

2018年6月13-15日

立教大学理学研究科物理学専攻

現代物理学特別講義 2

暗黒物質宇宙における構造形成 と観測的宇宙論

樽家篤史

Atsushi Taruya

(京都大学 基礎物理学研究所)

(Kyoto Univ. Yukawa Institute for Theoretical Physics)

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

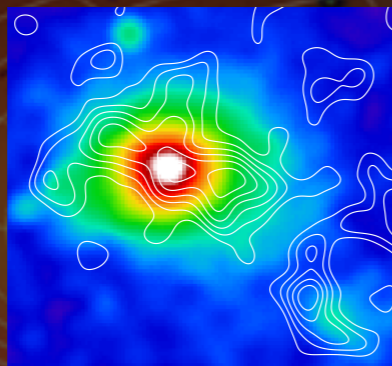
宇宙論の観測対象

観測対象：宇宙膨張、ゆらぎの進化の情報を担う天体（現象）

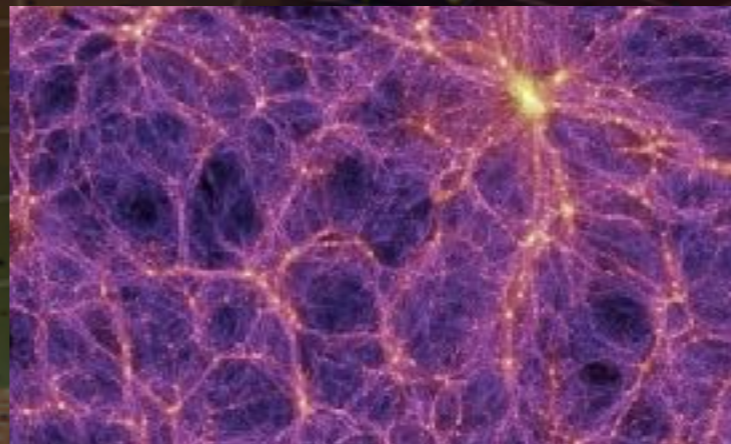
銀河



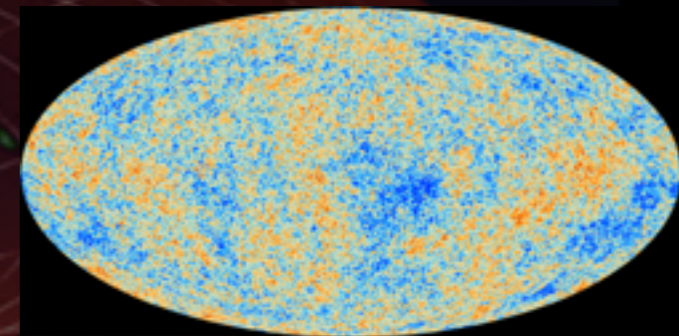
銀河団



銀河のクラスターリング
(クェーサー)

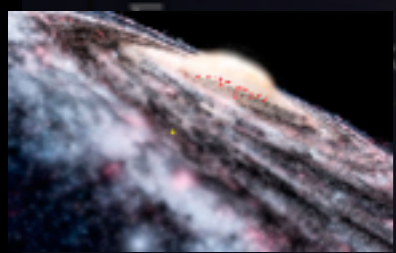


CMB

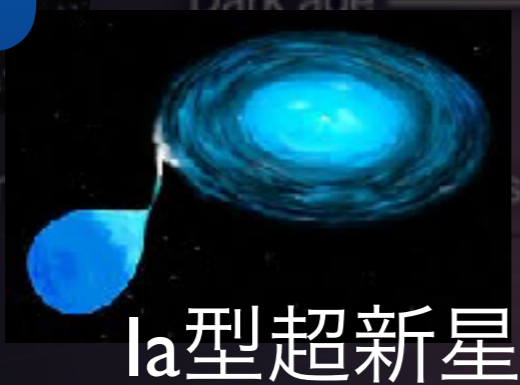


小スケール
(~kpc)

大スケール
(~Gpc)

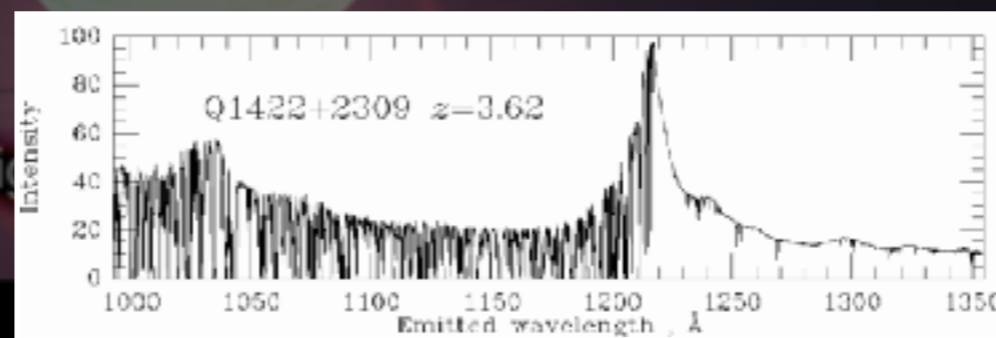


セファイド変光星



Ia型超新星

ライマン α の森



宇宙の大規模構造

数ギガパーセクに渡って広がる質量分布の空間非一様性

≡ 3×10^9 光年 (天の川銀河のサイズは ~40キロパーセク)

- 質量分布の階層的構造：

銀河 \subset 銀河群・銀河団 \subset 超銀河団

- 豊富な宇宙論的情報を含む

原始密度ゆらぎ

構造の形成

宇宙膨張のダイナミクス

- 代表的な観測手段：銀河赤方偏移サーベイ

(他のプローブ：重力レンズ、ライマン α の森, etc.)

大規模構造を観測する

望遠鏡を占有して銀河の地図を作成



8.2m

Very Large Telescope (Chile)



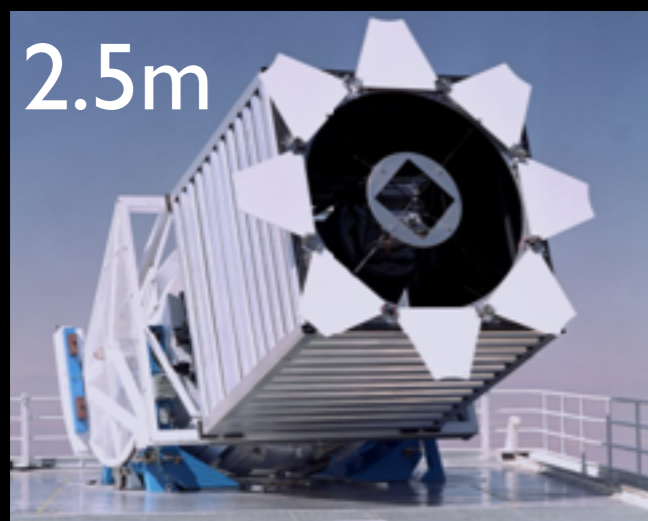
8.2m

Subaru Telescope (Hawaii)



3.6m

Canada-France-Hawaii Telescope (Hawaii)



2.5m

Sloan Digital Sky Survey @ APO (New Mexico)



4m

Blanco telescope @ CTIO (Chile)

https://en.wikipedia.org/wiki/Very_Large_Telescope
<http://www.sdss.org/instruments/>
<http://subarutelescope.org/Information/Download/DImage/index.html>
<http://www.cfht.hawaii.edu/en/news/CFHT30/#wallpaper>
<http://www.darkenergysurvey.org/DECam/index.shtml>

