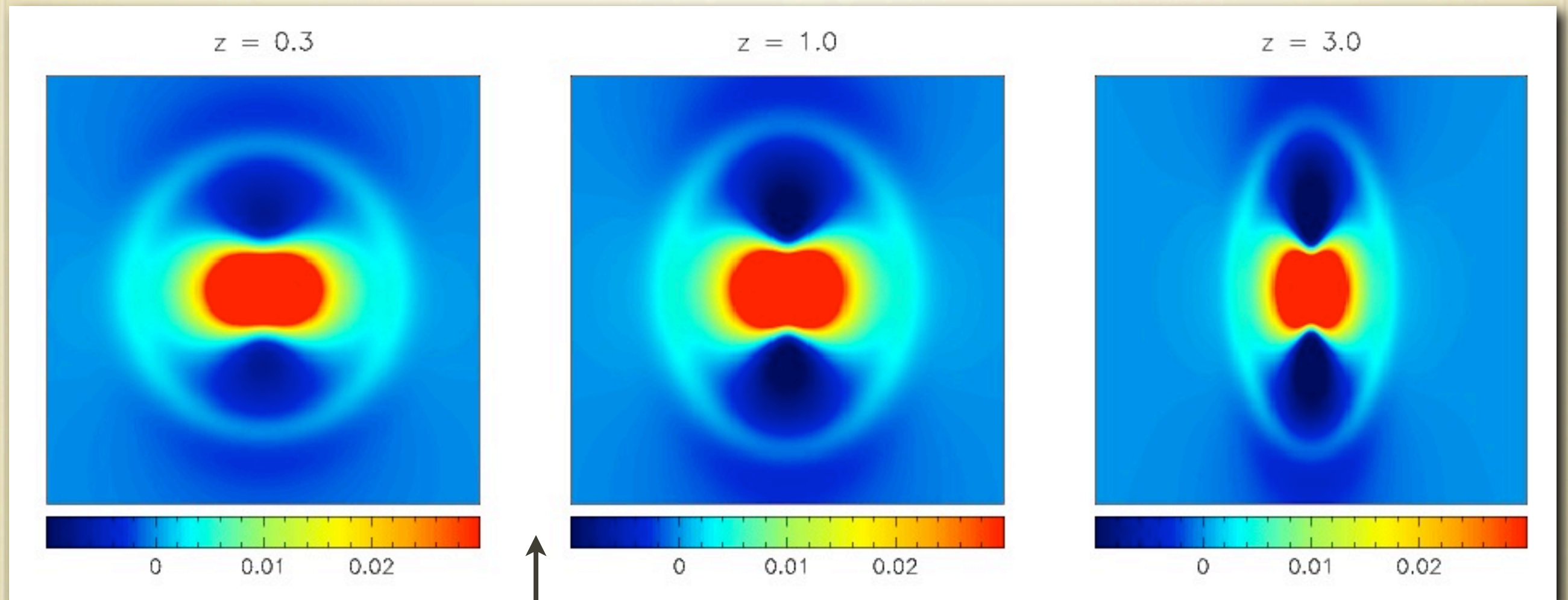
- 銀河分布におけるバリオン音響振動スケール
  - 宇宙の膨張率を測定する「ものさし」として用いることにより、ダークエネルギーを測定することが可能





