

2018年度

東北大学天文学教室

集中講義

# 暗黒物質優勢宇宙の 構造形成

樽家篤史

(京都大学 基礎物理学研究所)

# 自己紹介

名前：樽家 篤史（たるや あつし）

生年：1970年

出生地：京都府 長岡京市

出生高校：高槻高校

大学・大学院：名古屋大学（CG研） 現QG研の前身

1998年学位取得後、3年間のポスドクを経て

2001年～2013年

東京大学ビッグバン宇宙国際研究センター助教

2013年～ 京都大学 基礎物理学研究所 准教授

# 自己紹介

専門：観測的宇宙論

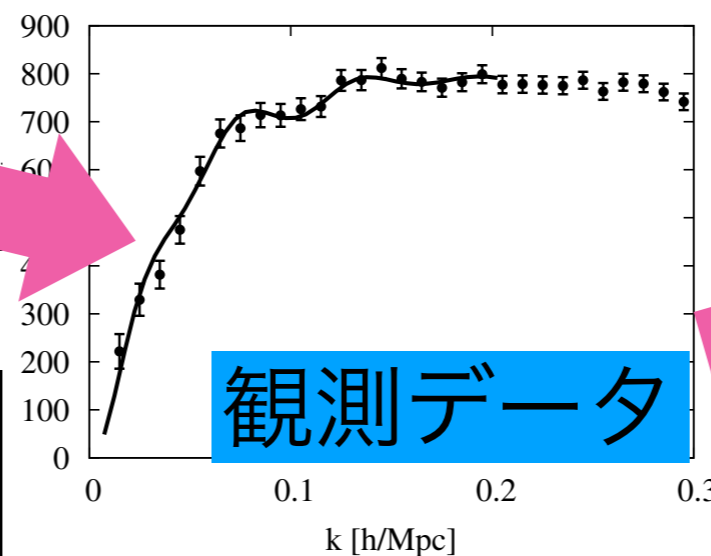
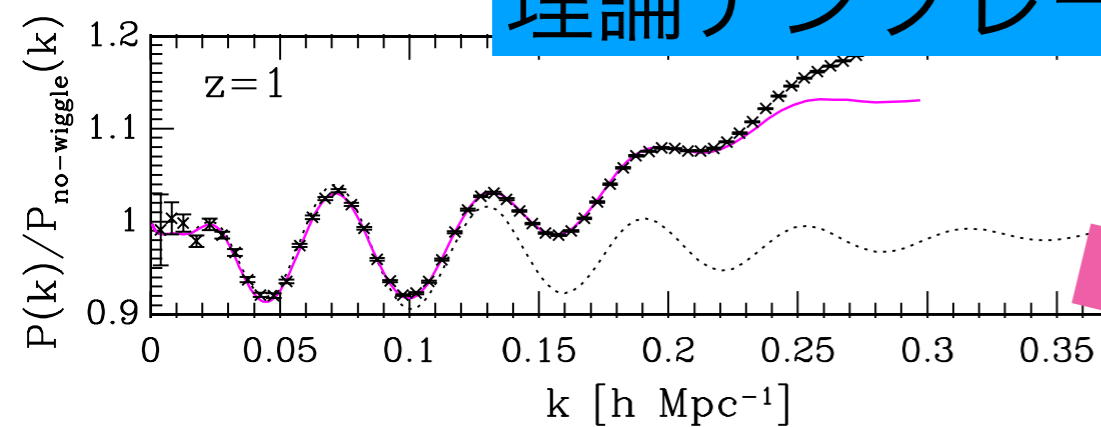
宇宙の構造形成の理論をベースに、宇宙の大規模構造などの観測から宇宙論的制限を得るための理論・観測的研究

摂動論的手法を駆使した

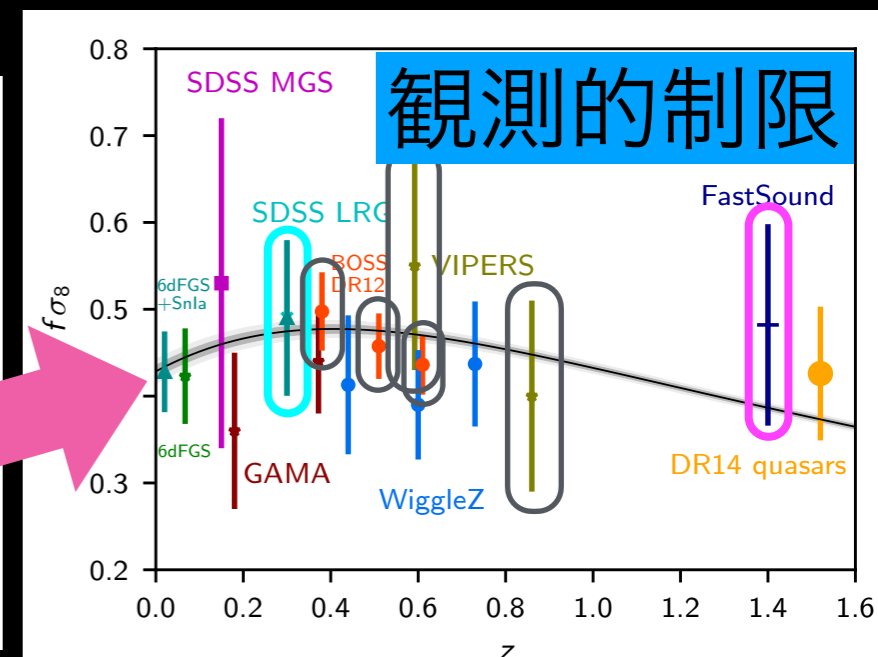
非線形重力進化が進んだ宇宙の大規模構造の精密理論計算

とその観測的応用

理論テンプレート



観測データ



観測的制限

# 講義の目標

観測的宇宙論の基盤をなす宇宙の構造形成の理論と、観測から宇宙の成り立ち・進化を探るための方法を学ぶ

宇宙の標準モデル ( $\Lambda$ CDMモデル)

にもとづく宇宙の構造形成

非一様宇宙の観測

非線形性が進んだ構造形成の理論的記述

# 概観

# 観測的宇宙論とは？

## 宇宙論

宇宙の成り立ち、進化を物理的に明らかにする学問

## トップダウン

物理の基礎理論にもとづき、理論的に整合性のとれた

宇宙創成・初期宇宙のモデル・シナリオを構築

## ボトムアップ

観測データにもとづき宇宙の進化を記述する理論を構築

あるいは

観測データを説明する理論を構築し、宇宙を理解する

# 宇宙論の観測対象

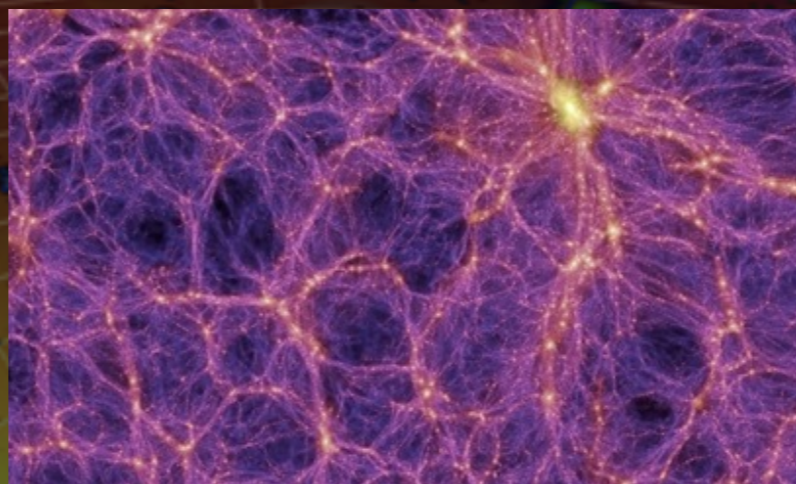
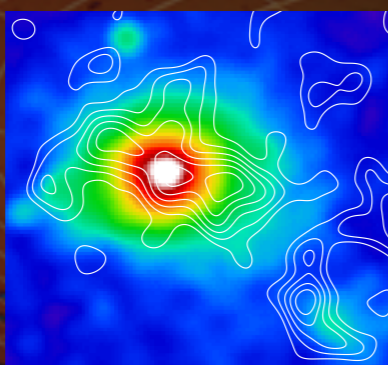
観測対象：宇宙膨張、ゆらぎの進化の情報を担う天体（現象）

銀河のクラスターリング

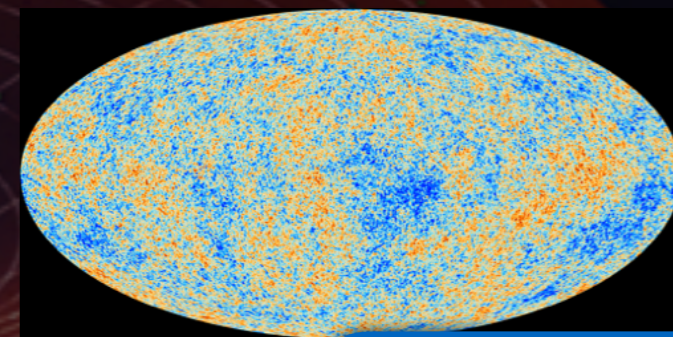
銀河



銀河団



マイクロ波背景放射



小スケール  
(~kpc)

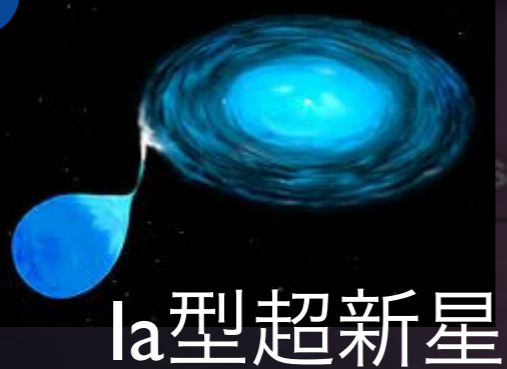
大スケール  
(~Gpc)



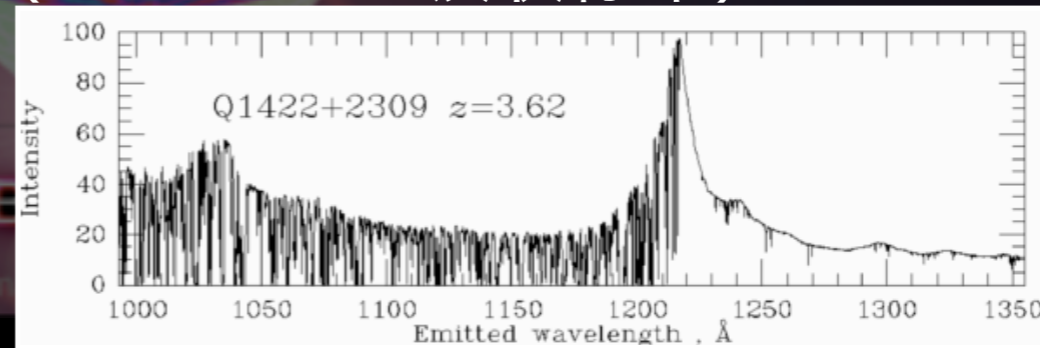
ライマン $\alpha$ の森  
(クエーサー吸収線系)