赤方偏移

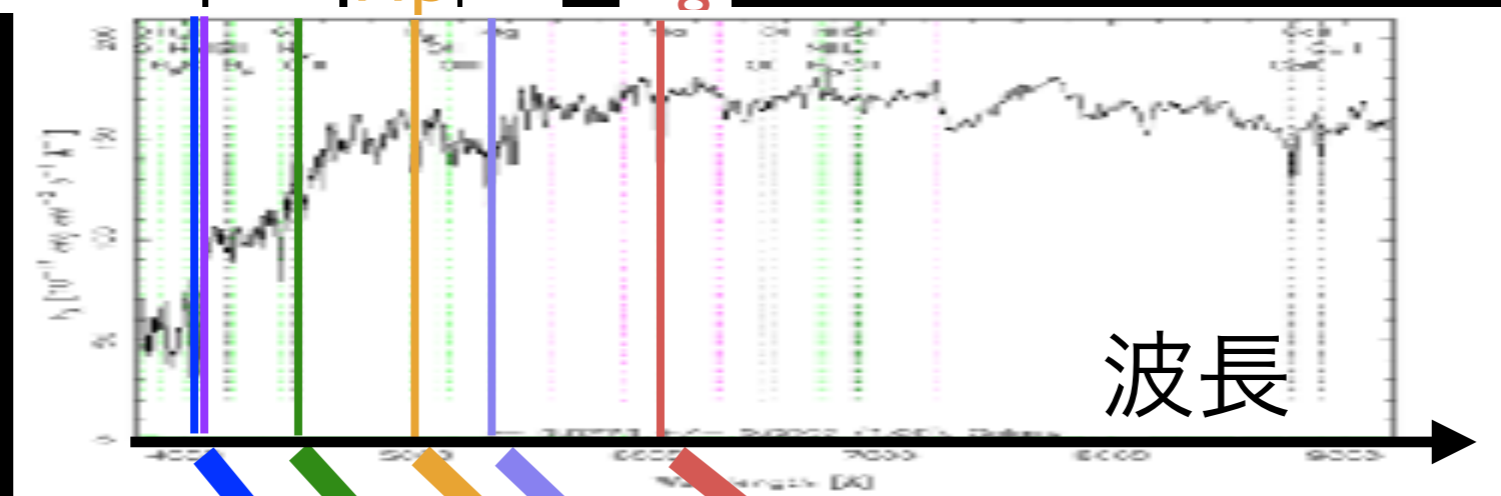
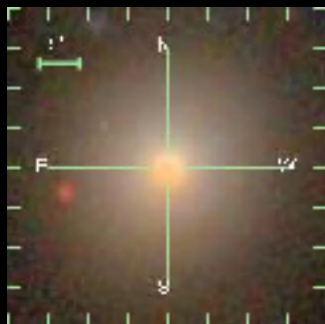
大規模構造の3次元構造を知る手がかり

宇宙膨張により

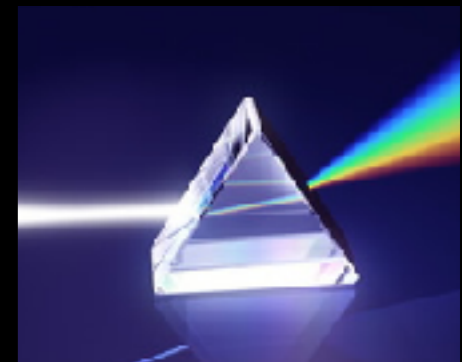
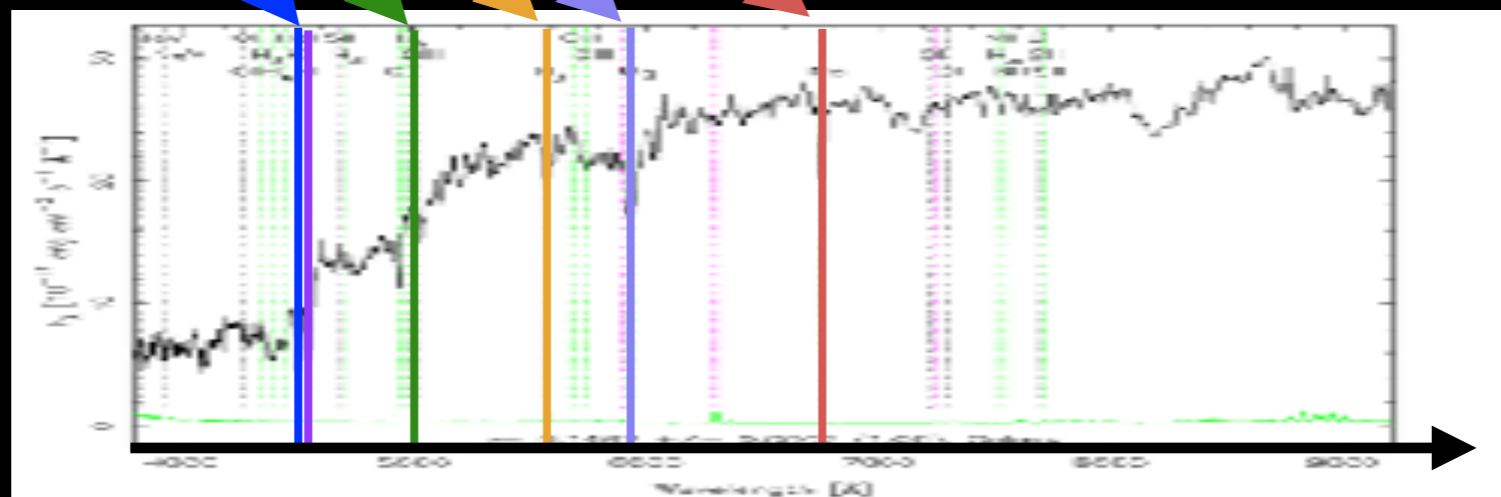
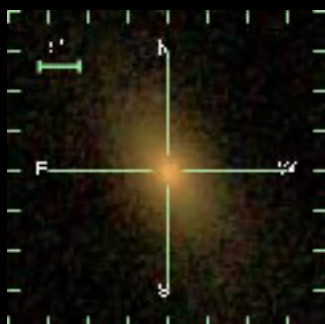
遠方の銀河は近傍銀河に比べて「赤く」見える

Ca H & K OIII H β Na Mg

近傍銀河



遠方銀河



赤方偏移

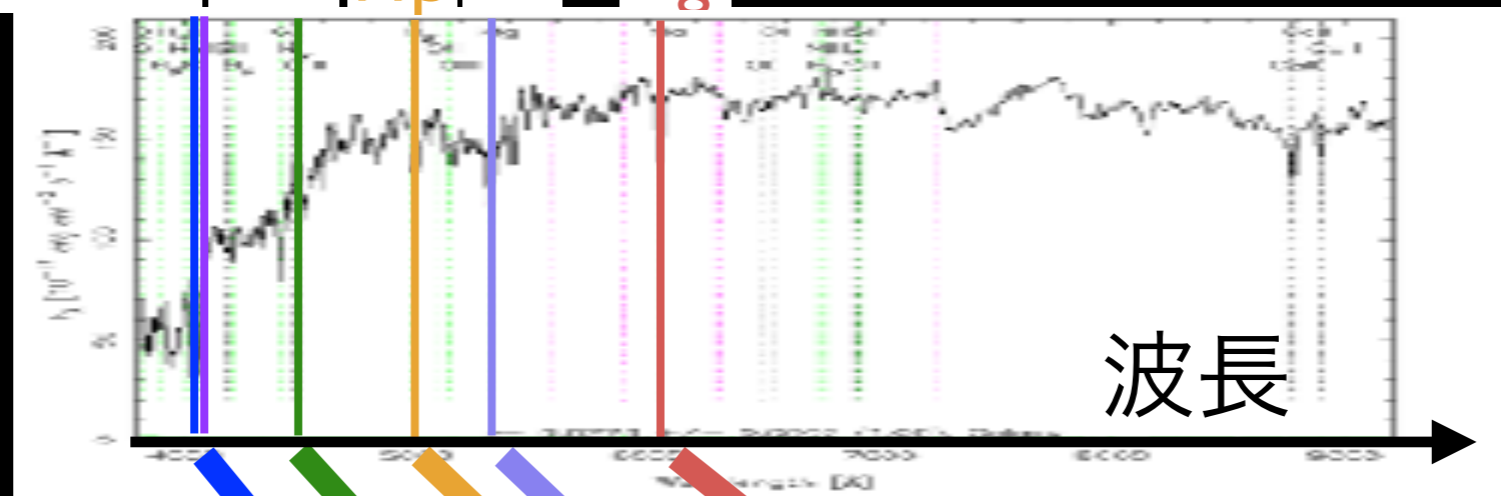
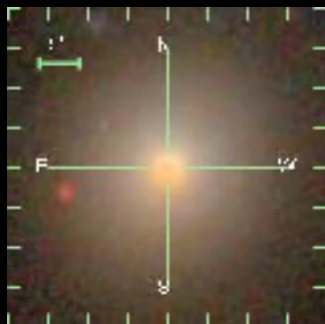
大規模構造の3次元構造を知る手がかり