# バリオン音響振動

- 銀河分布の非等方変形
  - 線形理論に基づく観測量の予言：2点相関関数
  - 変形の程度がダークエネルギーの性質を反映



視線方向

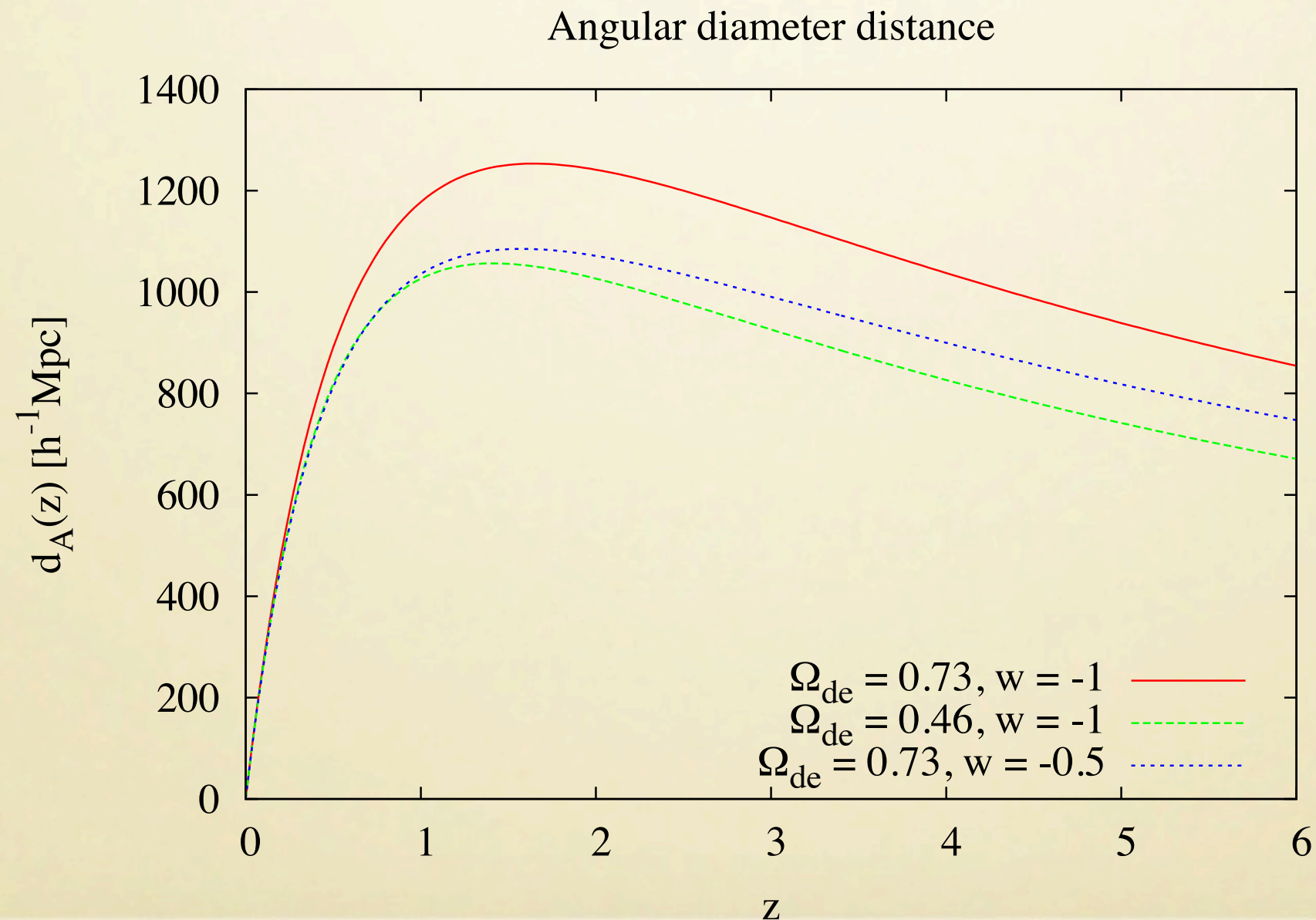
TM (2004)