セファイド変光星

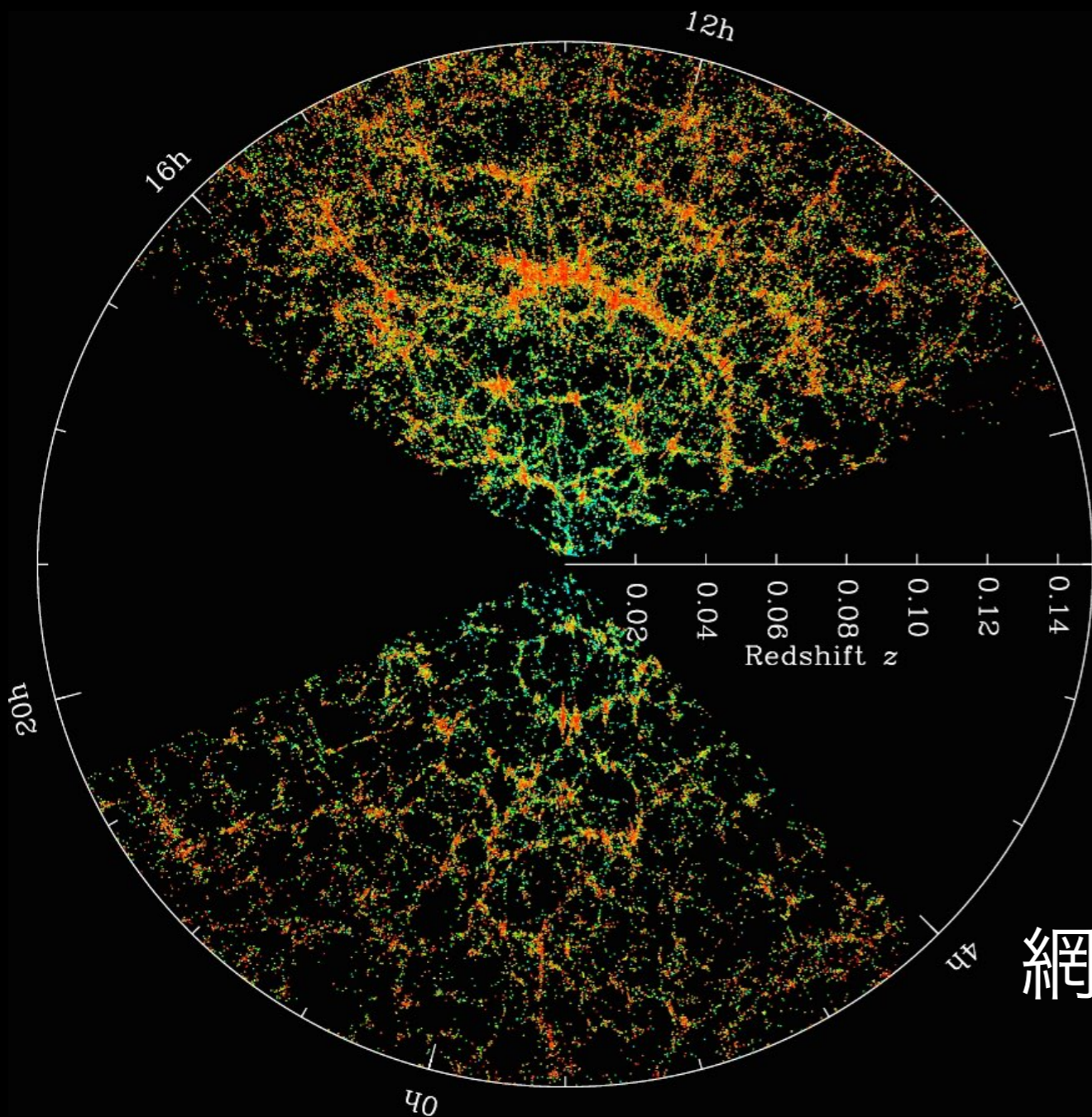


Ia型超新星

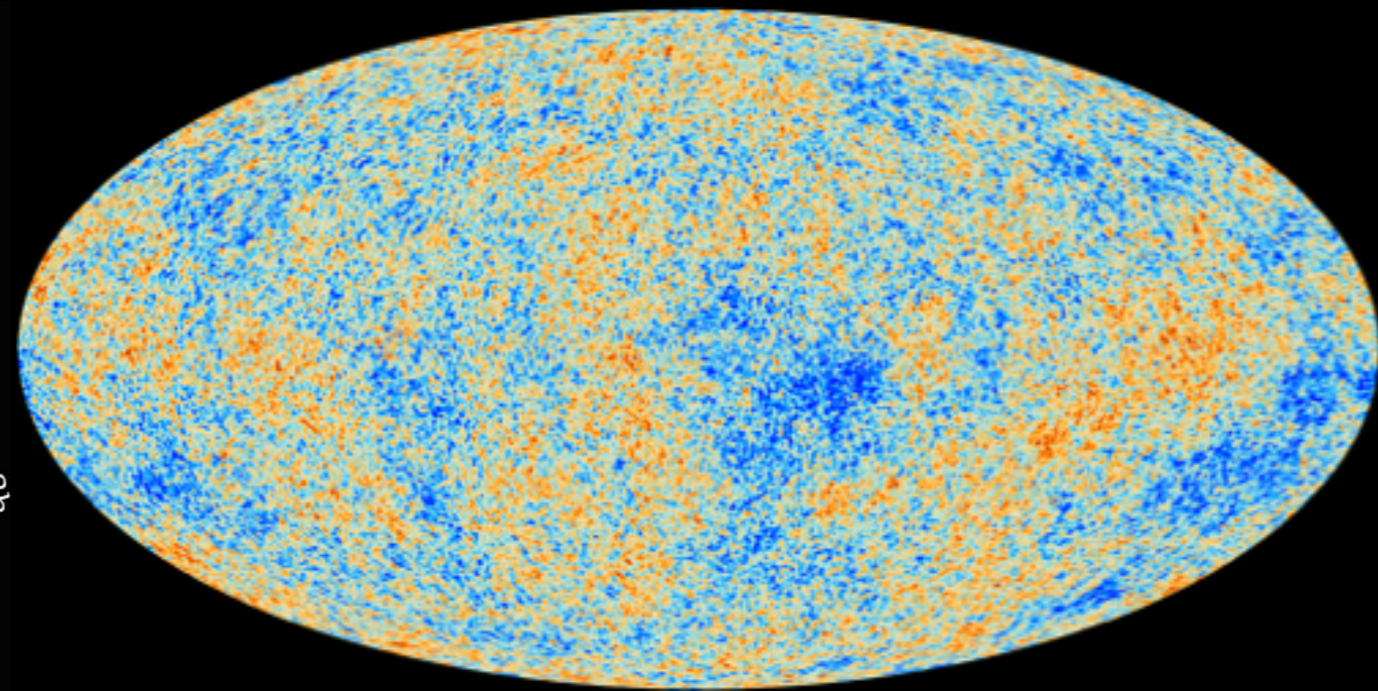


# 宇宙に広がる「ゆらぎ」

銀河分布  
(SDSS main galaxies)



宇宙マイクロ波背景放射  
(Planck)



絶対温度2.7Kの黒体放射だが  
わずかに温度ムラがある

網目状構造の非一様な空間分布  
(大規模構造)



# 「ゆらぎ」のもつ統計的性質

## パワースペクトル

乱雑なパターンに隠された情報を読み解く鍵

温度  
ゆらぎ

平均からのズレ

$$\frac{\Delta T(\theta, \varphi)}{T}$$

平均温度

波に分解

(球面調和関数展開)

$$\frac{\Delta T(\theta, \varphi)}{T} = \sum_{\ell, m} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta, \varphi)$$

$$a_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta, \varphi)$$

角度パワースペクトル

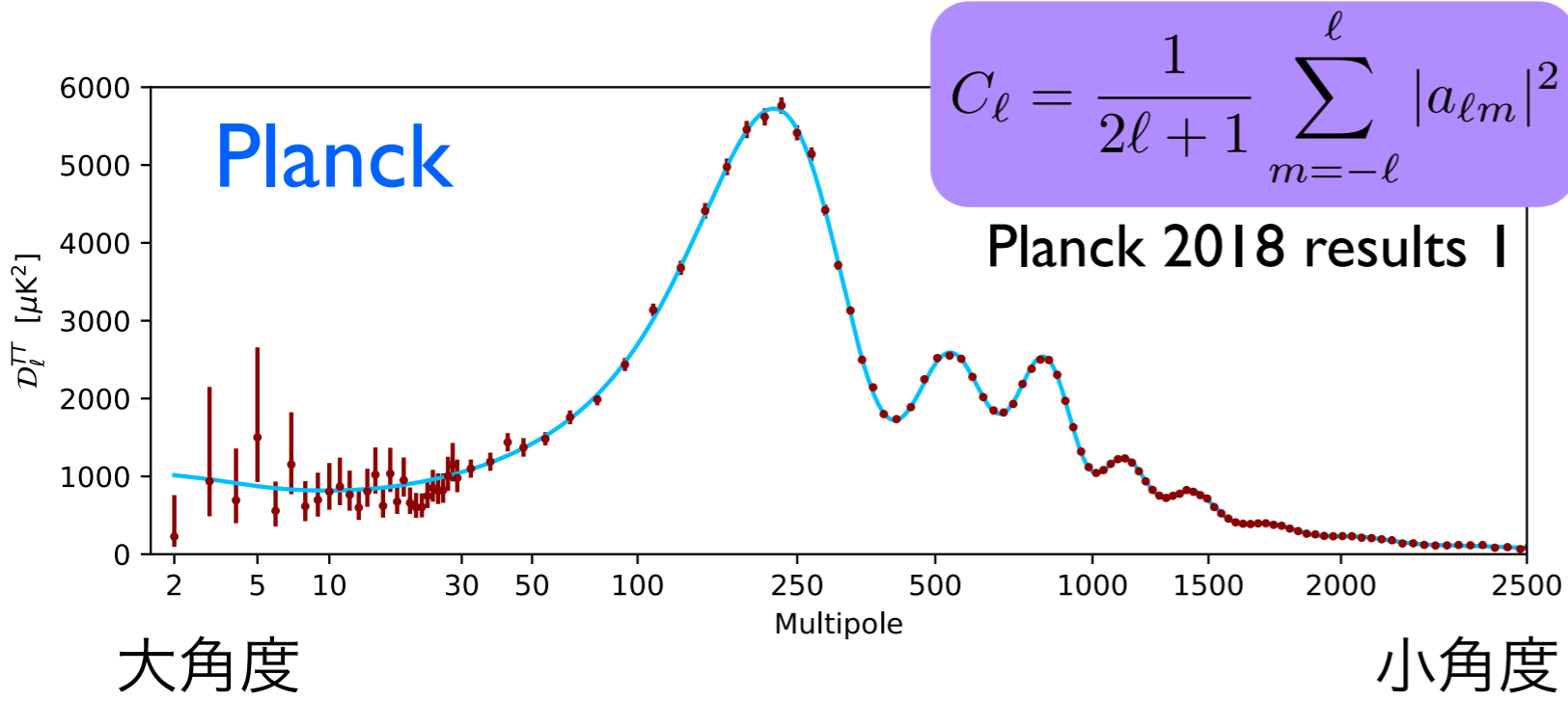
$$C_{\ell} = \frac{1}{2\ell + 1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} |a_{\ell m}|^2$$

角度サイズ  
 $\theta \sim \pi/\ell$

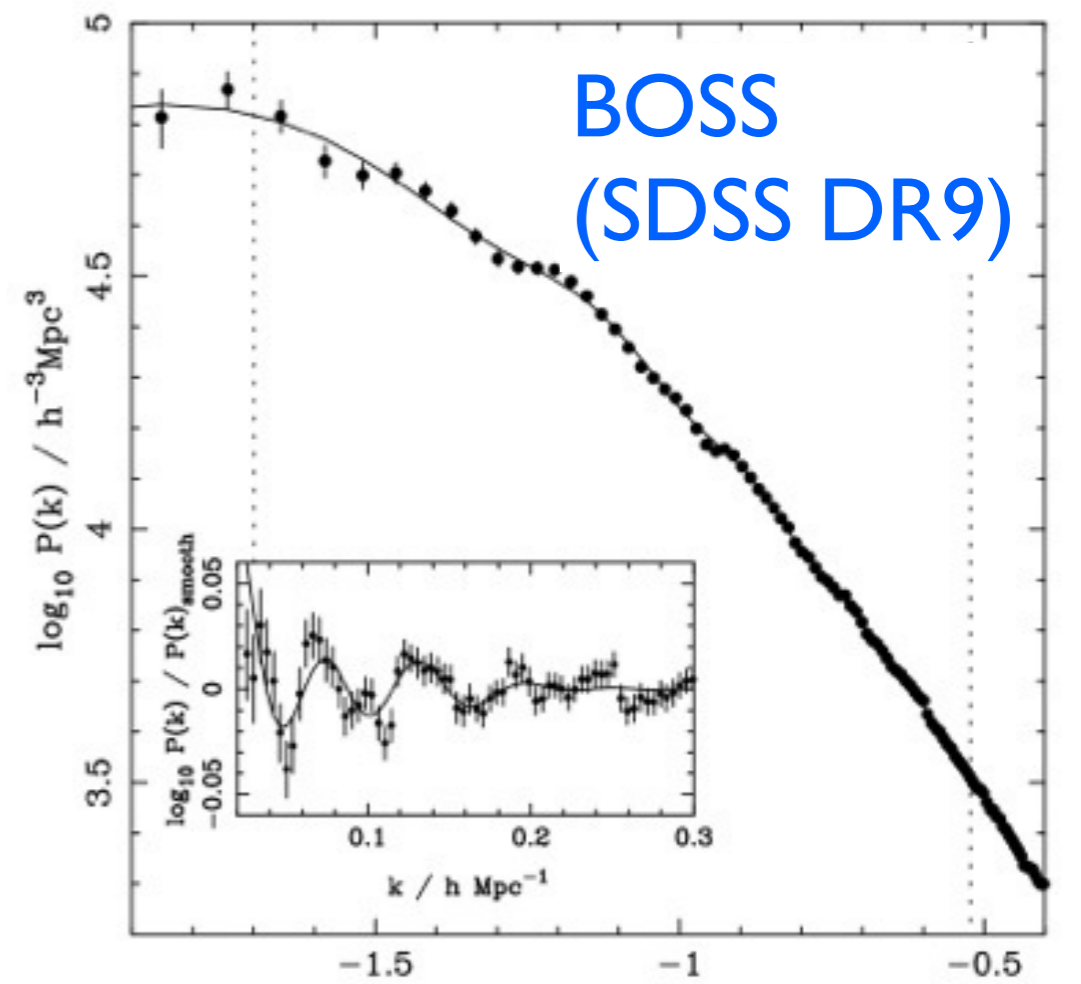
# パワースペクトル

## 宇宙マイクロ波背景放射

## 宇宙の大規模構造



$$P(k) = \frac{1}{(2\pi)^3} \sum_{|\vec{k}|=k} |\delta(\vec{k})|^2$$



- 空間パターンを波として調和関数展開
- いろんな波の振幅をスペクトル表示

特徴的なふるまいがみえる

大スケール 1/波長 [h/Mpc] 小スケール

# 宇宙の構造形成

様々な天体分布やマイクロ波背景放射に見られる「ゆらぎ」とその統計的性質 (非一様性・非等方性)