宇宙膨張により

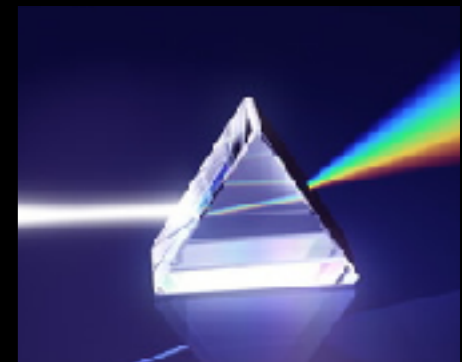
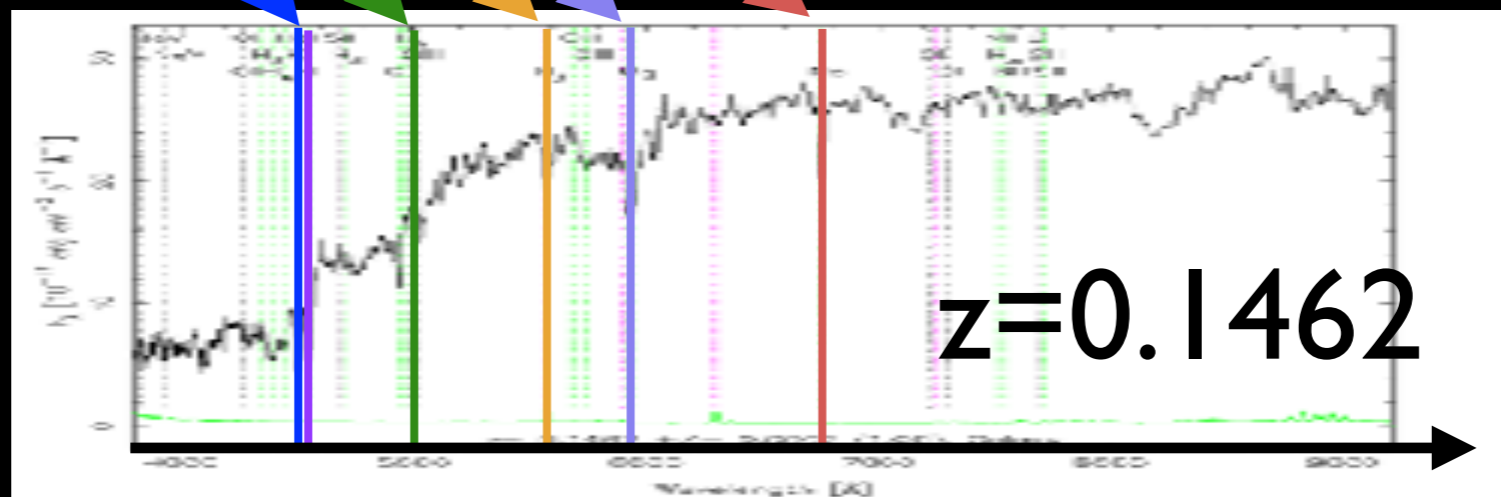
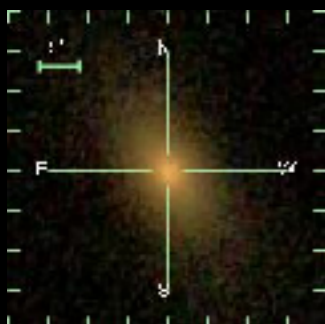
遠方の銀河は近傍銀河に比べて「赤く」見える

Ca H & K OIII H β Na Mg

近傍銀河



遠方銀河



赤方偏移

大規模構造の3次元構造を知る手がかり

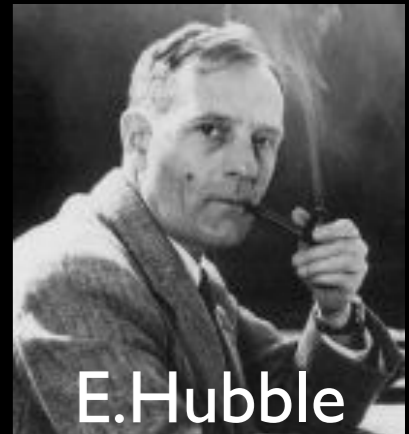
宇宙膨張により

遠方の銀河は近傍銀河に比べて「赤く」見える

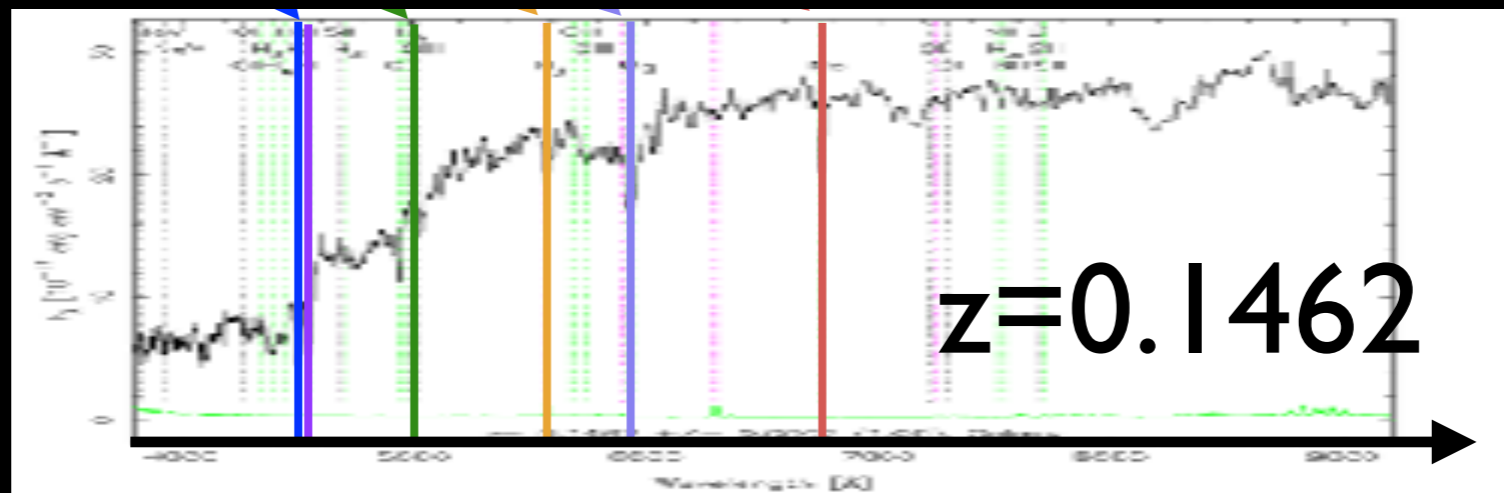
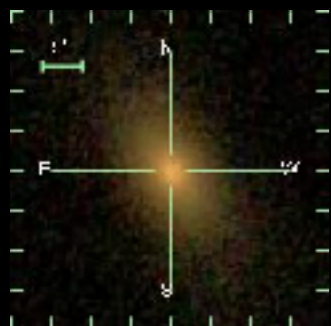
赤方偏移パラメーター $z = \Delta\lambda / \lambda$