# バリオン音響振動によりダークエネルギーを制限

- 高赤方偏移宇宙の見かけのバリオン音響振動スケールは、ダークエネルギーの性質に敏感

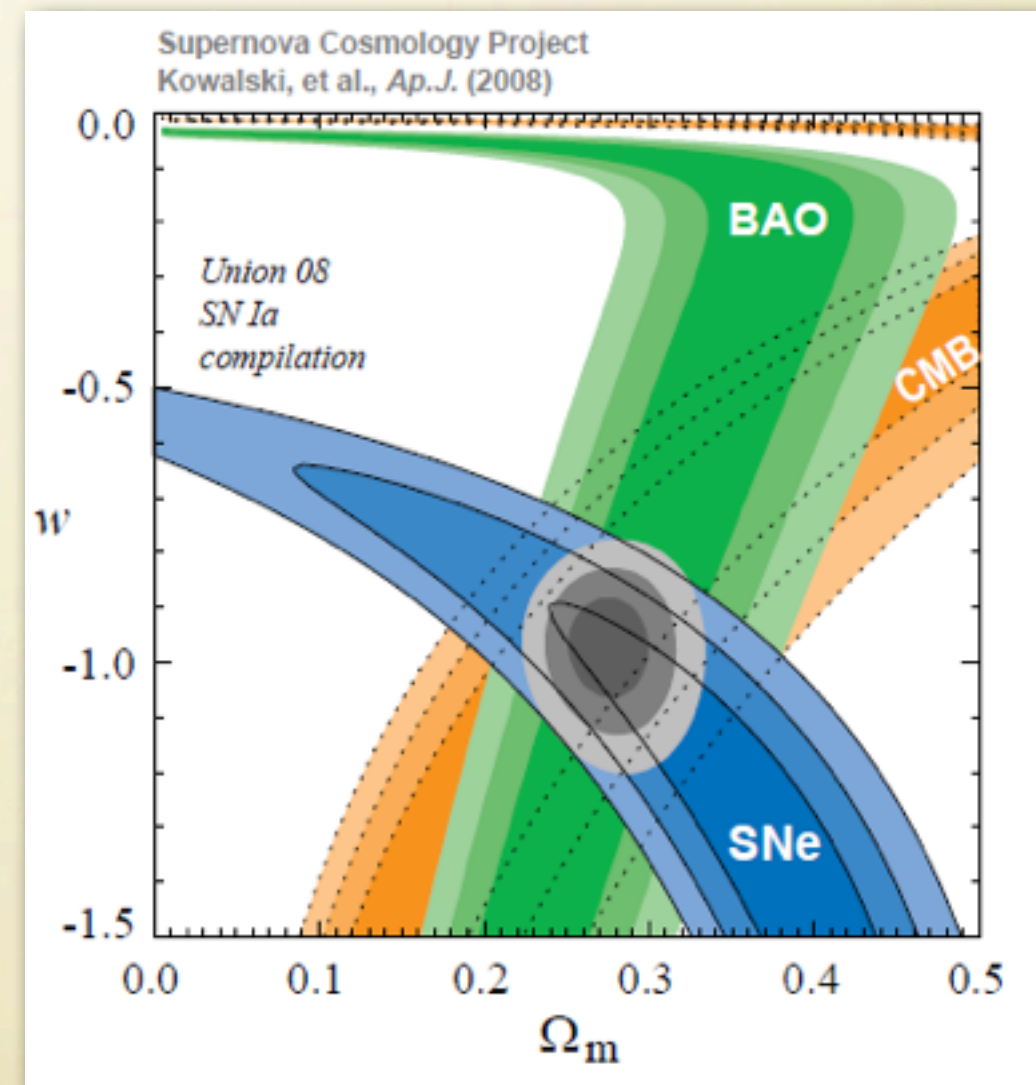
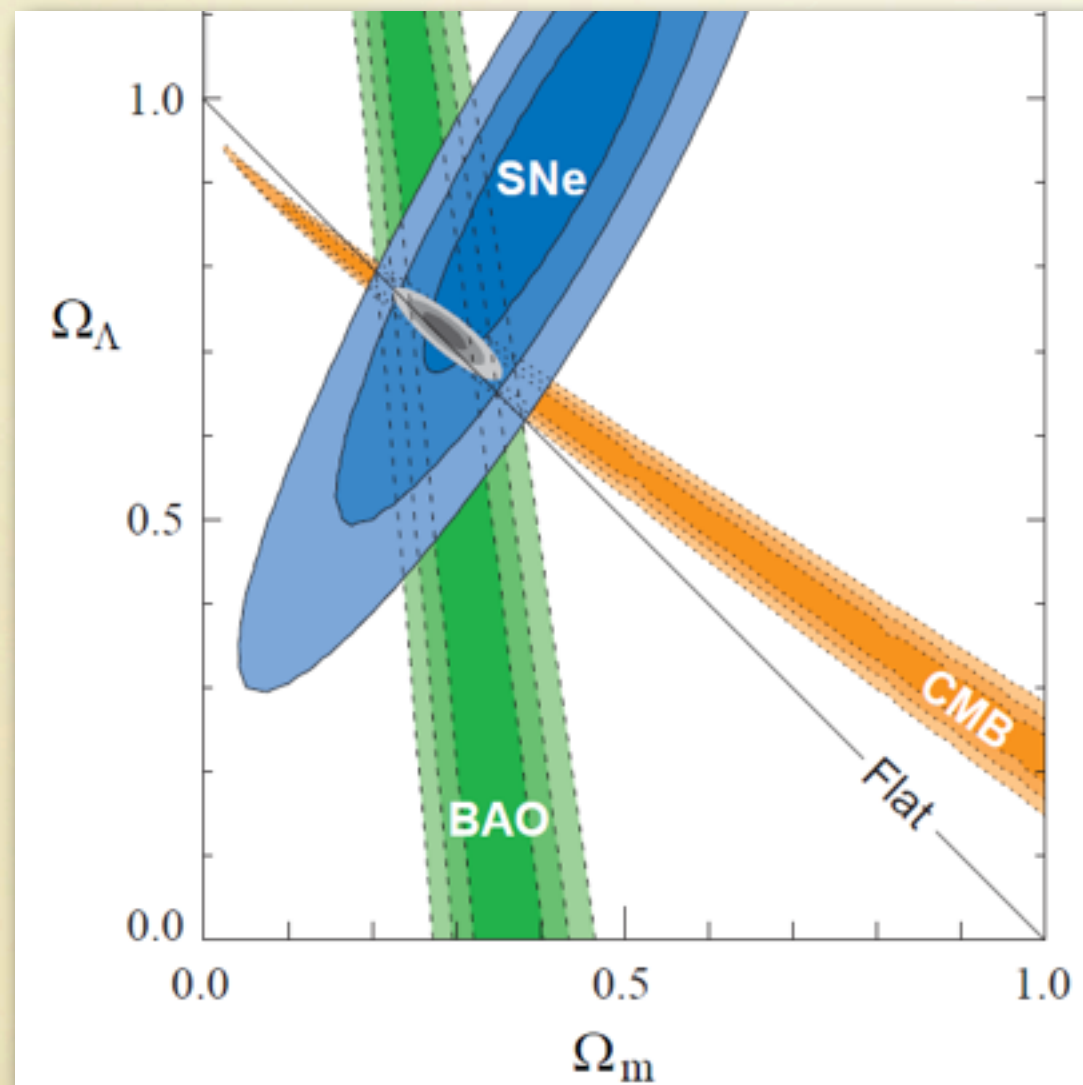
- 例：角径距離とダークエネルギー・パラメータ





# 宇宙論におけるバリオン音響振動の重要性

- バリオン音響振動は宇宙論パラメータを制限するのに重要な役割
  - 超新星や宇宙マイクロ波背景放射とは、相補的役割





# 宇宙論におけるバリオン音響振動の重要性

- バリオン音響振動は宇宙論パラメータを制限するのに重要な役割
  - 例：WMAP7の解析 (Komatsu et al. 2010)