## 統一描像による見解

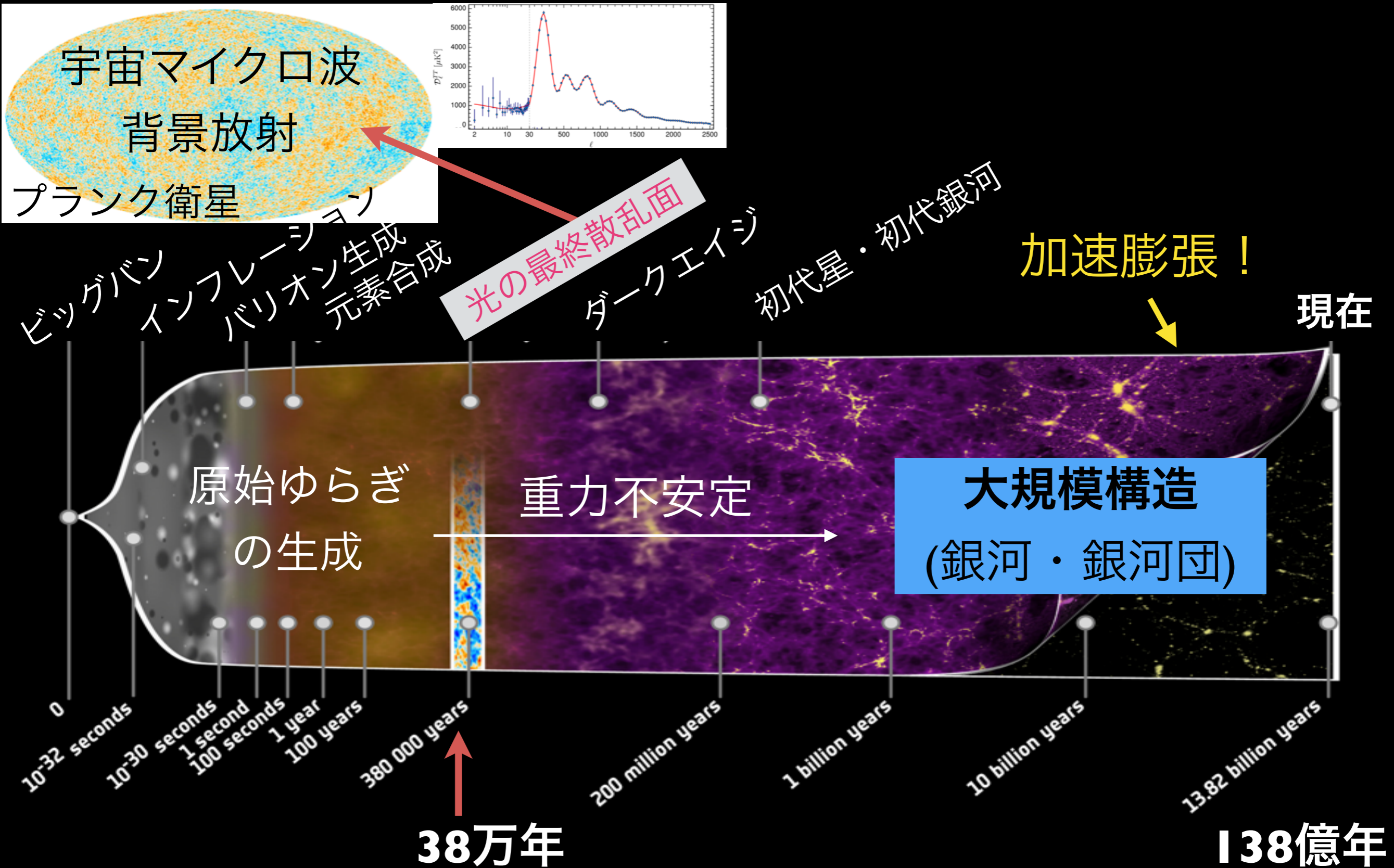
- ゆらぎの祖先は共通
- 宇宙初期の小さなゆらぎが

宇宙膨張と重力の影響を受けて時間発展してきた

→ パワースペクトルの振る舞いに現れる

「ゆらぎ」の時間進化を理論的に記述することで (構造形成の理論)、観測から宇宙論に対する様々な情報を引き出せる

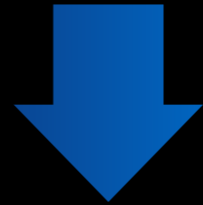
# 宇宙の進化史



# 構造形成の理論

輻射～物質・暗黒エネルギー優勢期における膨張宇宙のもとで

- 宇宙初期の物質進化：光と物質（電子）の電磁相互作用
- 重力不安定性による構造進化：（一般相対論にもとづく）  
地平線スケールを超えるゆらぎの進化



これらの効果を考慮した**非平衡進化過程**の時間発展を解けば、

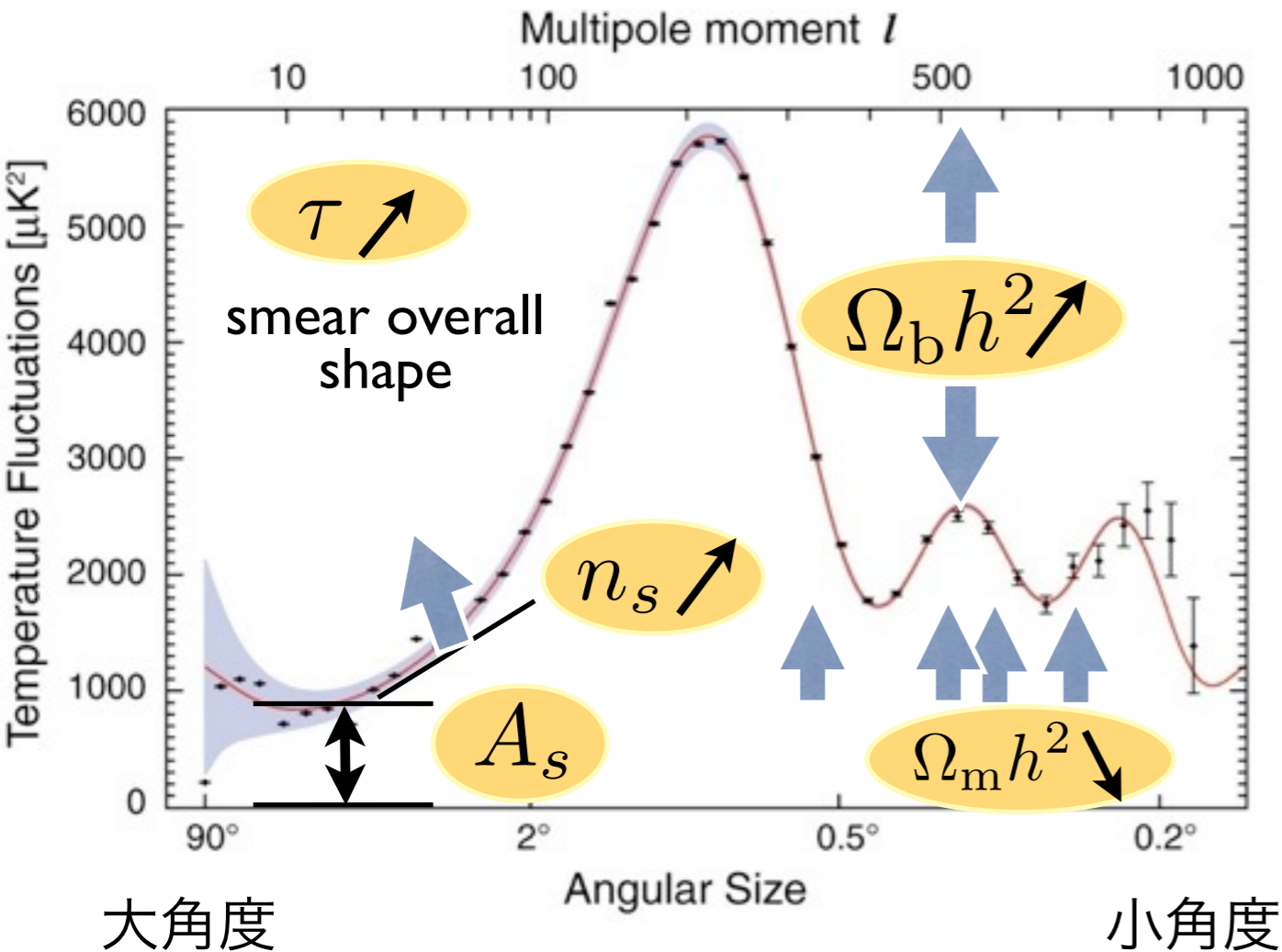
- 宇宙の大規模構造
- 宇宙マイクロ波背景放射のゆらぎ

に対する定量的な予言が可能（1980年代末～1990年代初頭に確立）

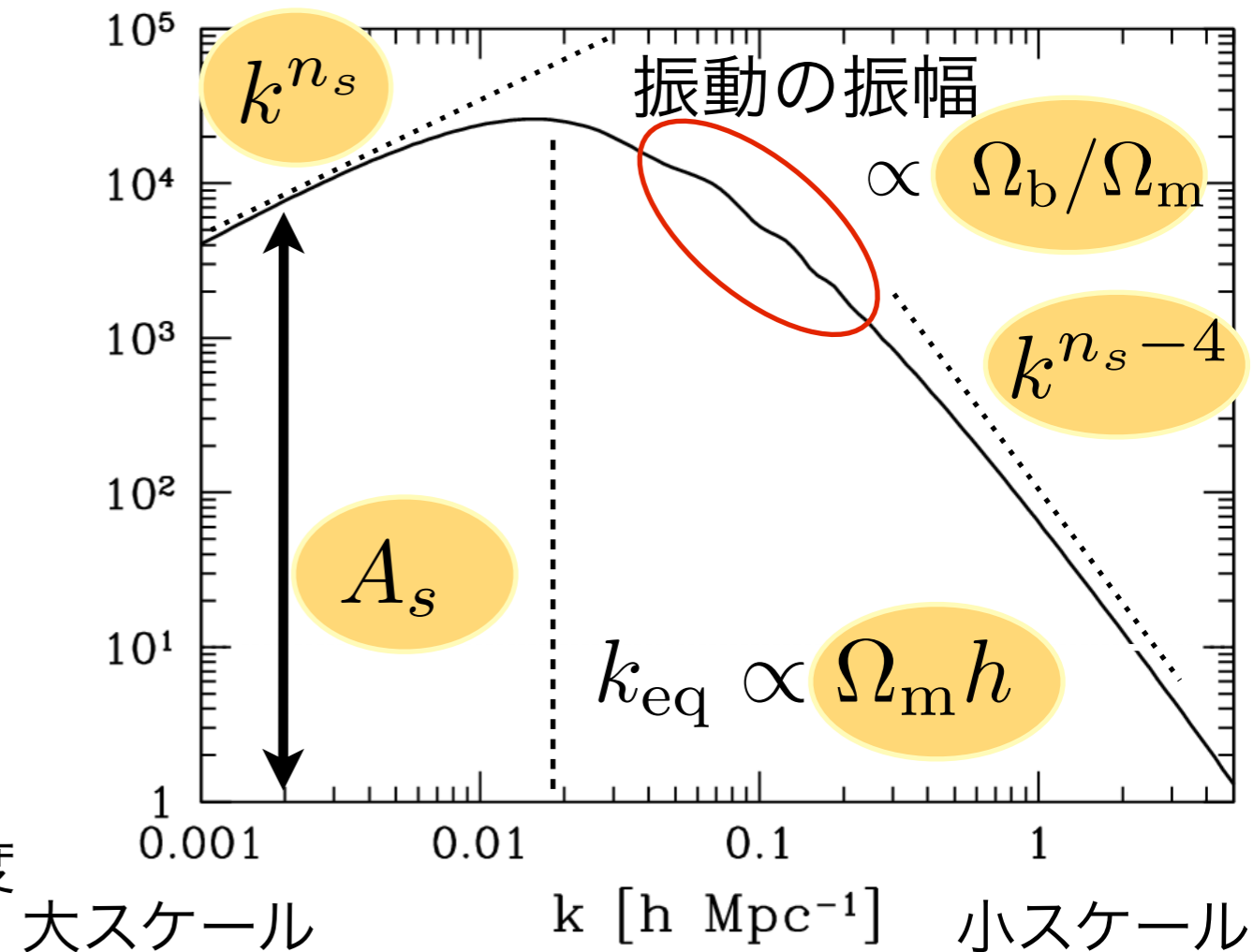
# 線形理論のもとづく予言

様々なパラメーターに依存している (宇宙論パラメーター)

温度ゆらぎの  
角度パワースペクトル



質量密度ゆらぎの  
パワースペクトル

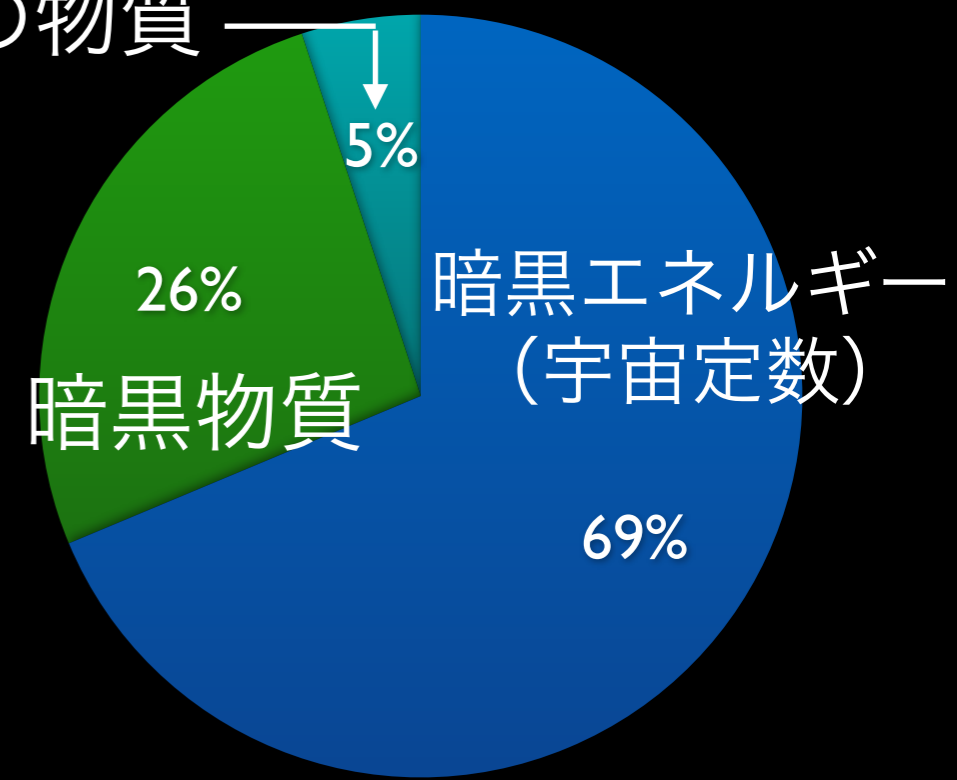


# 標準宇宙モデル

観測との比較を経て

宇宙論パラメーターが決定され、宇宙の成り立ち・進化に関する「標準モデル」が確立 →  $\Lambda$ CDM モデル

原子などの通常の物質  
(バリオン)



- 宇宙の物質・エネルギー組成が確定
- 宇宙がほぼ平坦
- 宇宙の年齢は138億年
- 原始密度ゆらぎの性質はインフレーション仮説を支持  
(スケール不変に近い断熱ゆらぎ)

# (冷たい) 暗黒物質

- 光も電波も出さない物質      未発見の素粒子が候補
- 通常物質とは重力を介してのみ相互作用する  
—————→ 銀河の回転曲線や重力レンズ現象
- 構造形成の観点から「冷たい」ことが要請  
(速度分散が小さい)

暗黒物質の存在自体は 1934年から  
すでに指摘

かみのけ座銀河団の質量の  
運動学的見積もり



F. Zwicky



# 暗黒エネルギー

- 負の圧力を伴う未知のエネルギー体  
(=斥力として働く)
- 宇宙を一様に覆い尽くしている (ようだ)

一般相対論で静的宇宙を実現するため、1917年に  
アインシュタインが導入した宇宙定数と似ている

実は不安定 → 加速膨張

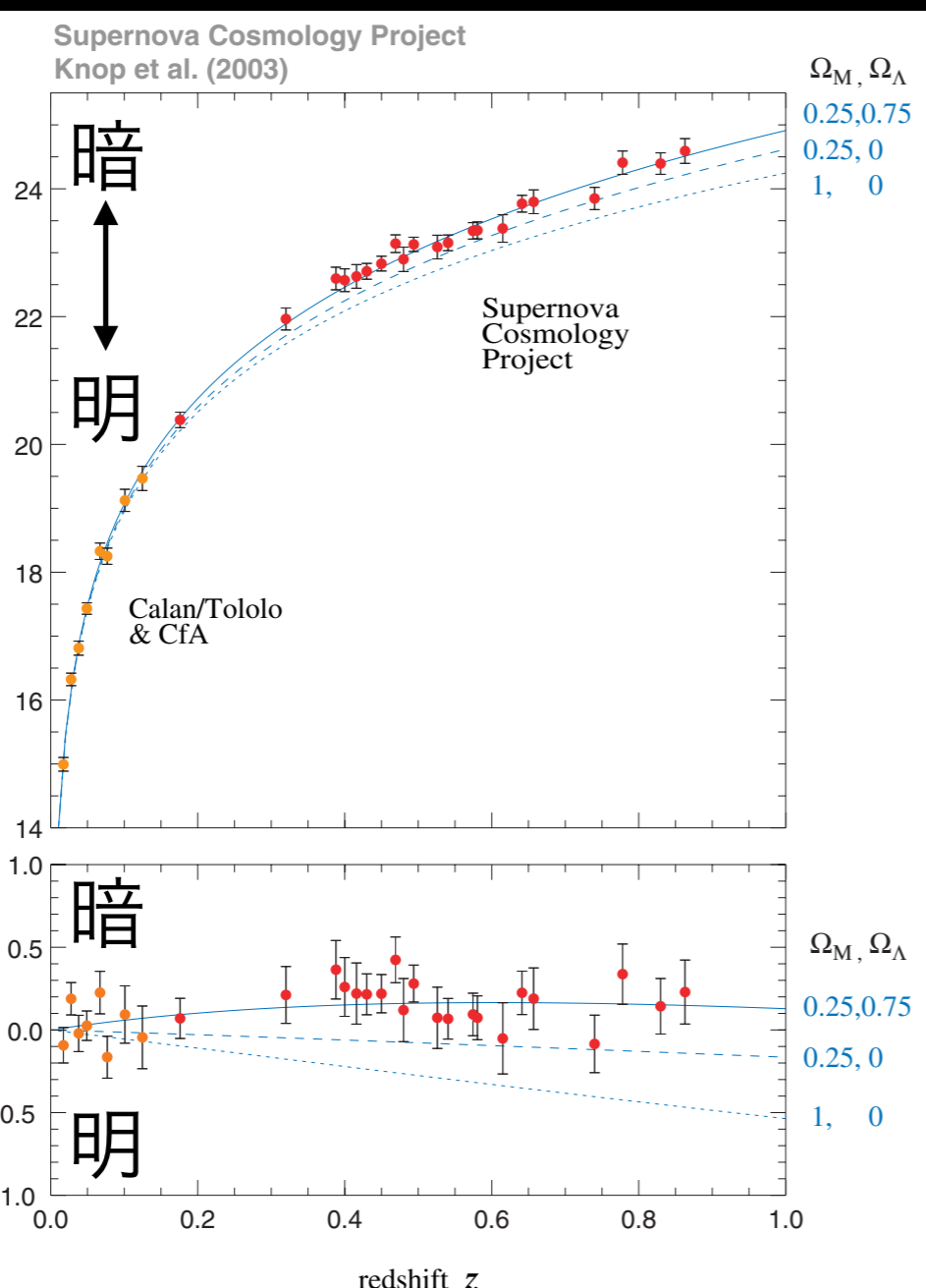




# Ia型超新星の観測

宇宙が加速膨張しているという事実は、Ia型超新星の光度曲線を標準光源として使った観測から得られていた

空っぽ宇宙から  
の明るさずれ  
見かけの明るさ



2011年ノーベル物理学賞

# 標準モデルを超える

研究の進展により謎が深まってしまった

ただし、加速膨張の性質自体、よくわかっていない  
(宇宙定数でいいのか?)