ハッブルの法則

‘後退’速度 $v = H d$ 銀河までの距離
(= 光速 \times 赤方偏移) ハッブルパラメーター



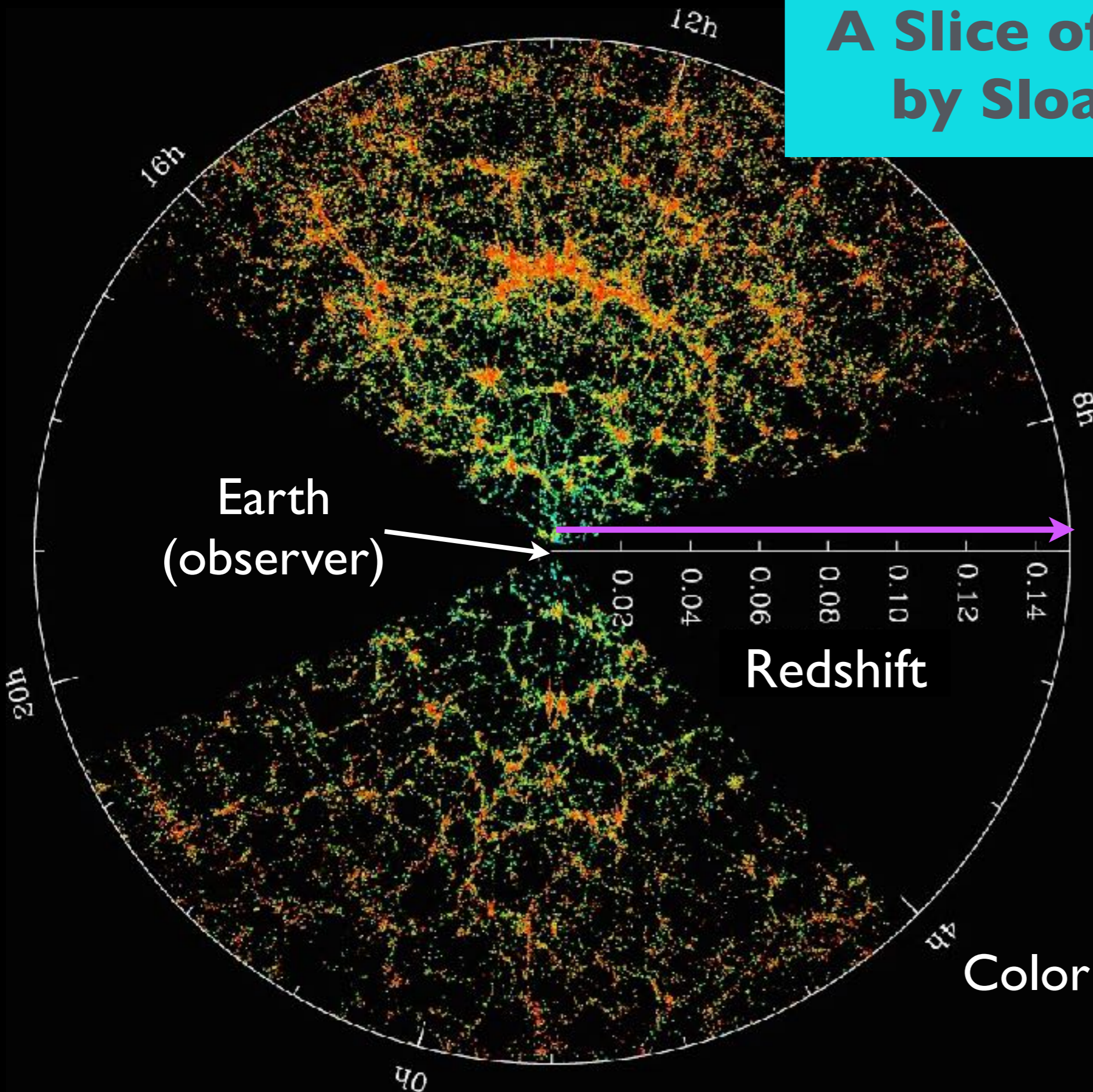
遠方銀河



SDSS SkyServer

A Slice of galaxy catalog by Sloan Digital Sky

finished in 2008



2 G yrs
(look back time)

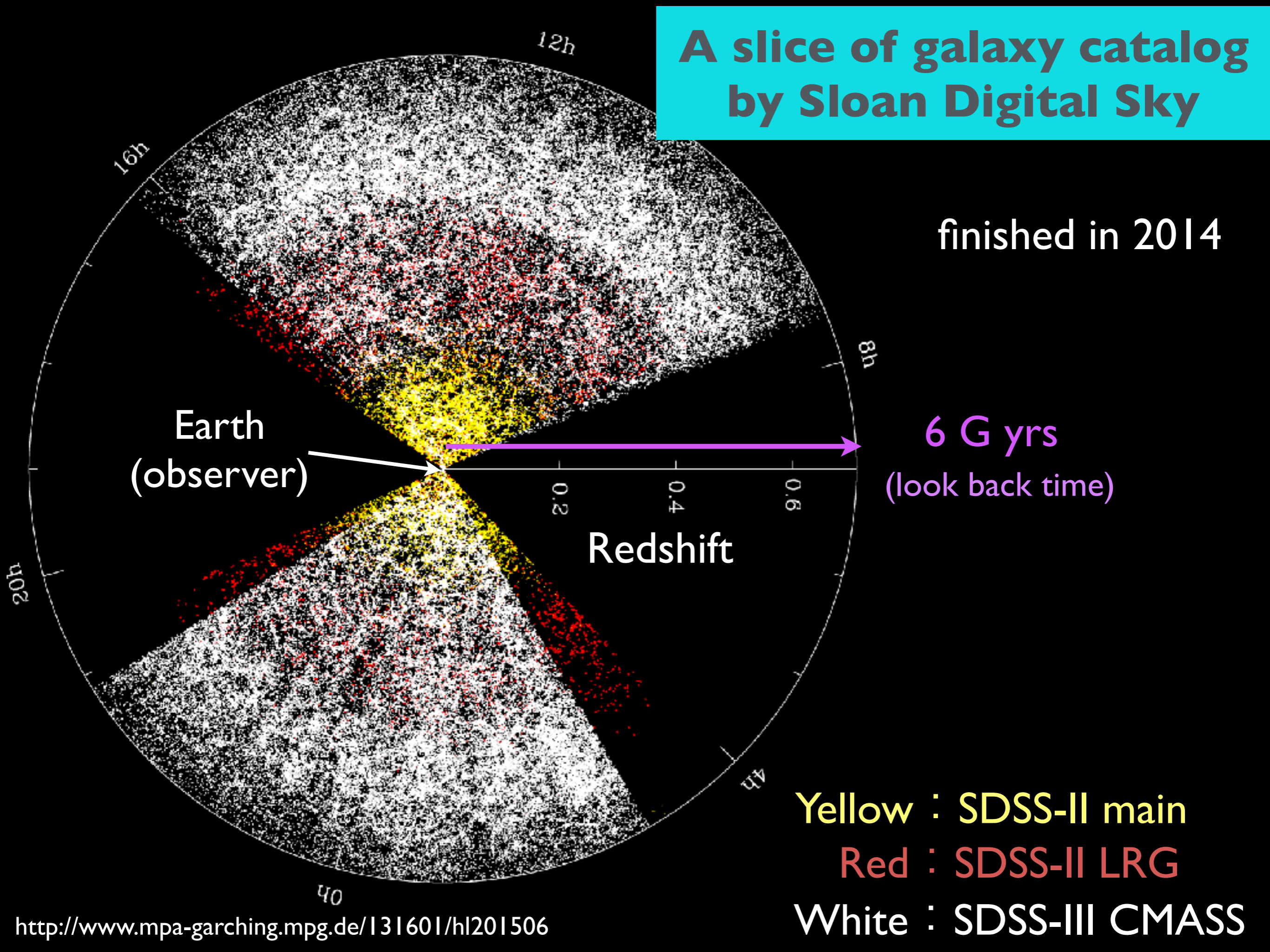
Color indicates age of galaxy

Blue : young

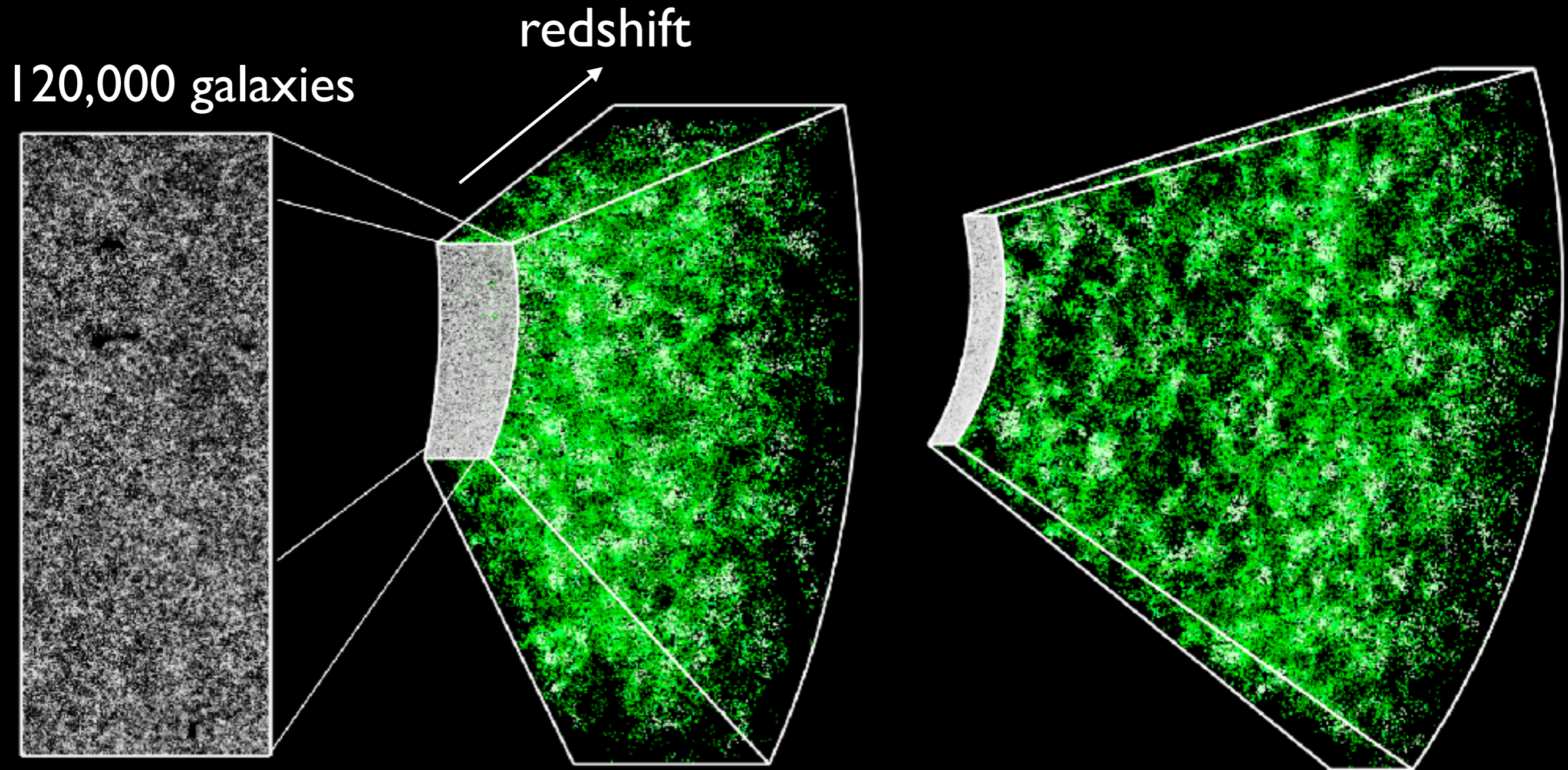
Red : old

A slice of galaxy catalog by Sloan Digital Sky

finished in 2014



A section of 3D map



3D Map of galaxies

Sloan Digital Sky Survey

Miguel A Aragon (JHU), Mark Subbarao (Adler P.), Alex Szalay (JHU)