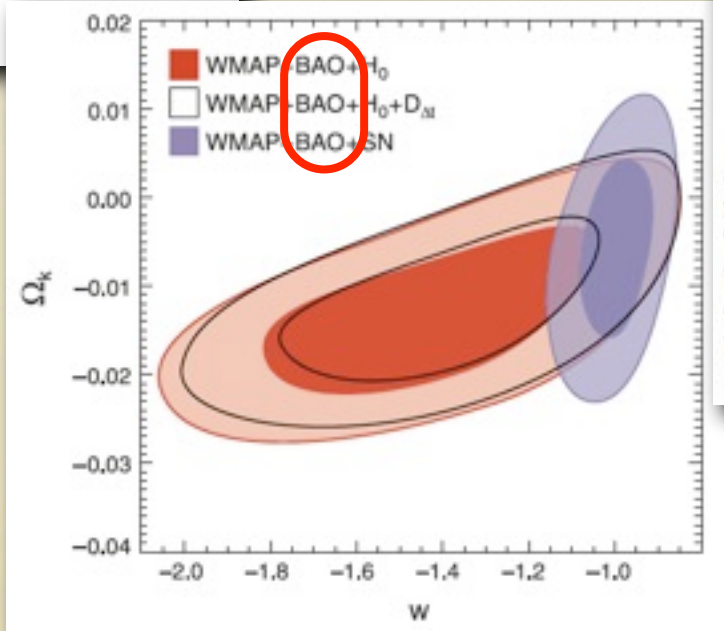
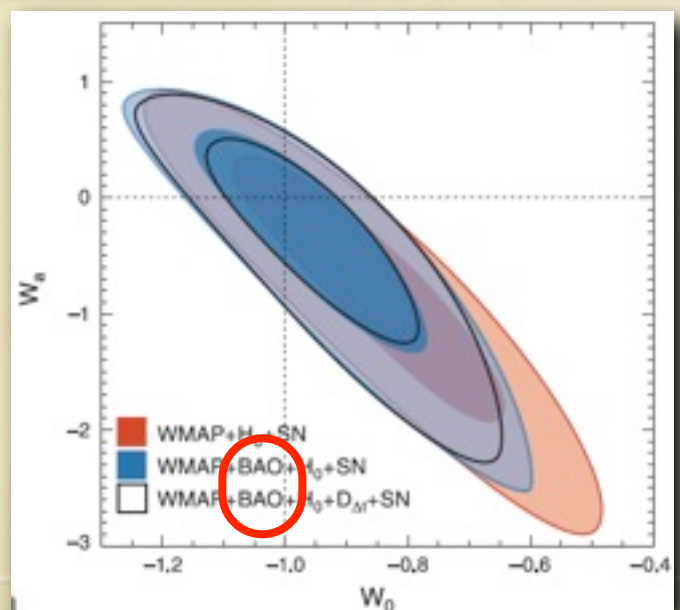
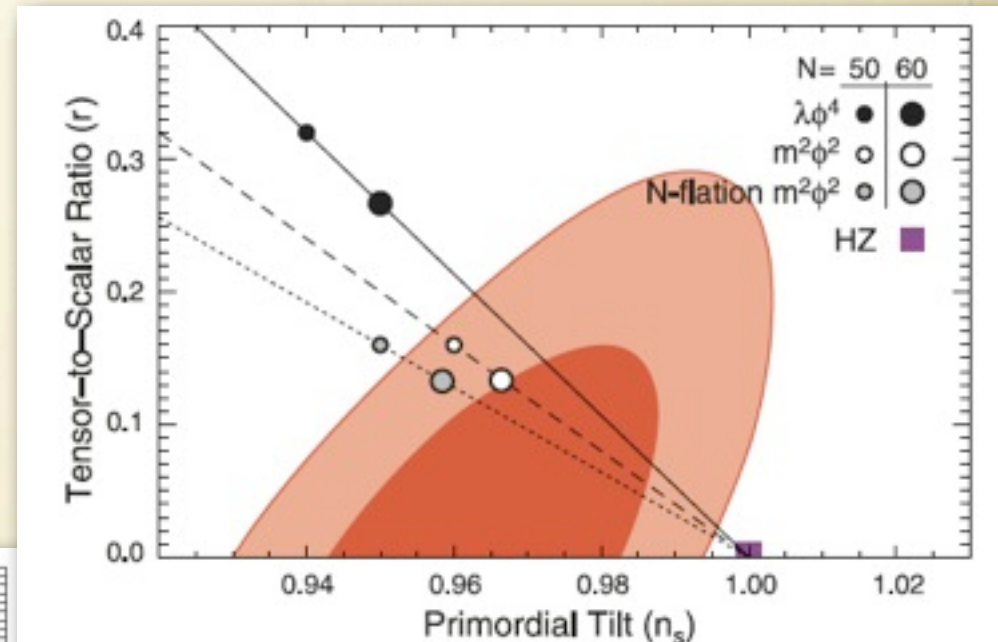
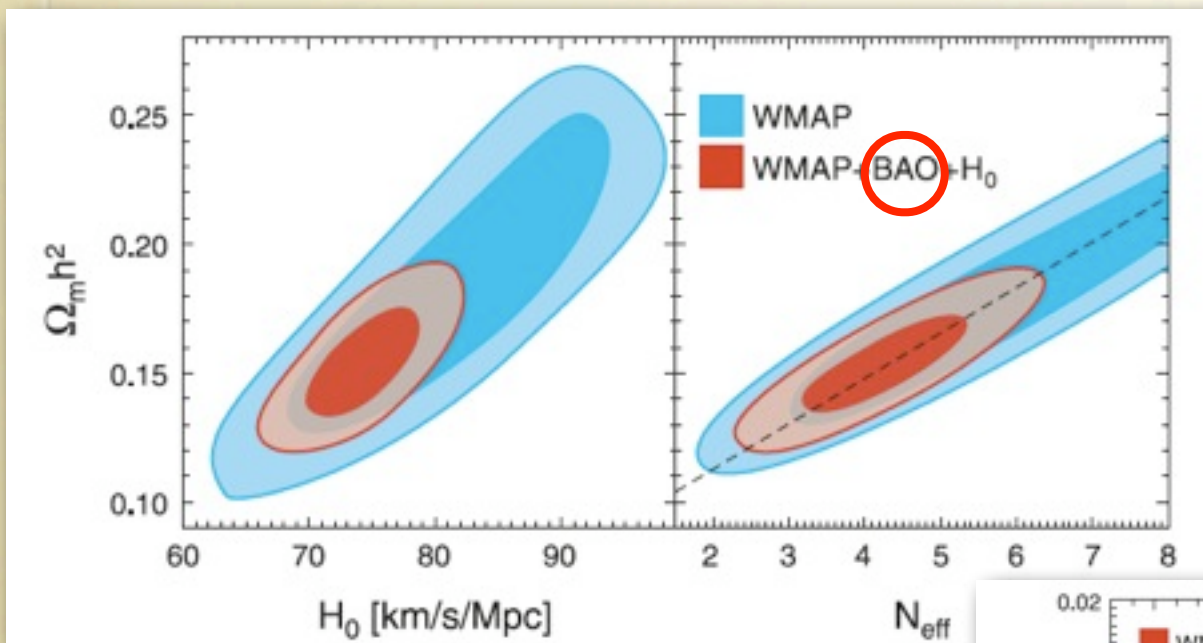