さらに、検証が必要な仮説・仮定:

- ✓ 宇宙は大域的に一様・等方
- ✓ 宇宙論スケールで一般相対論が成り立つ
- ✓ ニュートリノの質量はゼロ
- ✓ 原始ゆらぎはガウス統計に従う

今後の大規模構造の観測から

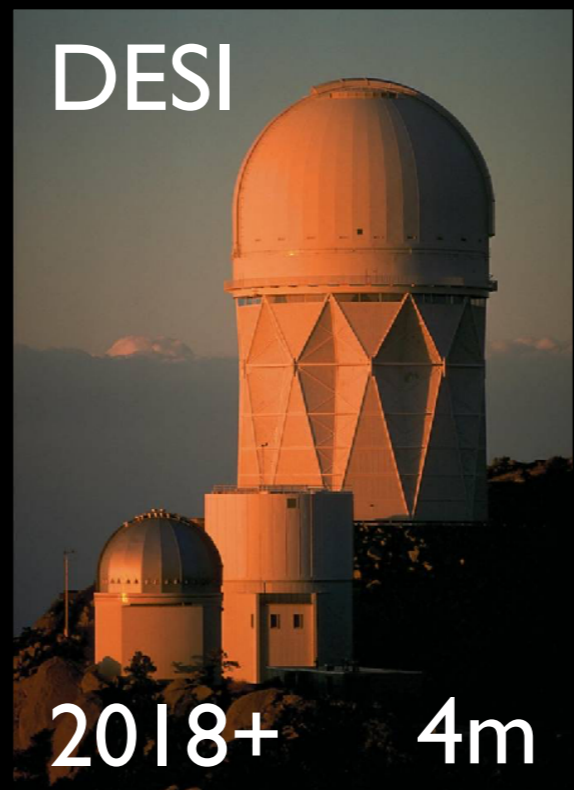
$\Lambda$ CDMモデルからのずれを突き止める

# 世界規模で進む大規模銀河サーベイ



extended **B**aryon **O**scillation  
**S**pectroscopic **S**urvey

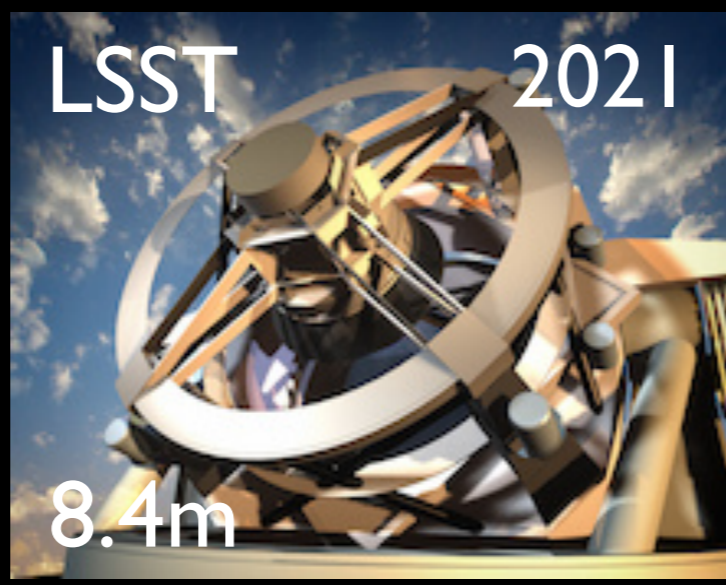
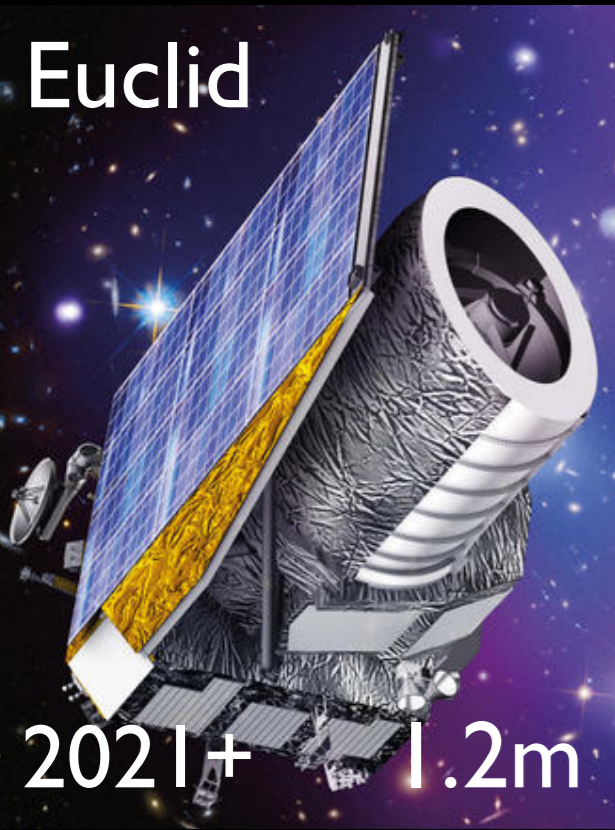
**D**ark **E**nergy  
**S**pectroscopic **I**nstrument



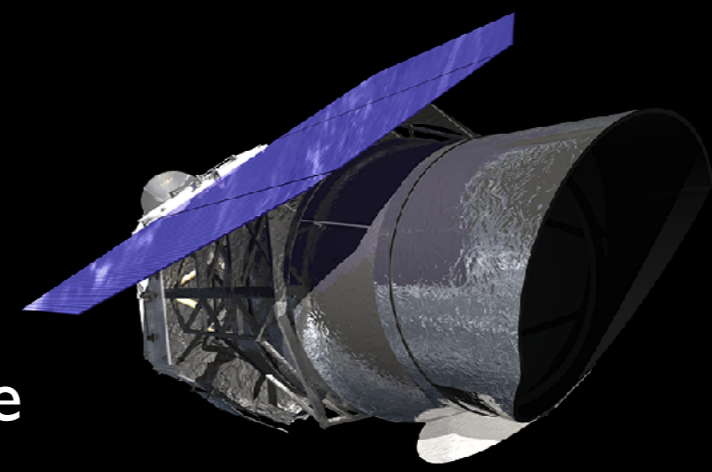
**D**ark **E**nergy **S**urvey



**H**obby-**E**berly **T**elescope **D**ark  
**E**nergy **E**Xperiment



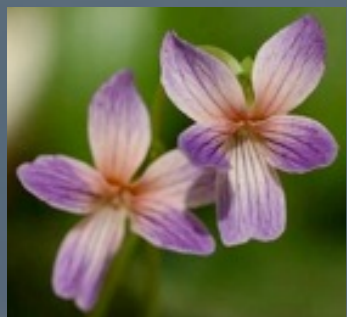
**L**arge **S**ynoptic **S**urvey **T**elescope



**W**ide **F**ield **I**nfra**R**ed **S**urvey **T**elescope

# すばる望遠鏡による宇宙論観測

(口径8.2m)



## SuMIRe 2014~

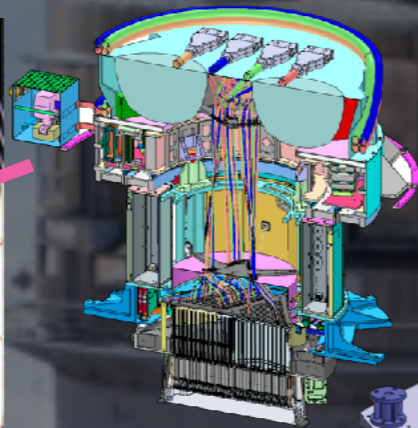
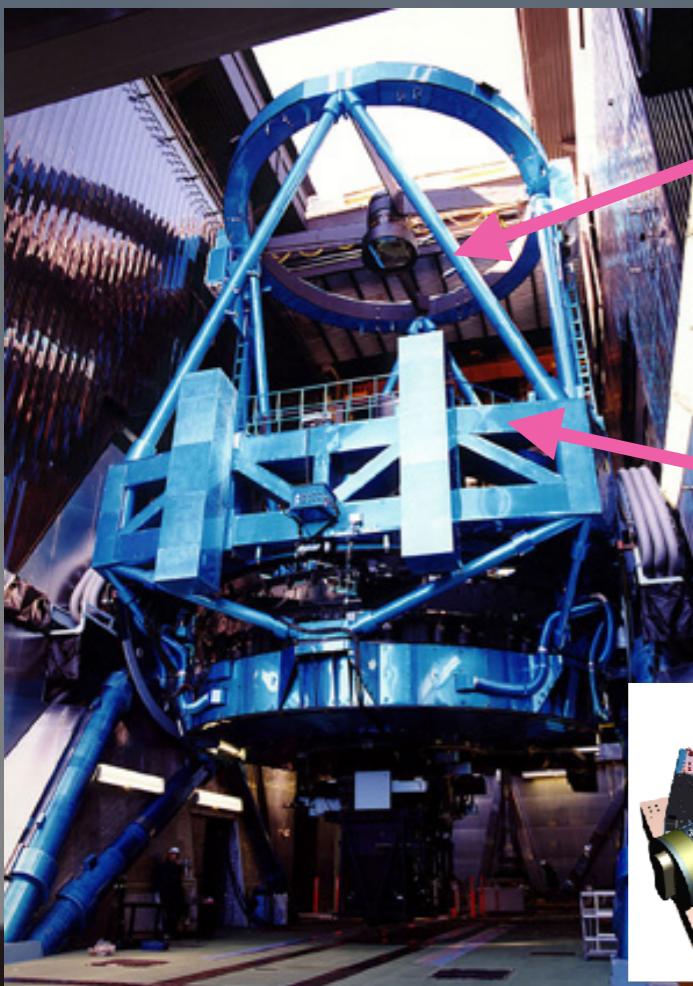
Subaru **M**easurements of **I**maging and **R**edshifts

### Prime Focus Spectrograph

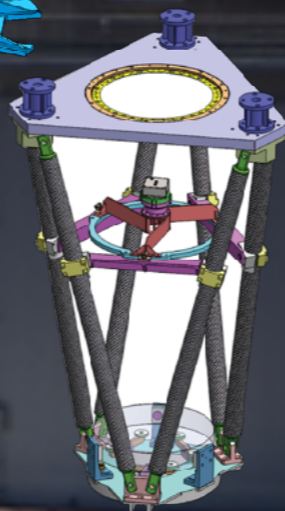
(超広視野多天体分光器)

### HyperSuprime-Cam

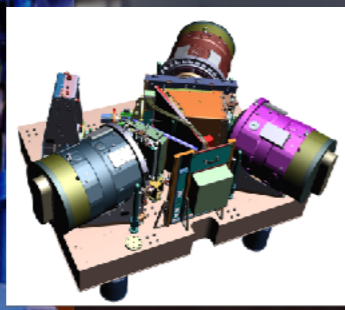
(超広視野カメラ)



ファイバー  
システム



メトロロジ  
カメラ



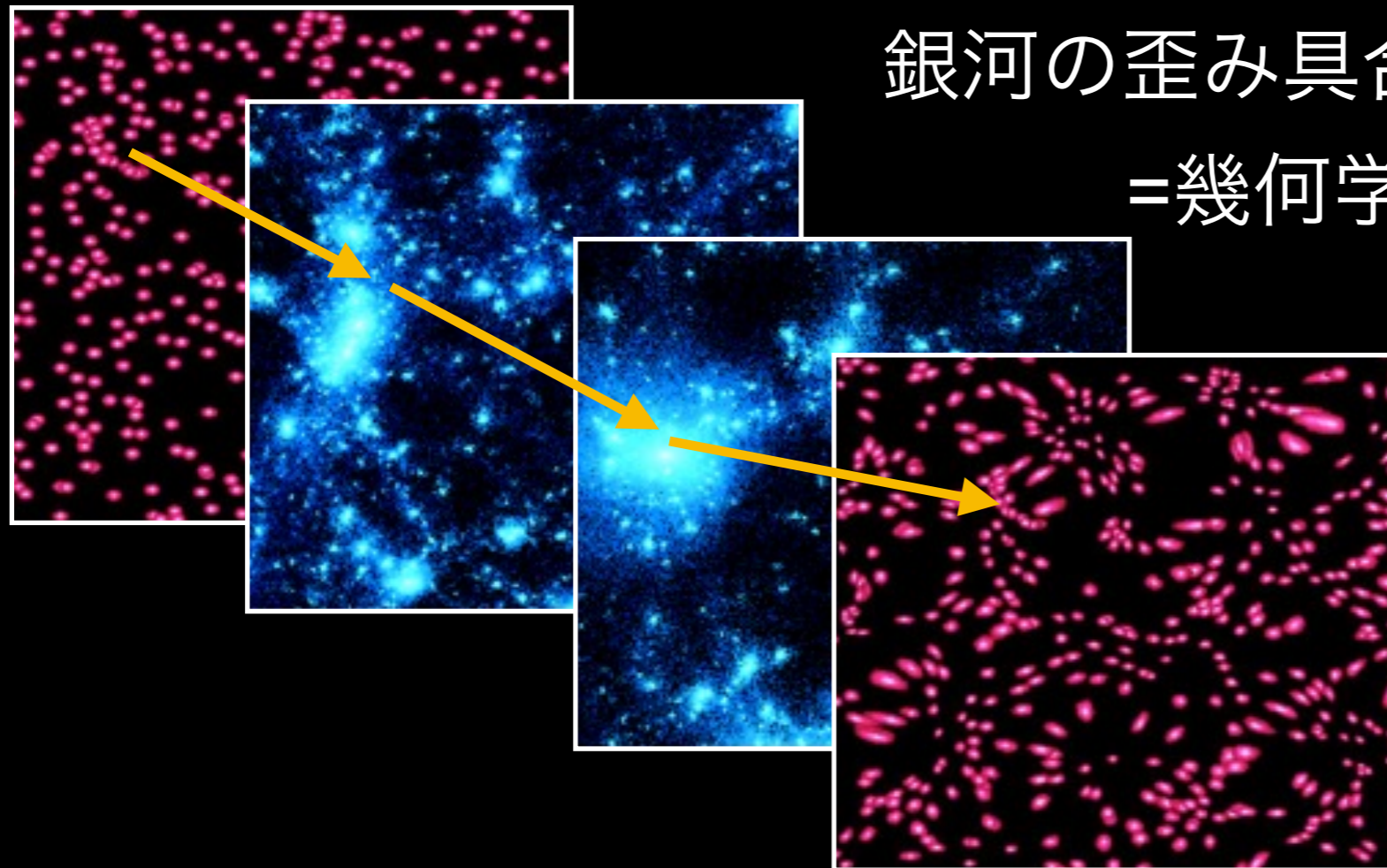
分光器



# (弱い) 重力レンズ効果

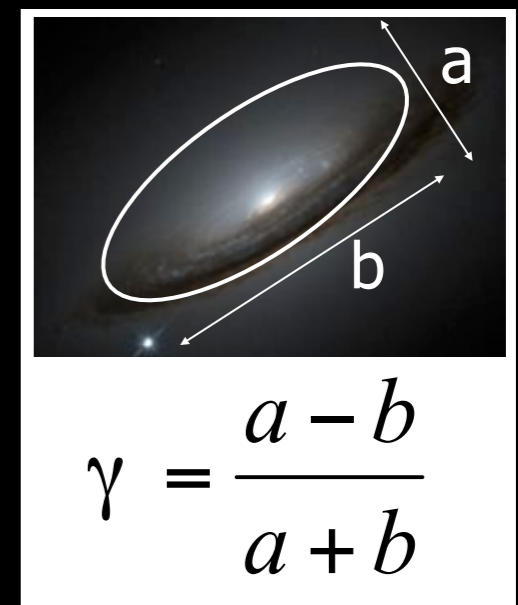
コスミックシア

手前に存在する暗黒物質の質量分布により遠方の背景銀河のイメージが歪む現象



銀河の歪み具合 (楕円率)