Sloan Digital Sky Survey III
Baryon Oscillation Spectroscopic Survey

<https://www.sdss3.org/press/dr9.php>

3D Map of galaxies

Sloan Digital Sky Survey

Miguel A Aragon (JHU), Mark Subbarao (Adler P.), Alex Szalay (JHU)

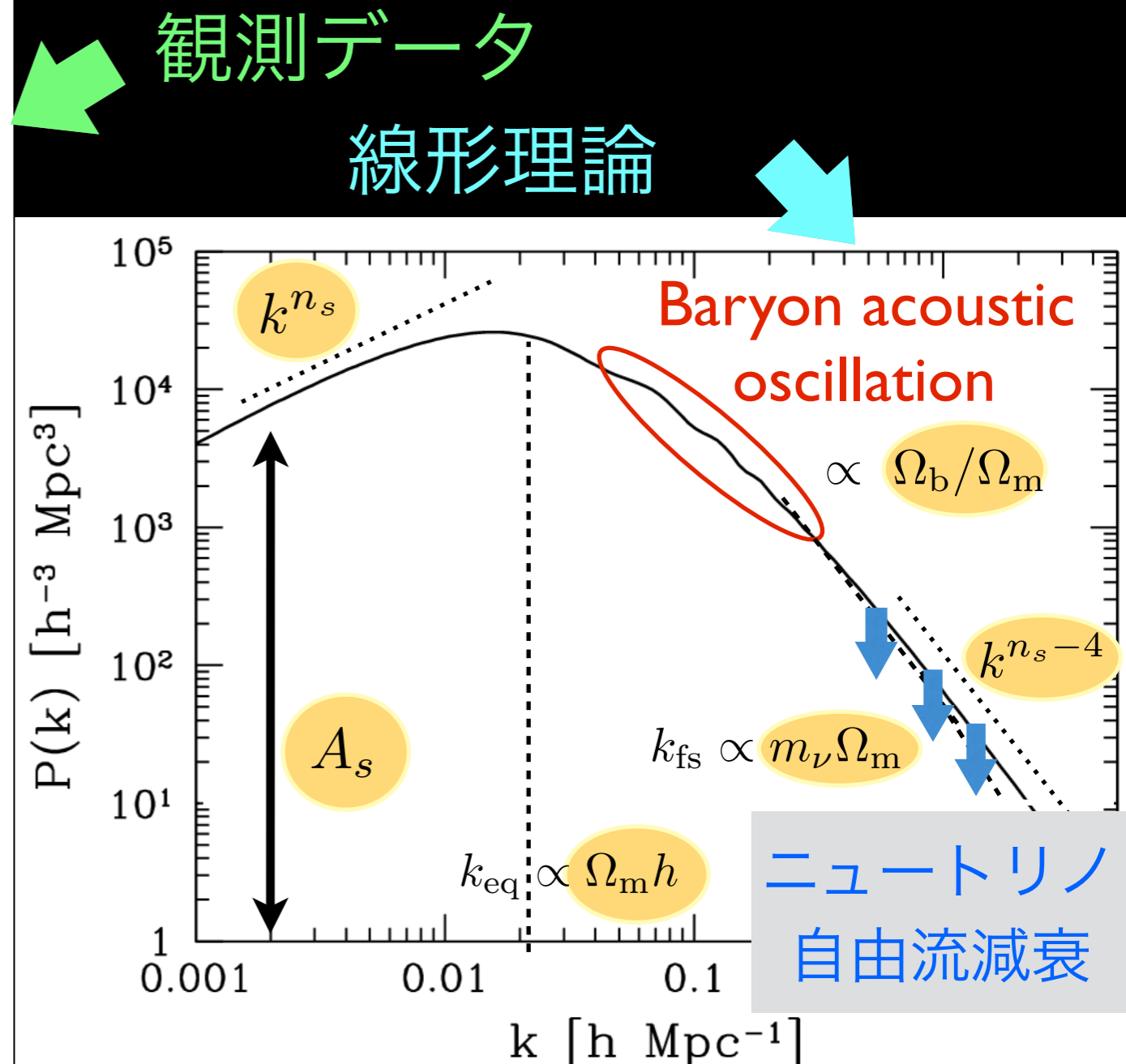
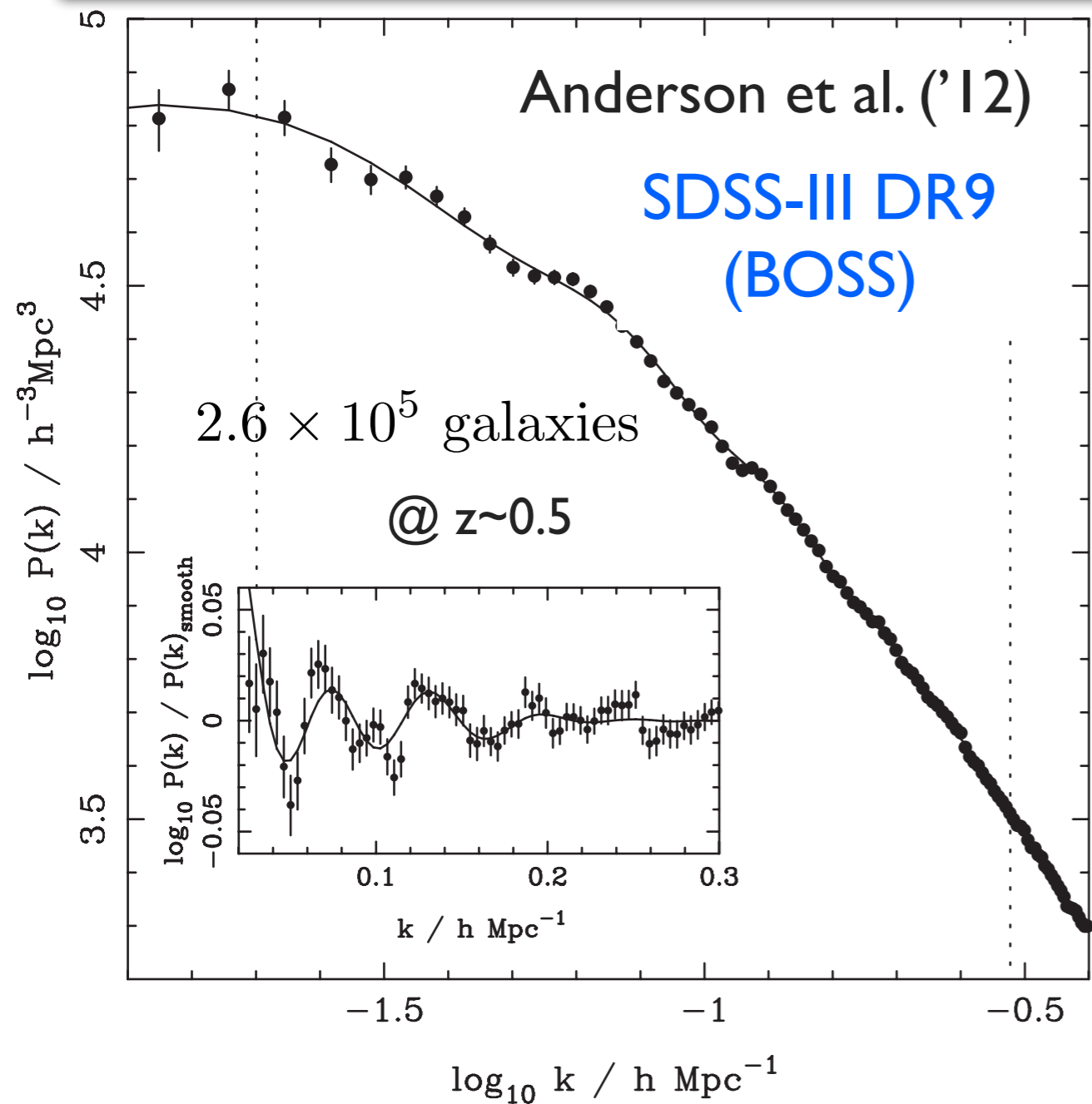
Sloan Digital Sky Survey III
Baryon Oscillation Spectroscopic Survey