FIG. 19.— Two-dimensional joint marginalized constraint (68% and 95% CL) on the primordial tilt,  $n_s$ , and the tensor-to-scalar ratio,  $r$ , derived from the data combination of **WMAP+BAO+ $H_0$** . The symbols show the predictions from “chaotic” inflation models whose potential is given by  $V(\phi) \propto \phi^\alpha$  (Linde 1983), with  $\alpha = 4$  (solid) and  $\alpha = 2$  (dashed) for single-field models, and  $\alpha = 2$  for multi-axion field models with  $\beta = 1/2$  (dotted; Easter & McAllister 2006).



# 宇宙論におけるバリオン音響振動の重要性

- バリオン音響振動サーベイは、ダークエネルギーを制限する観測の将来計画の中で、最も確実な方法のひとつと考えられている

Survey	Description	Probes	Stage <sup>a</sup>
<i>Ground-based:</i>			
ACT	SZE, 6-m	CL	II
APEX	SZE, 12-m	CL	II
SPT	SZE, 10-m	CL	II
VST	Optical imaging, 2.6-m	BAO, CL, WL	II
Pan-STARRS 1(4)	Optical imaging, 1.8-m(×4)	All	II(III)
DES	Optical imaging, 4-m	All	III
Hyper Suprime-Cam	Optical imaging, 8-m	WL, CL, BAO	III
ALPACA	Optical imaging, 8-m	SN, BAO, CL	III
LSST	Optical imaging, 6.8-m	All	IV
AAT WiggleZ	Spectroscopy, 4-m	BAO	II
HETDEX	Spectroscopy, 9.2-m	BAO	III
PAU	Multifilter imaging, 2-3-m	BAO	III
SDSS BOSS	Spectroscopy, 2.5-m	BAO	III
WMOS	Spectroscopy, 8-m	BAO	III
HSHS	21-cm radio telescope	BAO	III
SKA	km <sup>2</sup> radio telescope	BAO, WL	IV
<i>Space-based:</i>			
<i>JDEM Candidates</i>			
ADEPT	Spectroscopy	BAO, SN	IV
DESTINY	Grism spectrophotometry	SN	IV
SNAP	Optical+NIR+spectro	All	IV
<i>Proposed ESA Missions</i>			
DUNE	Optical imaging	WL, BAO, CL	
SPACE	Spectroscopy	BAO	
eROSITA	X-ray	CL	
<i>CMB Space Probe</i>			
Planck	SZE	CL	
<i>Beyond Einstein Probe</i>			
Constellation-X	X-ray	CL	IV



# 初期ゆらぎの非ガウス性

- 観測事実として、初期ゆらぎはランダムガウスゆらぎに非常に近い
  - 多くの単純なインフレーション理論の予言
  - ガウスゆらぎは普遍的に作られやすい
  - 中心極限定理
- 初期ゆらぎにわずかな非ガウス性がある可能性
  - 数学的に完全なガウスゆらぎは逆に不自然
  - 観測できれば、極初期宇宙モデルに対する大きな情報