=幾何学的重み × 密度ゆらぎの振幅

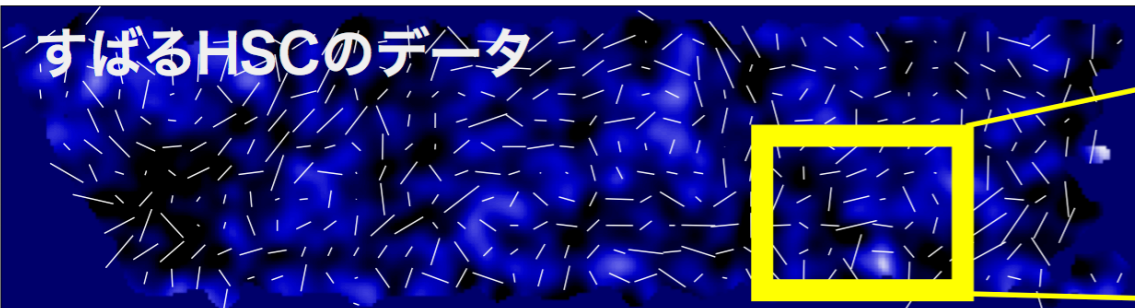
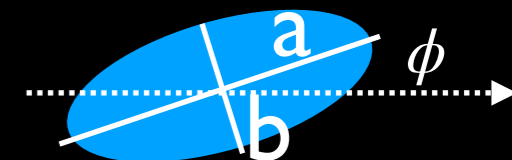


イメージの歪みの空間相関から宇宙論的情報を引き出せる

# Subaru HSC 1 year result

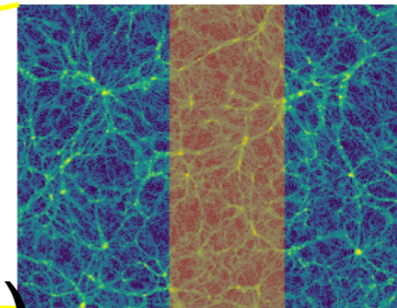
Ellipticity of each object :

$$e = (e_1, e_2) = \frac{1 - (b/a)^2}{1 + (b/a)^2} (\cos 2\phi, \sin 2\phi)$$

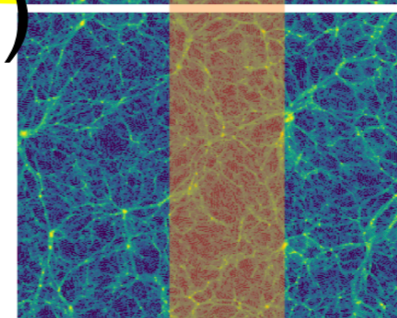


シミュレーション

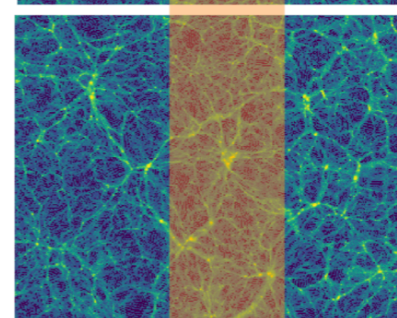
約60億年前  
(z=0.625)



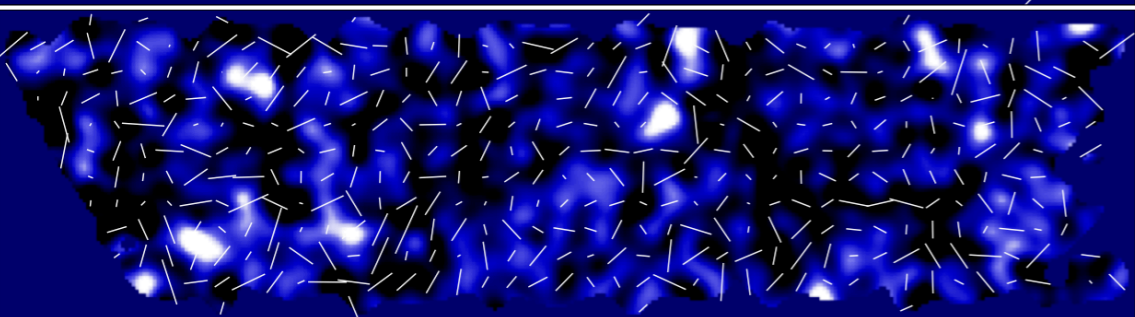
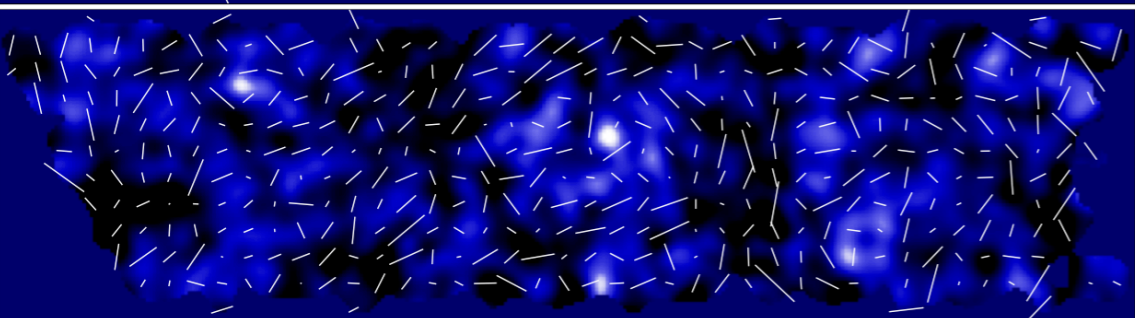
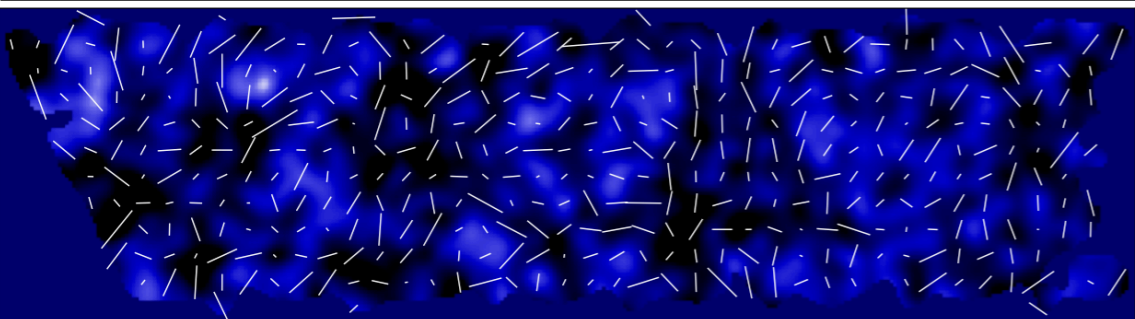
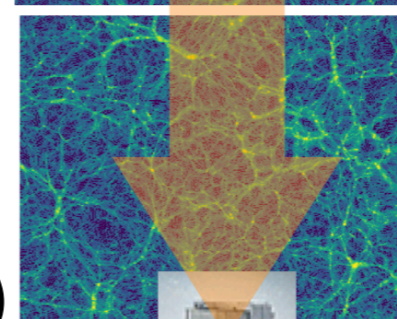
約50億年前



約40億年前



約30億年前  
(z=0.25)



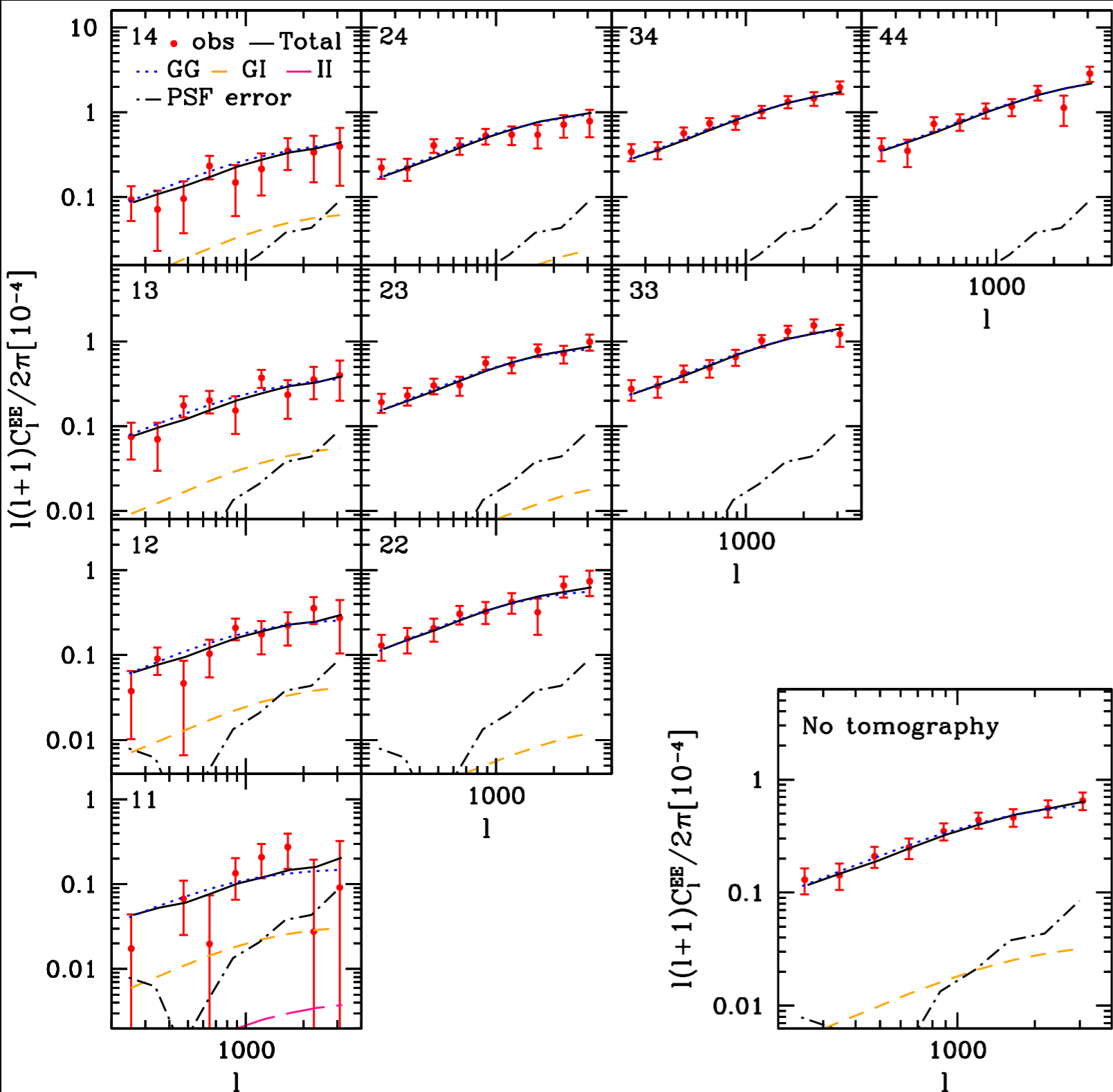
測光赤方偏移の  
情報を使って、  
異なる時刻の重力  
レンズ効果を測定

(クレジット : HSC Project/東京大学)

すばる望遠鏡



# 重力レンズトモグラフィ

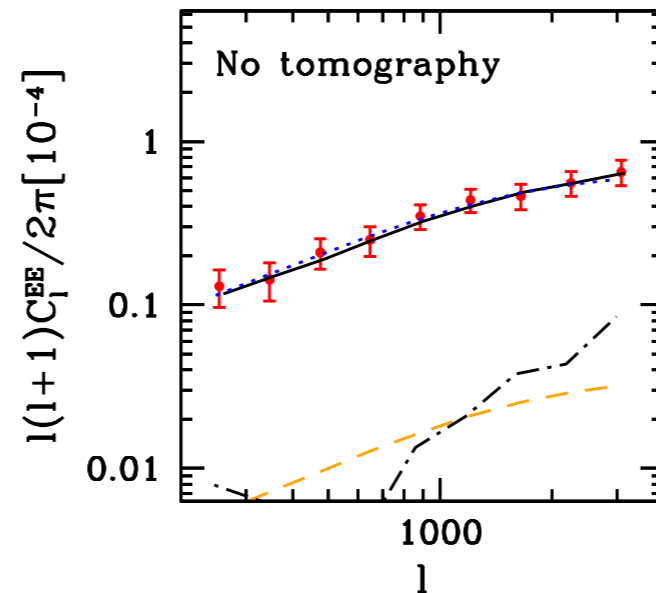


Multipole ( $\ell \sim \pi/\theta$ )

Multipole

| bin number | $z$ range | $z_{\text{med}}$ | $N_g$   | $n_g$ [arcmin $^{-2}$ ] |
|------------|-----------|------------------|---------|-------------------------|
| 1          | 0.3 – 0.6 | 0.446            | 2842635 | 5.9                     |
| 2          | 0.6 – 0.9 | 0.724            | 2848777 | 5.9                     |
| 3          | 0.9 – 1.2 | 1.010            | 2103995 | 4.3                     |
| 4          | 1.2 – 1.5 | 1.300            | 1185335 | 2.4                     |
| All        | 0.3 – 1.5 | 0.809            | 8980742 | 18.5                    |