<https://www.sdss3.org/press/dr9.php>

質量密度ゆらぎのパワースペクトル

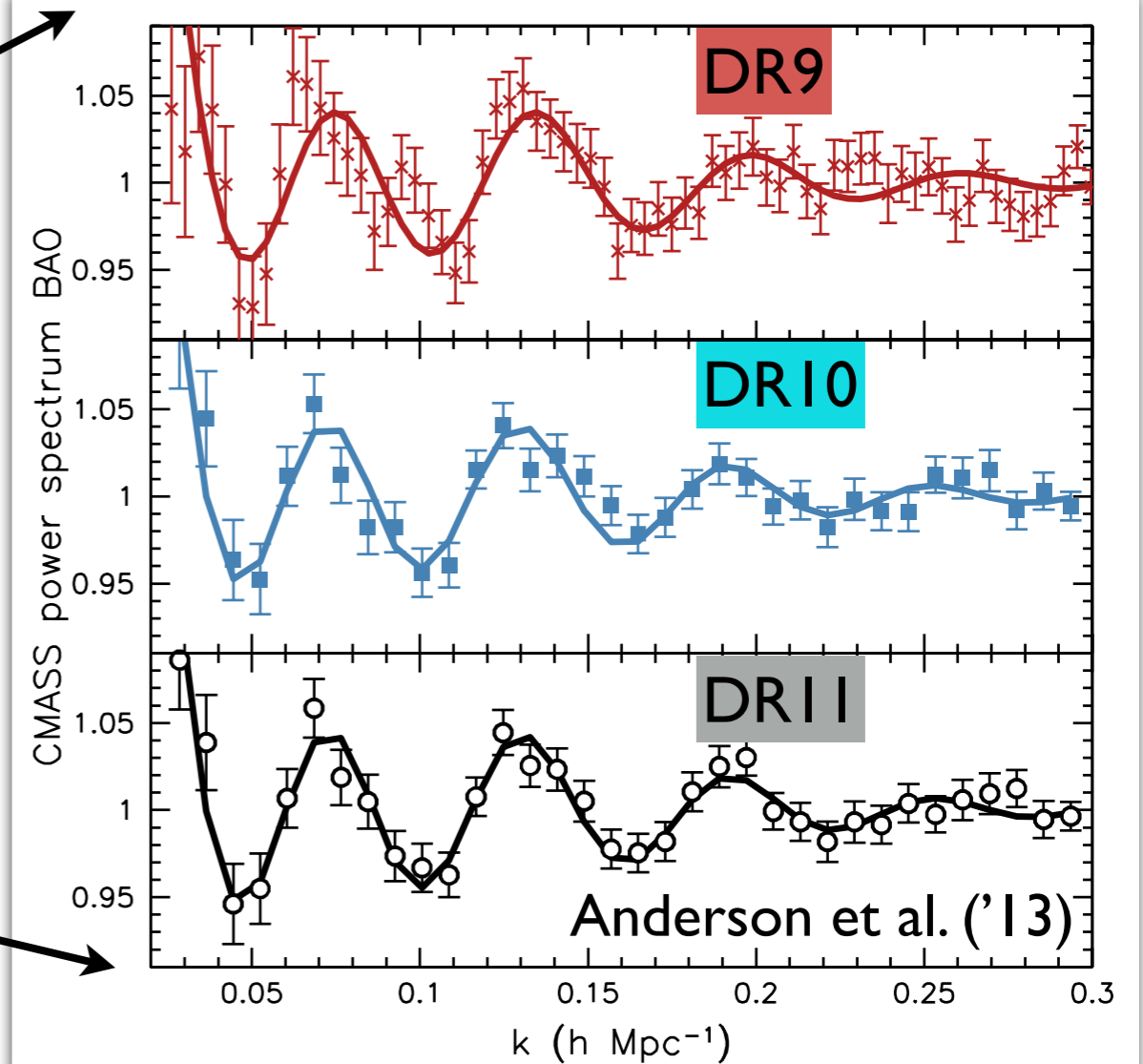
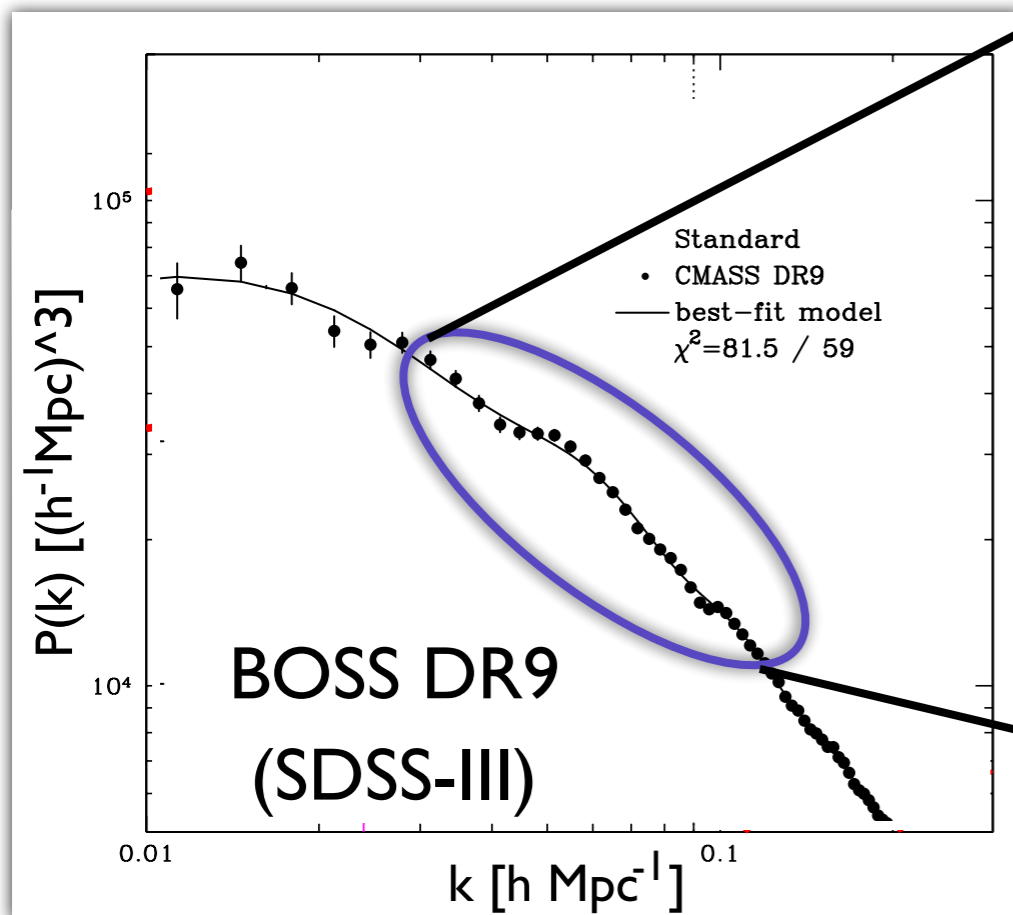
$$\delta(\vec{x}) \equiv \frac{\delta\rho_m(\vec{x})}{\bar{\rho}_m} = \frac{1}{\sqrt{V}} \sum_{\vec{k}} \delta(\vec{k}) e^{i\vec{k}\cdot\vec{x}}$$

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



バリオン音響振動 (BAO)