# 非ガウスゆらぎのモデル化

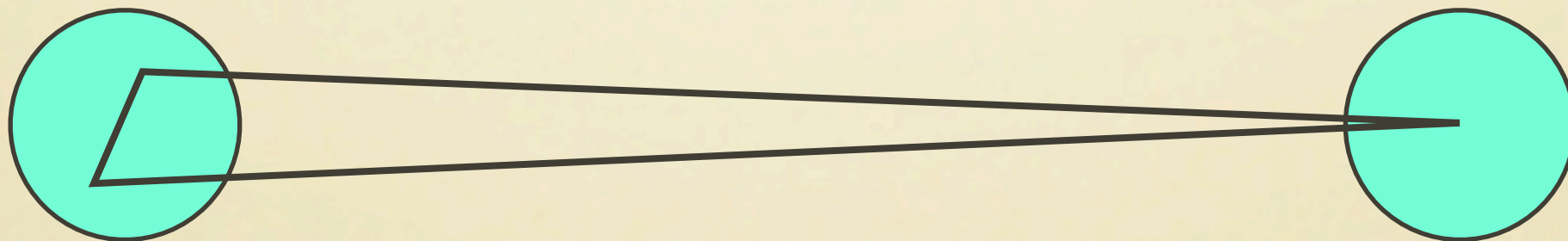
- ガウスゆらぎはパワースペクトル  $P(k)$  だけで特徴づけられる（高次スペクトルはゼロ）
- これに対して、非ガウスゆらぎには無限の自由度がある（すべての高次スペクトルが自由）
- よく使われている Ansatz: 局所非ガウスモデル
  - ガウス場の局所変換を考え、最低次の係数を  $f_{\text{NL}}$

$$\Phi(\mathbf{r}) = \Phi_L(\mathbf{r}) + f_{\text{NL}} \left( \Phi_L^2(\mathbf{r}) - \langle \Phi_L^2(\mathbf{r}) \rangle \right)$$



# 大規模構造による初期非ガウス性の検証

- 大規模構造の観測におけるバイアス効果は、初期非ガウス性の検証に好都合
  - 非ガウス性は、大スケールと小スケールの上に相関をもたらす
  - すると、小スケールの物理現象であるバイアスが、大スケールのパワースペクトルに影響する



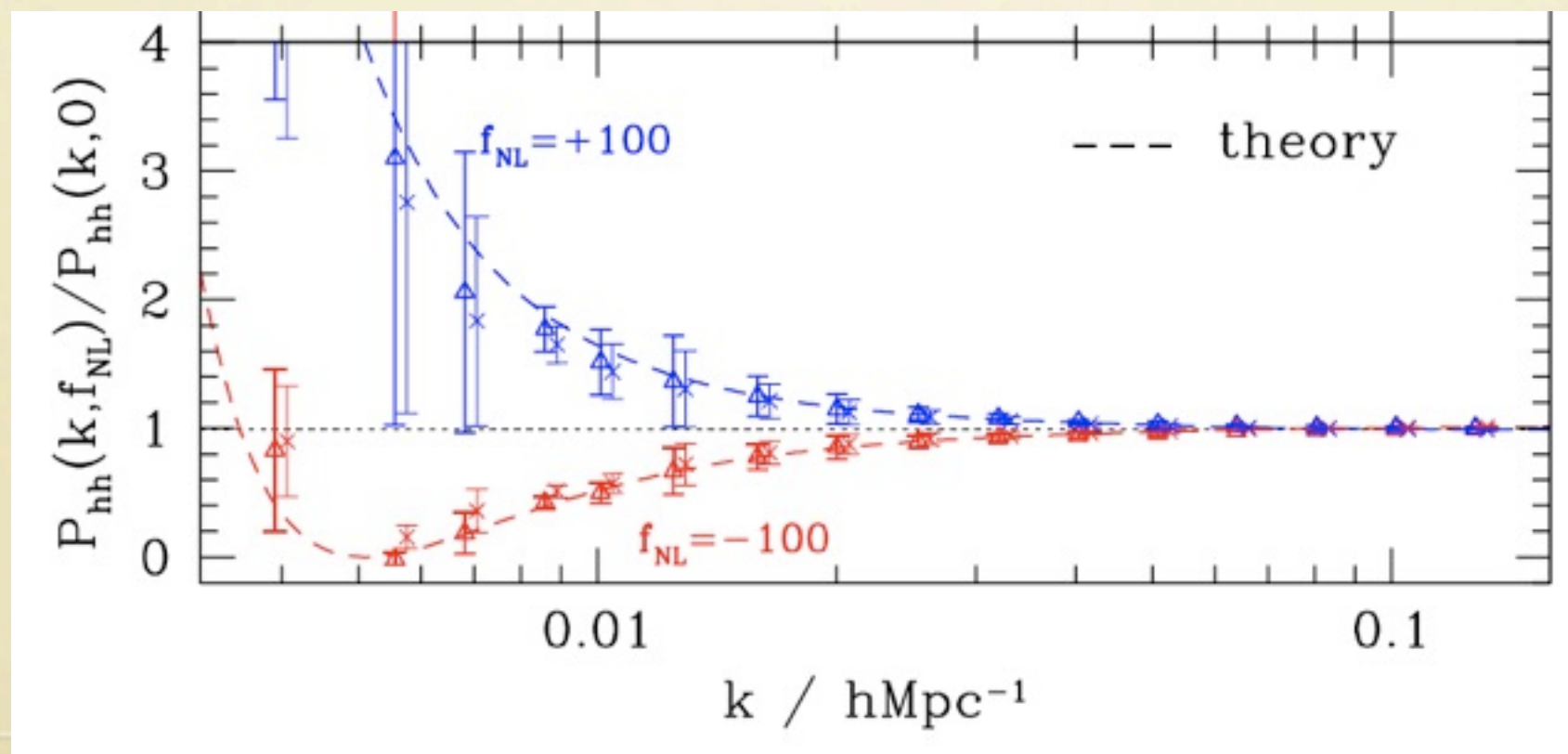


# 大規模構造による初期非ガウス性の検証

- 局所非ガウスモデルにおけるバイアスのスケール依存性

$$\Phi(\mathbf{r}) = \Phi_L(\mathbf{r}) + f_{\text{NL}} (\Phi_L^2(\mathbf{r}) - \langle \Phi_L^2(\mathbf{r}) \rangle)$$