異なる赤方偏移間の相関から、ゆらぎの構造進化と宇宙膨張を制限



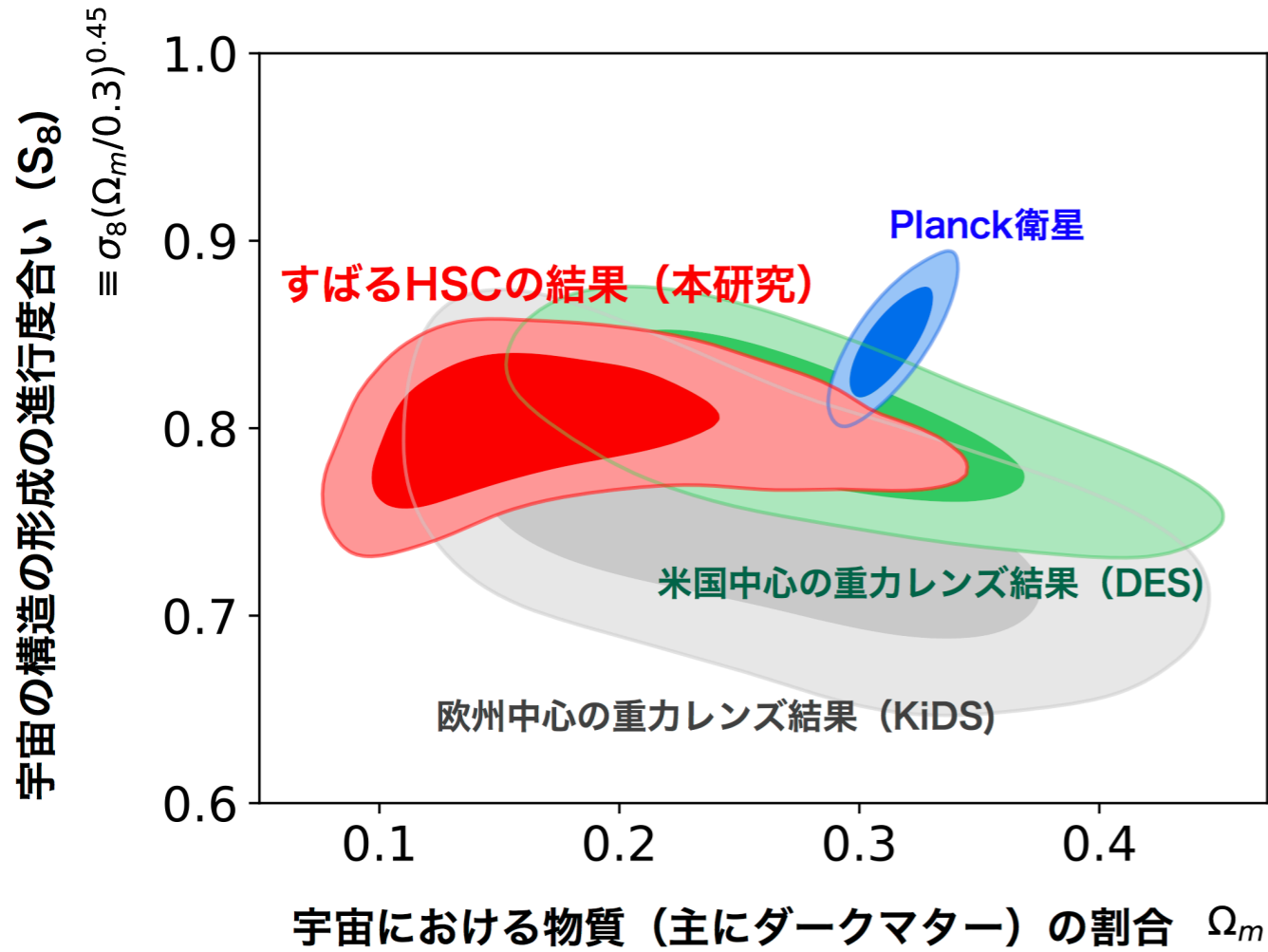
$$C_\ell = \frac{1}{2\ell + 1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} |e_{\ell m}|^2$$

$$\left( e(\vec{\theta}) = \sum_{\ell, m} e_{\ell m} Y_{\ell m}(\vec{\theta}) \right)$$

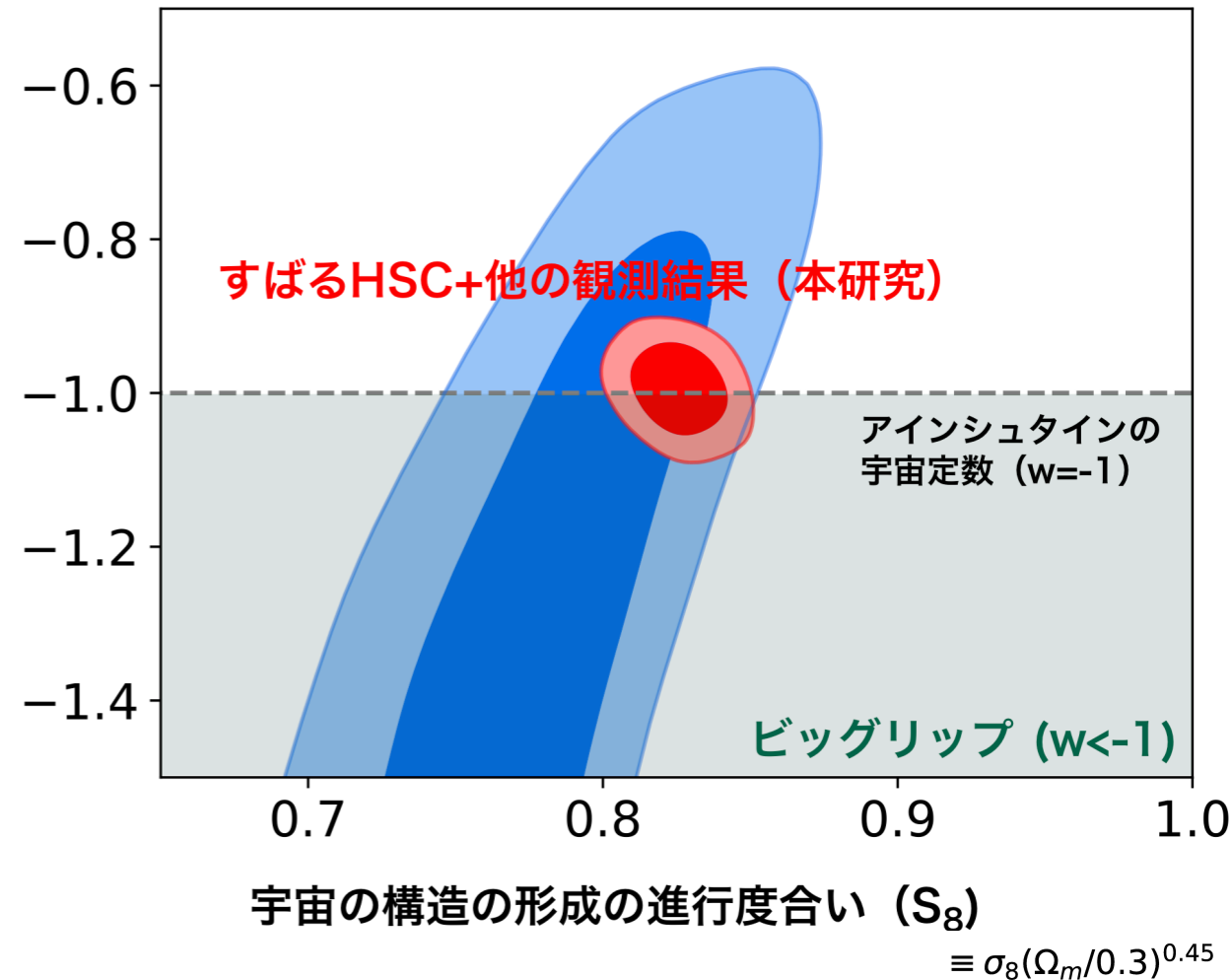
Hikage et al. (arXiv:1809.09)



# 宇宙論的制限



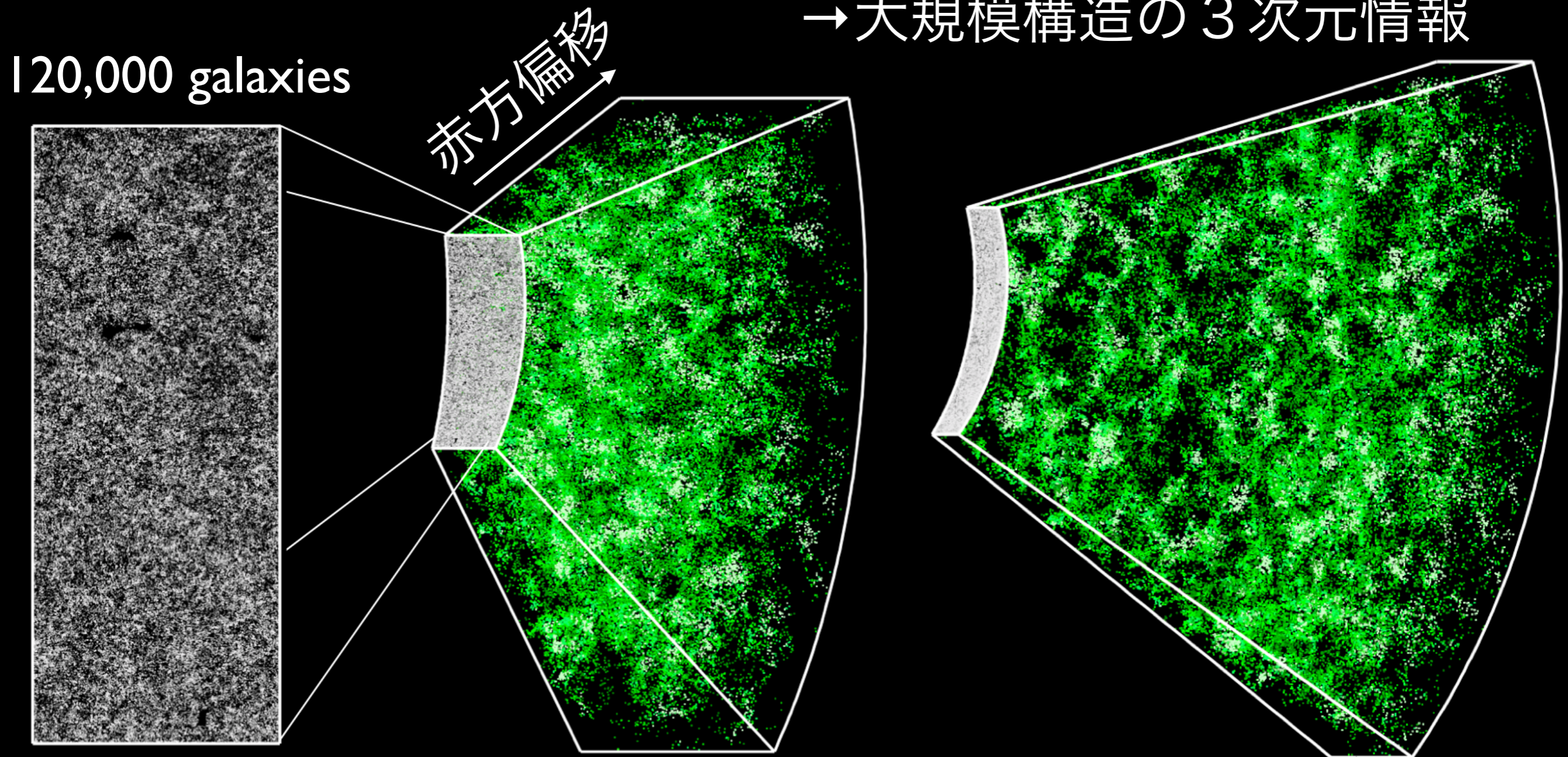
ダークエネルギーのパラメータ:  $w$



# 銀河赤方偏移サーベイ

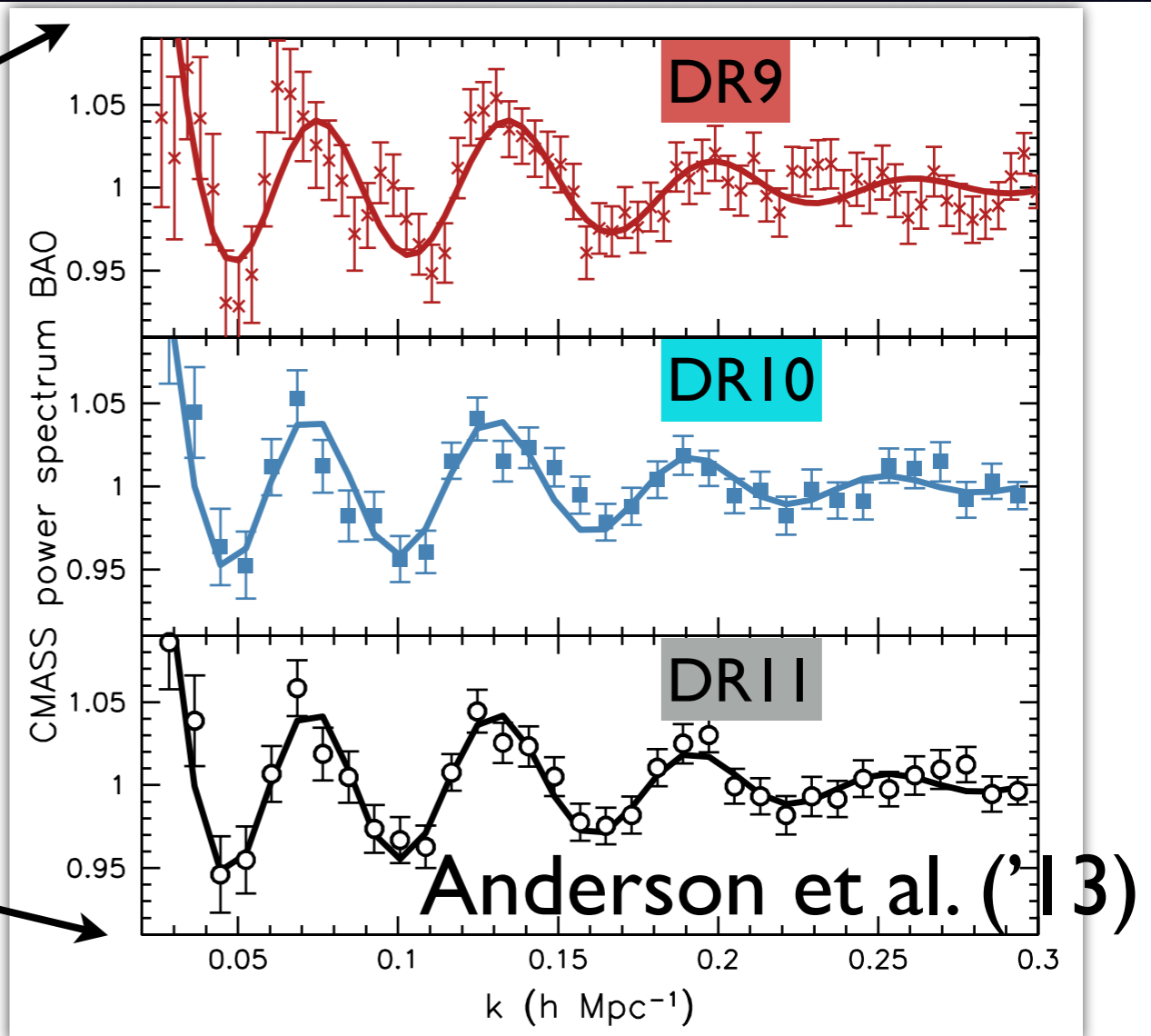
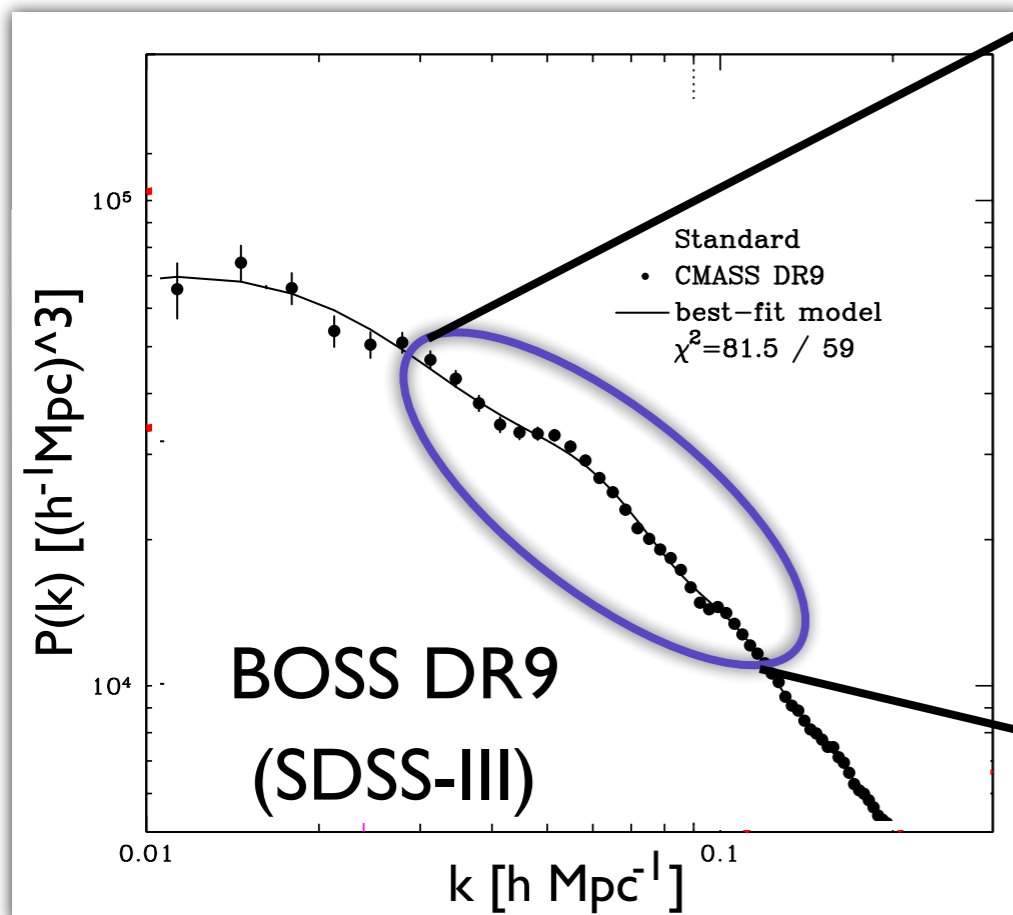
赤方偏移を使うと奥行き情報が得られる