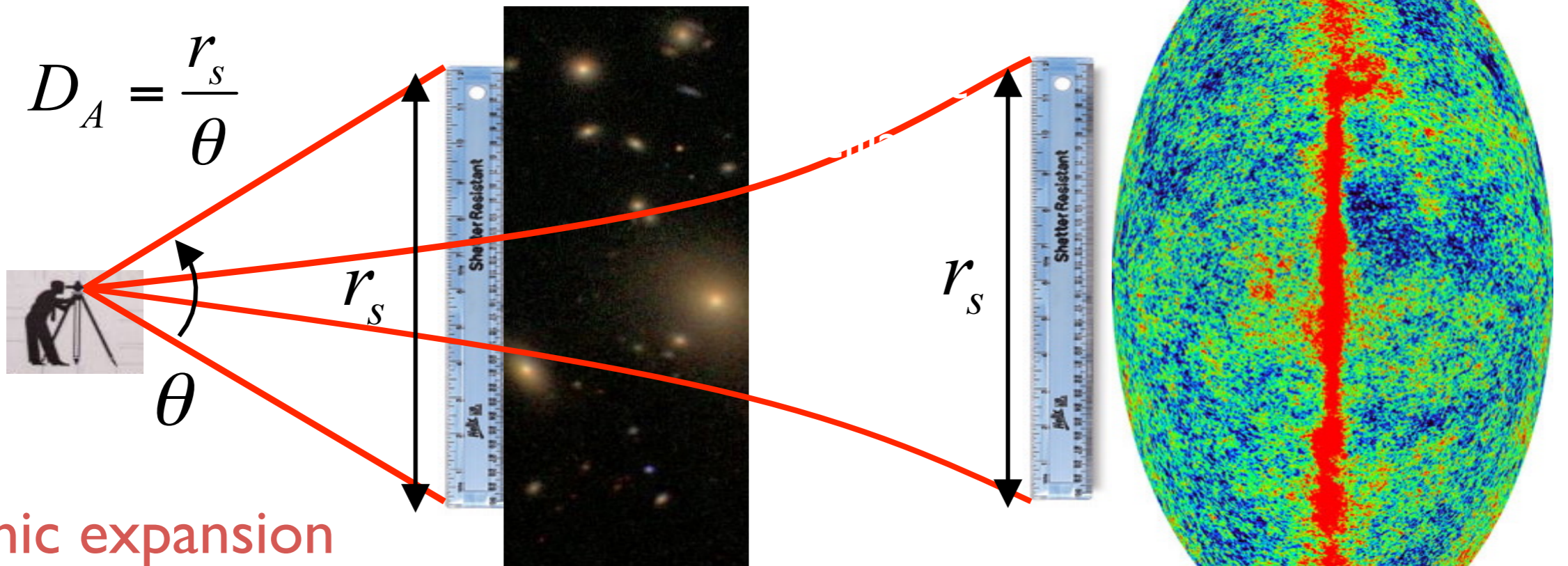
- 原始バリオン-光子流体の音響振動スケール ($\sim 150\text{Mpc}$)
(\Leftrightarrow CMBの音響ピークのスケール)
- 標準ものさしとして遠方銀河までの距離測定に使える
(理論プライヤー) \rightarrow 加速膨張のプローブ



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 ($\sim 150\text{Mpc}$)
(\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

$$D_A = \frac{r_s}{\theta}$$



cosmic expansion
changes the distances !!

distant galaxies

cosmic microwave background

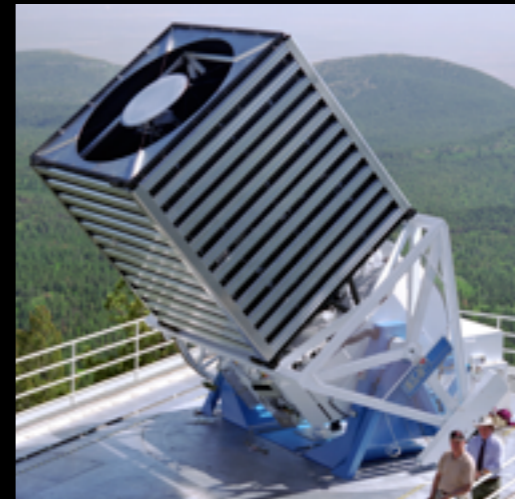
現在稼働中・今後の観測

Multi-purpose ground- & space-based experiments

DES (2013~)



HETDEX (2016+)

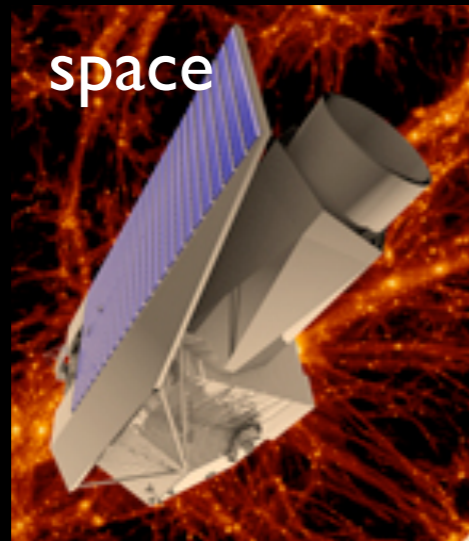


eBOSS (2014~)



DESI (2018+)

WFIRST (2024++)



Euclid (2020)



LSST (2022++)

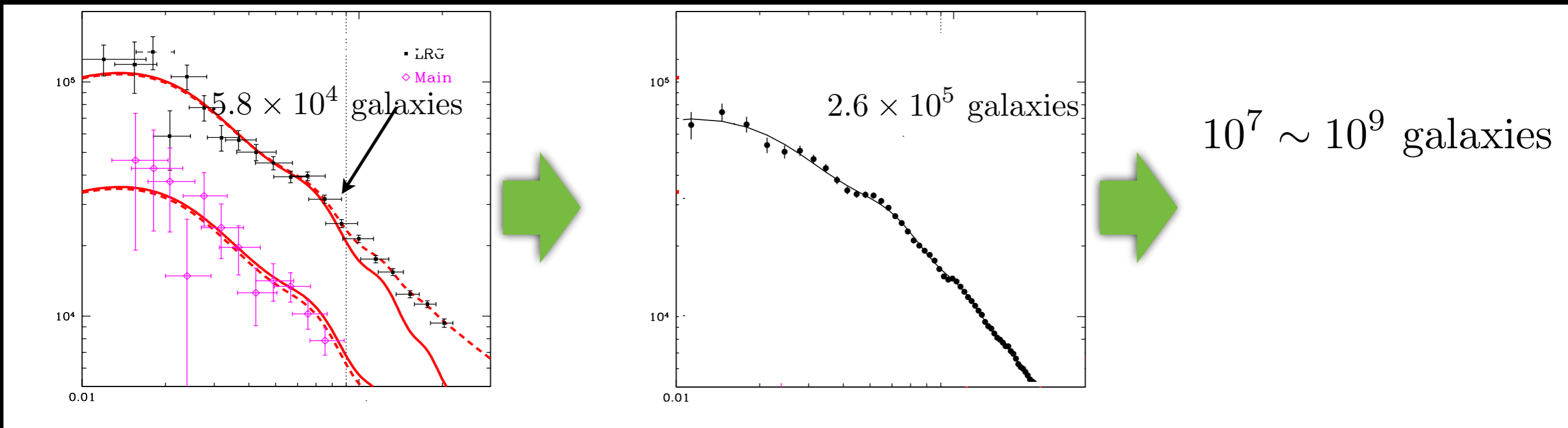


SuMIRe (2014~)