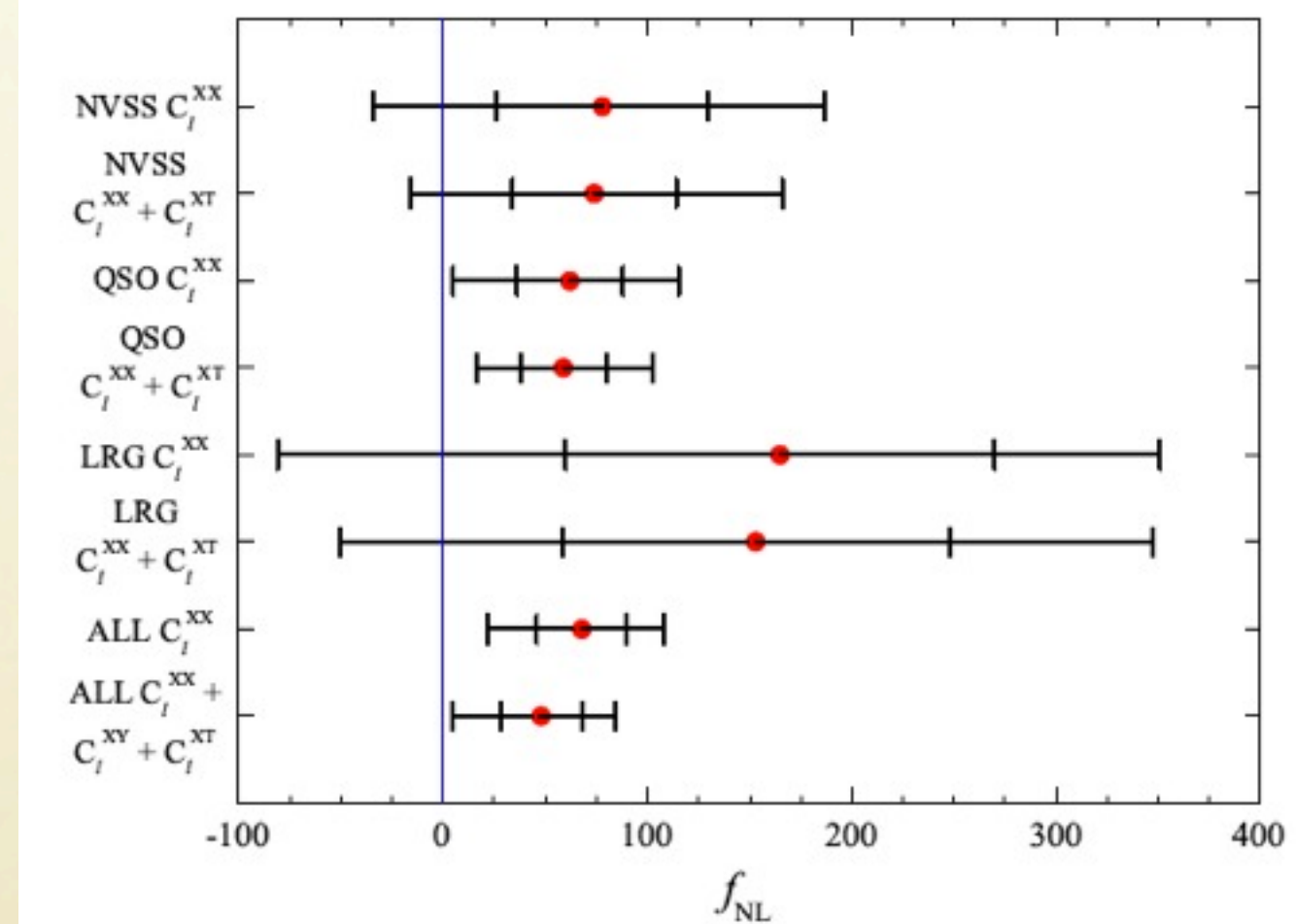
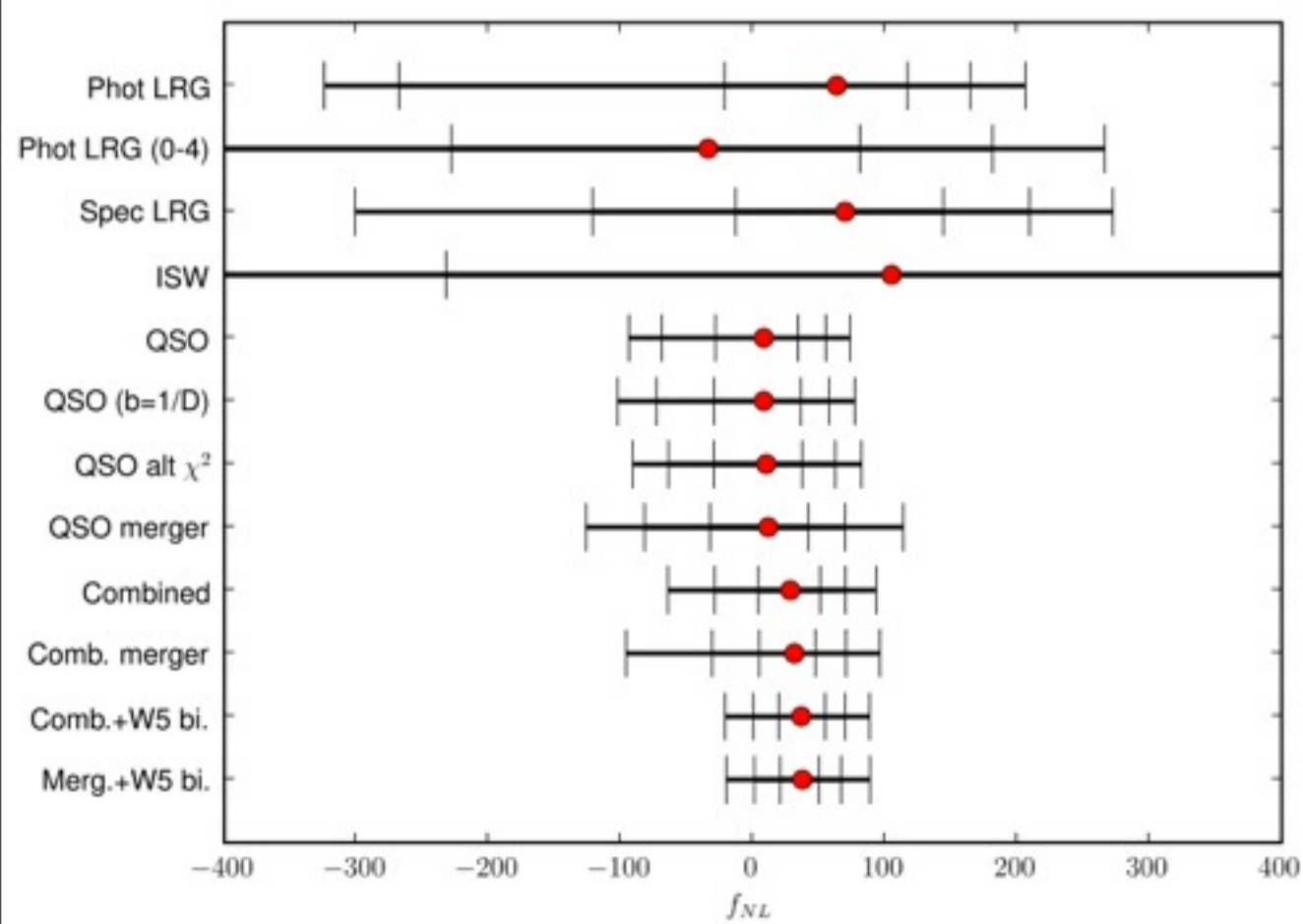
$$\Delta b(M, k) = 3 f_{\text{NL}} (b - 1) \delta_c \frac{\Omega_m}{k^2 T(k) D(z)} \left( \frac{H_0}{c} \right)^2$$