→大規模構造の3次元情報



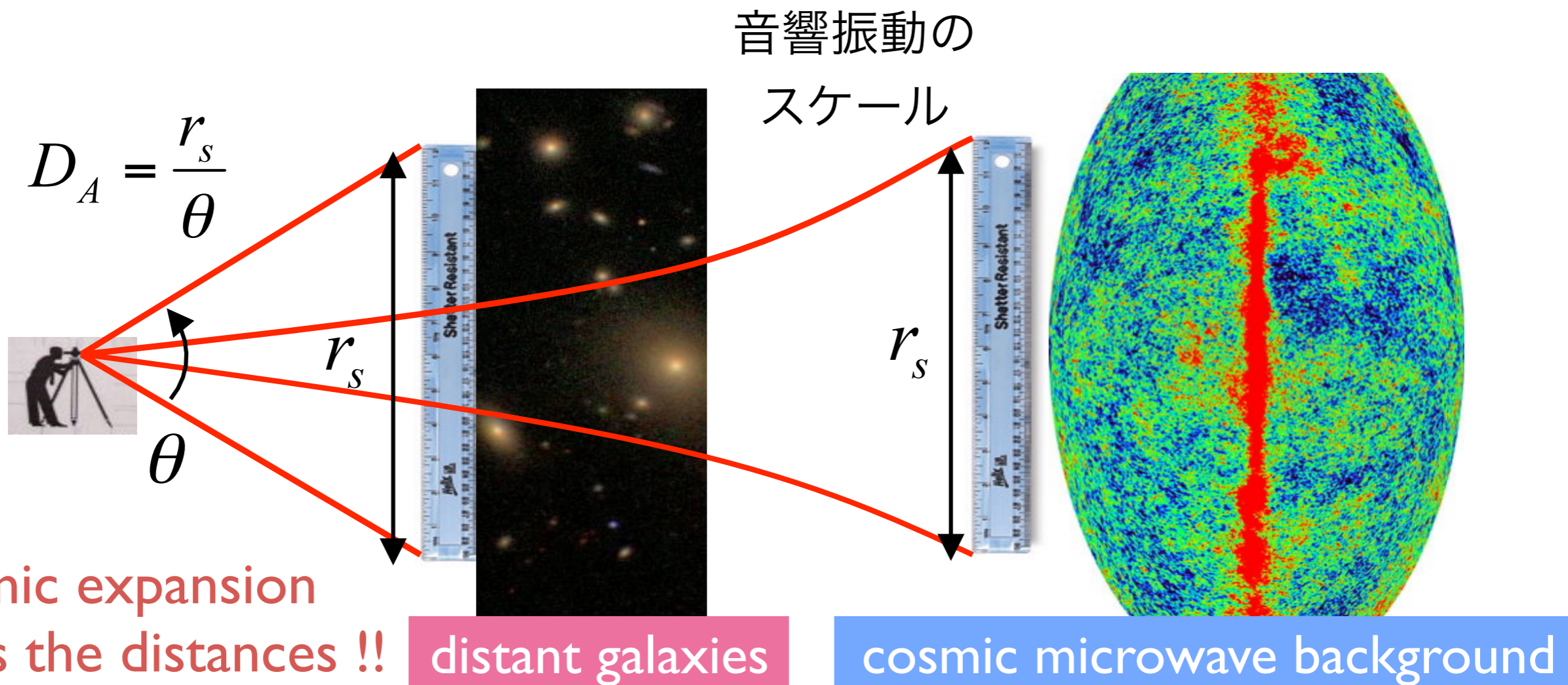
# バリオン音響振動 (BAO)

- 原始バリオン-光子流体の音響振動スケール ( $\sim 150\text{Mpc}$ )  
( $\Leftrightarrow$  CMBの音響ピークのスケール)
- 標準ものさしとして遠方銀河までの距離測定に使える  
(理論プライヤー)  $\rightarrow$  加速膨張のプローブ



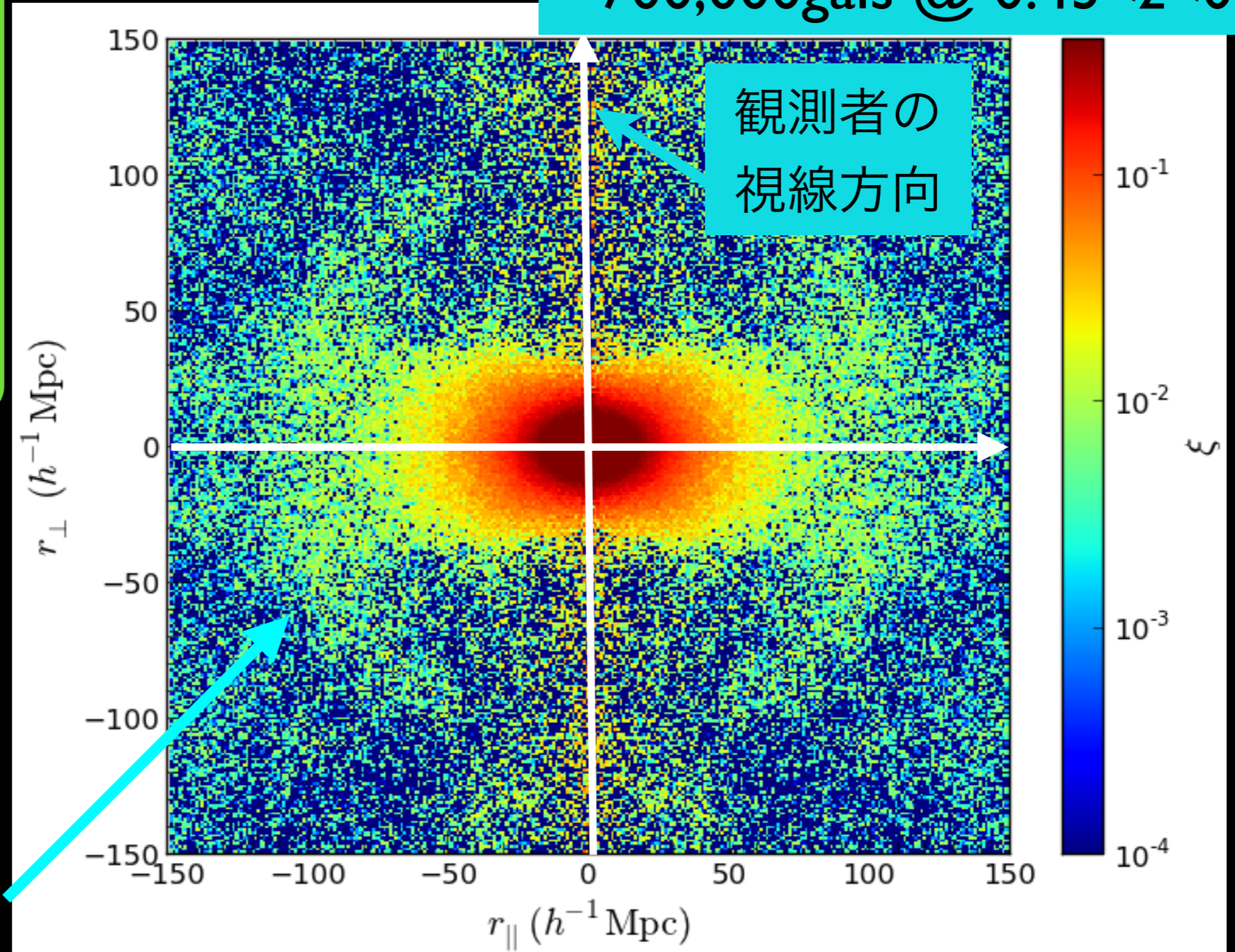
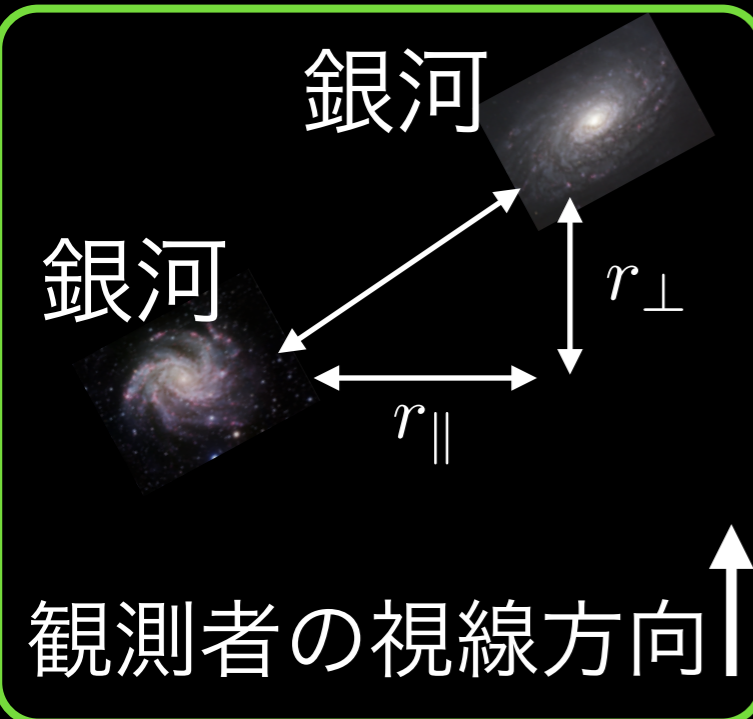
# バリオン音響振動 (BAO)

- 原始バリオン-光子流体の音響振動スケール (~150Mpc)  
( $\Leftrightarrow$  CMBの音響ピークのスケール)
- 標準ものさしとして遠方銀河までの距離測定に使える  
(理論プライヤー)  $\rightarrow$  加速膨張のプローブ



# 赤方偏移空間ゆがみ

BOSS DR11, CMASS samples  
700,000gals @  $0.43 < z < 0.7$



バリオン音響  
ピーク (尾根)

# 重力理論のプロローブ

カイザー  
公式

(Kaiser '87)

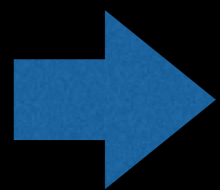
$$\delta^{(S)}(\mathbf{k}) = (1 + f \mu_k^2) \delta(\mathbf{k}) ; \quad f \equiv \frac{d \ln D_+}{d \ln a}$$