Desjacque,  
Seljak, Iliev 2009

# 解析例

- Slosar et al (2008), Xia et al (2011)





# 結論

- 大規模構造は宇宙論にとって大きな情報源
- 最近の話題
  - バリオン音響振動
    - ダークエネルギーの検証法として有力な将来計画
  - ゆらぎの非ガウス性を通じた極初期宇宙モデルの検証
    - バイアスの存在が、非ガウス性を探るのに有利
- その他にも、重力理論の検証、ニュートリノ質量やダークマターの性質への制限など、いくつかの話題がある
- 今後は観測の大きな進展が予定されていて将来が楽しみ



ISBN978-4-13-062612-5 C3042 ¥3800E

定価 (本体価格 3,800円+税)



# 現代宇宙論

——時空と物質の共進化

# 現代宇宙論

——時空と物質の共進化

松原隆彦 [著]



## ネットで話題の講義ノートが ついに書籍化!

著者HPで公開され、  
多くの学生・研究者の間で話題をよんだ講義ノートを、  
本格的に基礎から学びたい人たちに向けて全面改訂。  
他分野の読者や独習者にも最適なテキスト。

東京大学出版会

松原隆彦 [著]

東京大学  
出版会

[目次]

- 第1章 天文学から宇宙論へ
- 第2章 宇宙原理と観測量
- 第3章 膨張宇宙の力学
- 第4章 宇宙の熱史
- 第5章 初期宇宙とインフレーション
- 第6章 構造形成の基礎 I
- 第7章 構造形成の基礎 II
- 第8章 非一様宇宙の観測量
- 第9章 宇宙の大規模構造と重力レンズ
- 第10章 宇宙マイクロ波背景放射の非等方性

# 好評発売中!



土居守 松原隆彦

ダークエネルギー

宇宙の謎はどこまで解けたのか



光文社新書

???

9月頃発売予定