線形成長因子  
スケール因子

重力由来のゆらぎの成長を表すパラメーター

(赤方偏移と) 重力理論に応じて  $f$  の値は変わりうる

カイザー公式は重力理論にかかわらず成り立つ



宇宙論的スケールで相対論のテストに使える

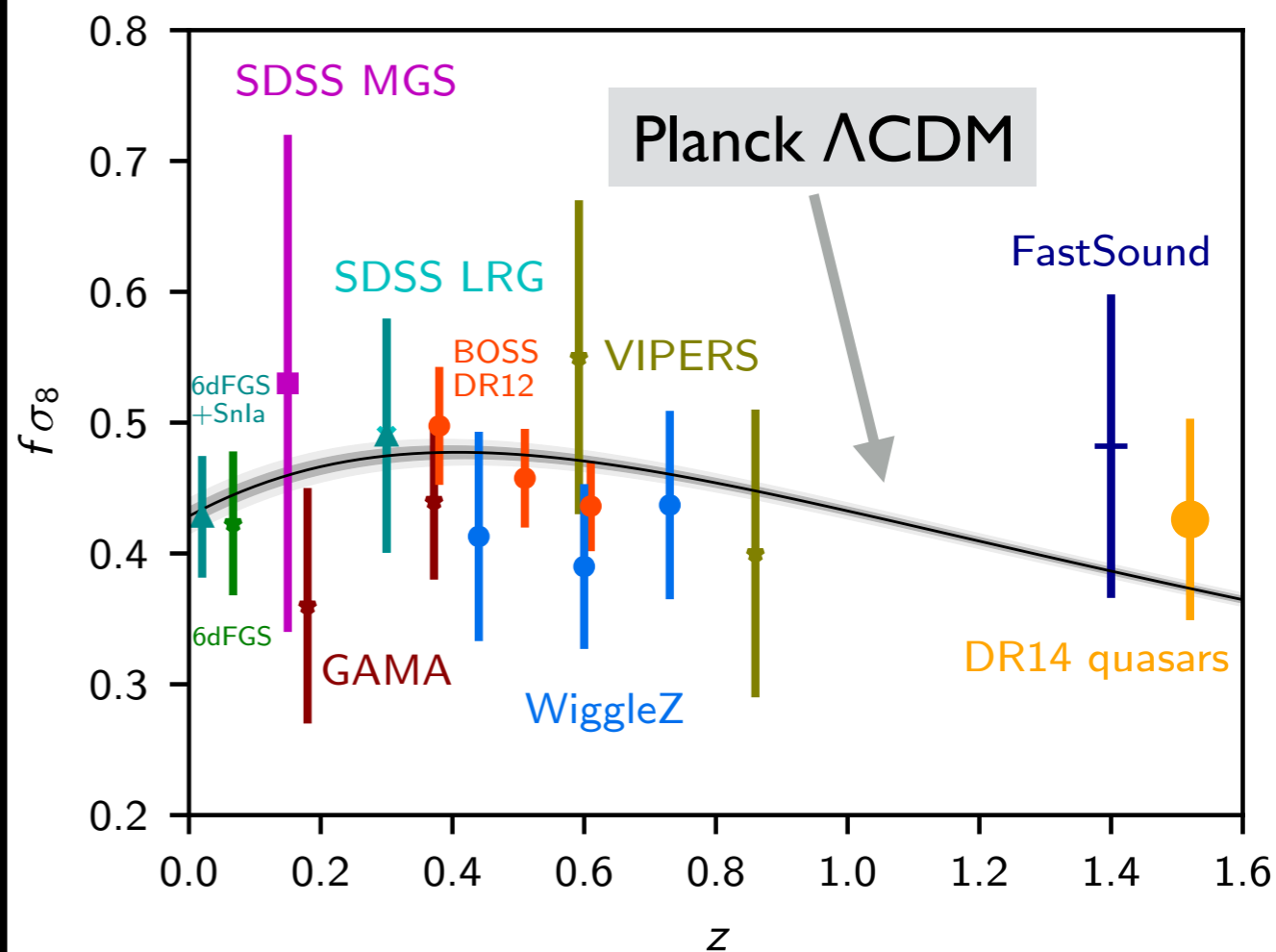
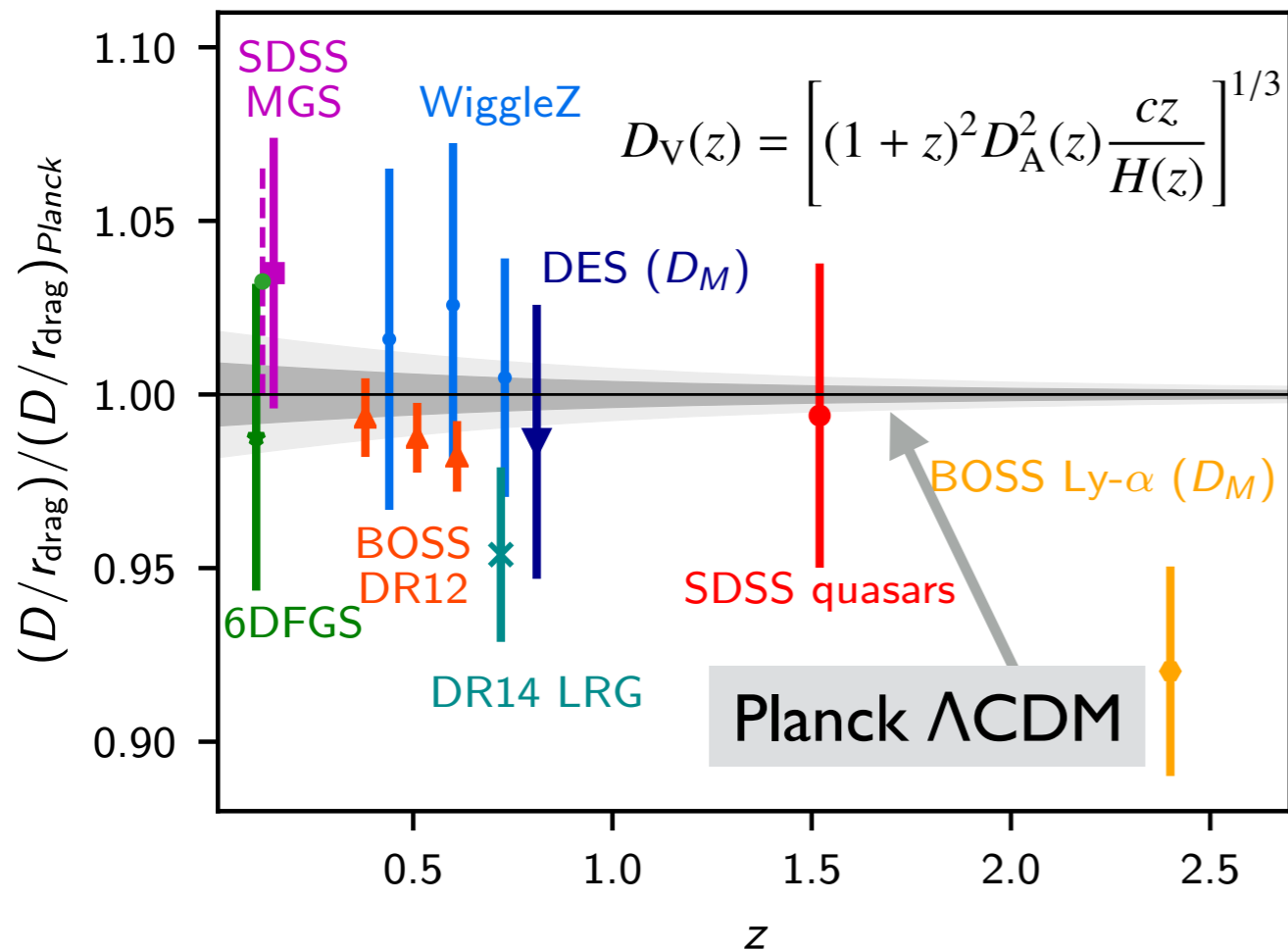
加速膨張の起源を探るヒントにもなる

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

# 銀河サーベイからの制限

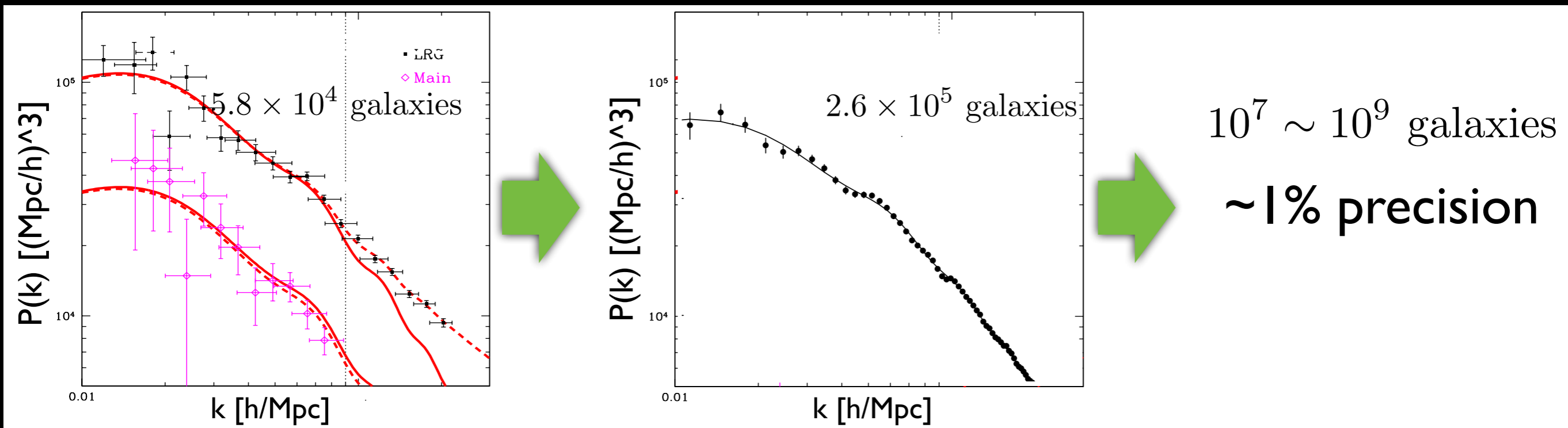
バリオン音響振動による  
宇宙論的距離の測定

赤方偏移空間ゆがみによる  
構造成長率の測定



# 精密科学化する宇宙論

大規模かつ質の高い観測データからこれまで以上の統計精度で  
大規模構造の様子が幅広い赤方偏移でわかる (→ 精密宇宙論)



- 観測と比較するための理論の精度向上  
(観測由来の系統的効果も含めて)  
(非ガウス性が発達した)
- 観測量から有意な情報を取り出す方法論の開発

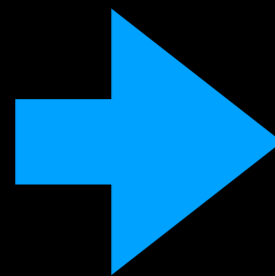
理論的  
課題



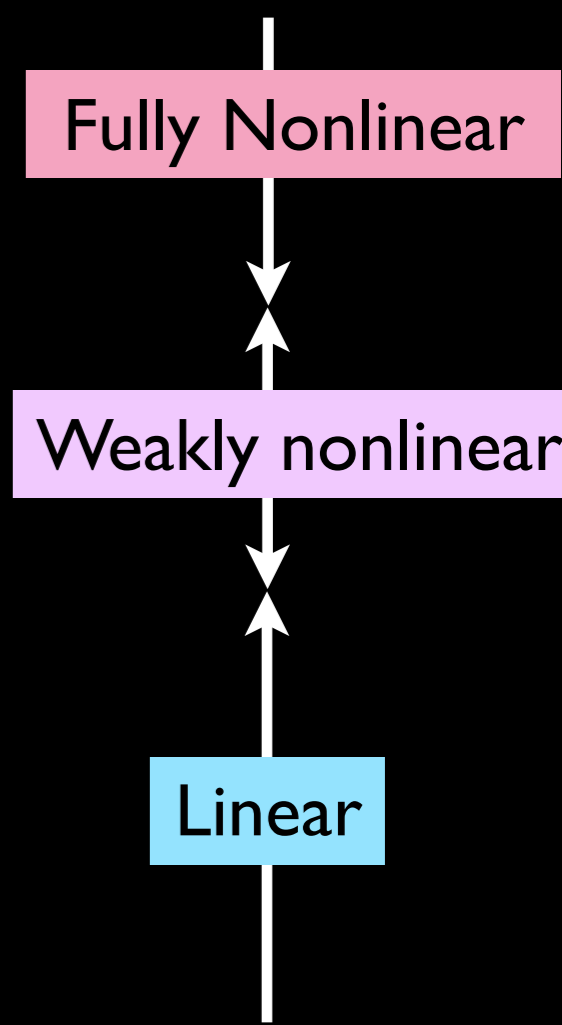
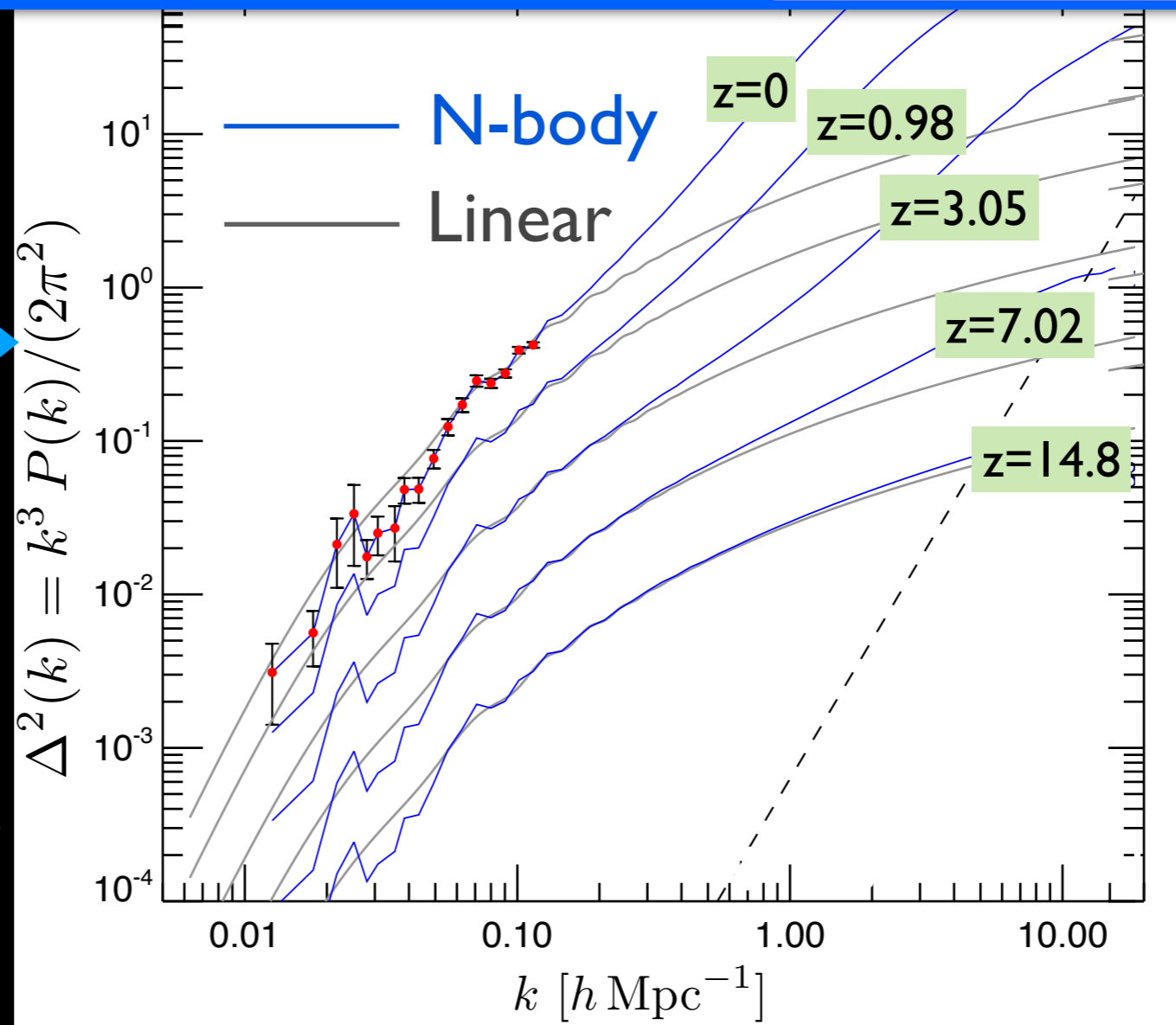
# パワースペクトルの非線形進化

$$\delta(\vec{x}) \equiv \frac{\delta\rho_m(\vec{x})}{\bar{\rho}_m} = \frac{1}{\sqrt{V}} \sum_{\vec{k}} \delta(\vec{k}) e^{i\vec{k}\cdot\vec{x}} \quad \longrightarrow \quad P(k) = \frac{1}{N_k} \sum_{|\vec{k}|=k} |\delta(\vec{k})|^2$$

重力非線形  
性の影響



- この他にも
- 銀河バイアス
  - 赤方偏移空間歪み
  - など



どこまで正確に大規模構造の統計的性質を定量化できるか？

# 講義の内容

構造形成の理論を通して、宇宙論のプローブとしての宇宙の大規模構造の成り立ち・進化を理解する

- 1・オーバービュー
- 2・フリードマン宇宙モデル
- 3・構造形成の線形理論
- 4・非一様宇宙の観測
- 5・非線形構造形成

# 講義ノートと資料など

以下のサイトを参照

[http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~atsushi.taruya/Lecture2019\\_Tohoku/index.html](http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~atsushi.taruya/Lecture2019_Tohoku/index.html)

## 「暗黒物質優勢宇宙における構造形成（宇宙論）」

日時: 2019年 2月12日（火）～14日（木）

場所: 東北大学天文学教室

講義ノート: [PDF](#)

### 講義の内容と補足資料

オーバービュー:

フリードマン宇宙モデル

構造形成の線形理論

非一様宇宙の観測:

非線形構造形成:

セミナー:

レポート課題: [PDF](#)