精密宇宙論時代の大規模構造

より系統的な大規模観測によりこれまで以上の
統計精度で大規模構造の性質が明らかに

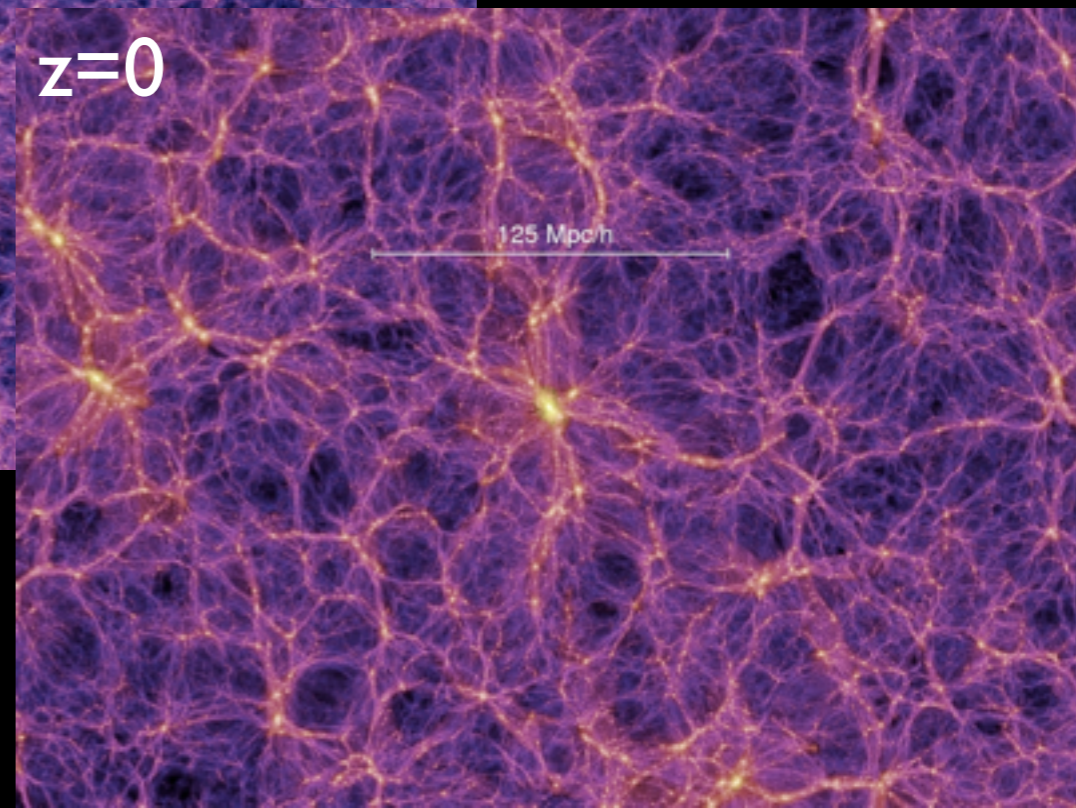
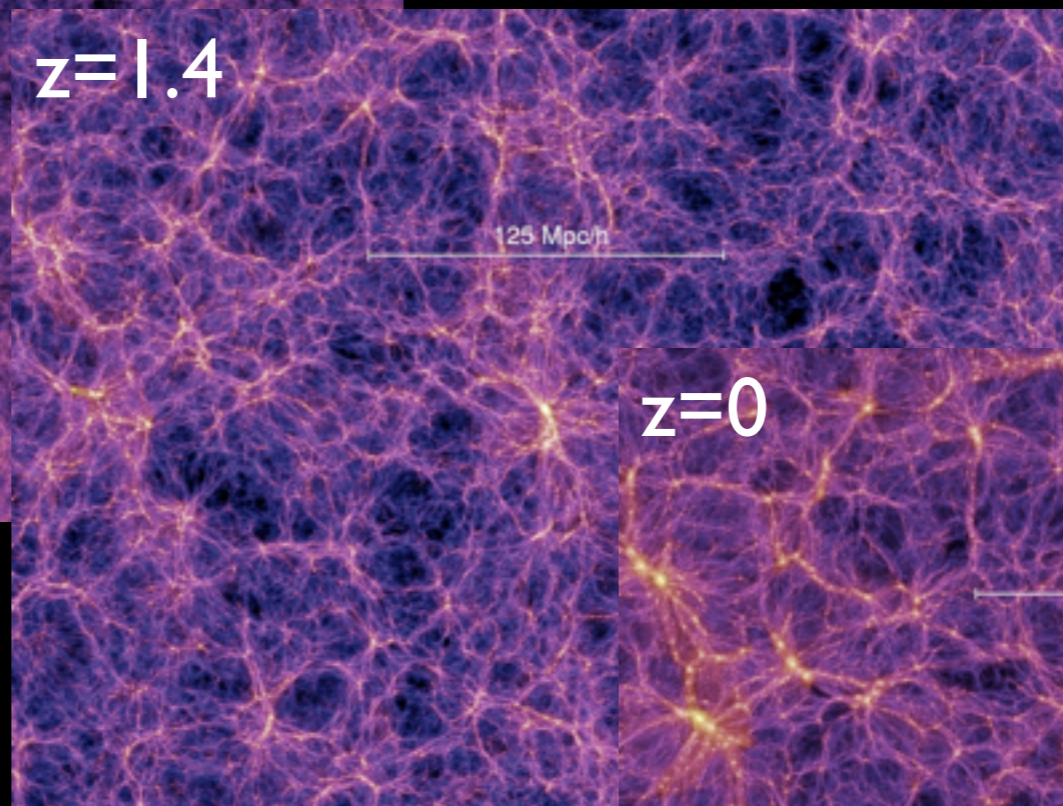
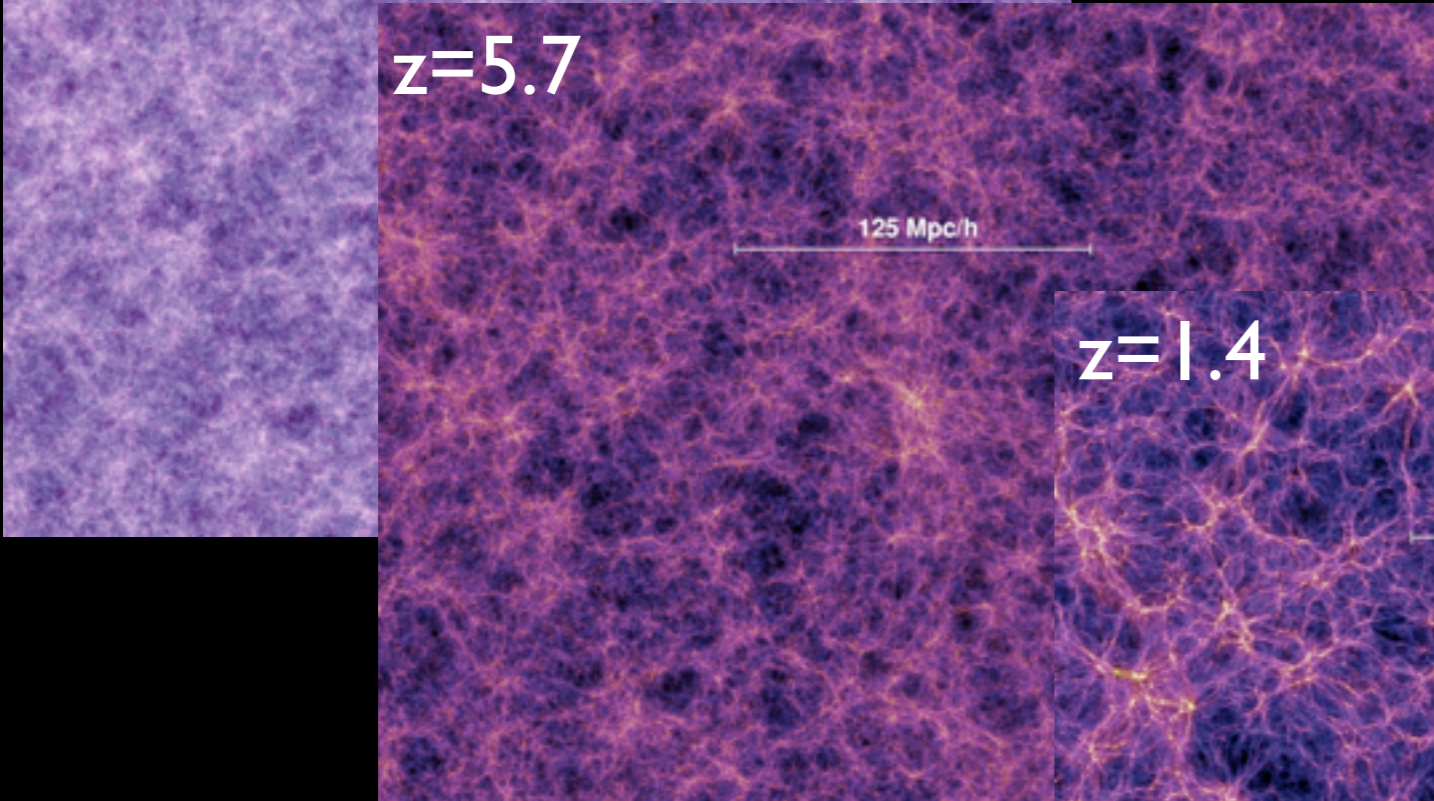
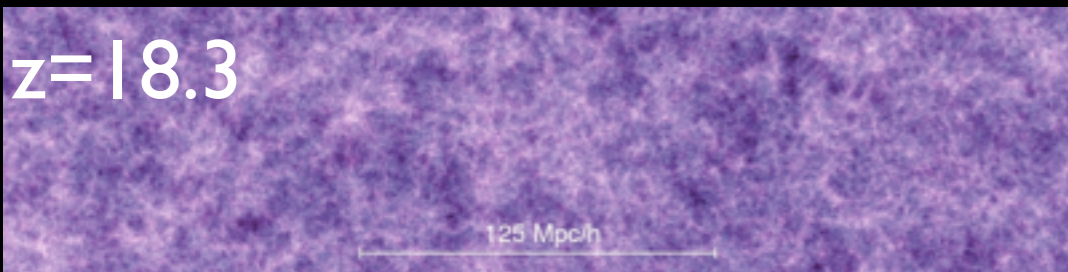


新たな機会とシナジー：

- ダークエネルギーの性質の解明 (加速膨張の起源)
- 宇宙論的大スケールにおける重力理論の検証
- ニュートリノ質量の検出・測定

観測の精度とともに理論の精度向上も要求されている

宇宙論的N体シミュレーション



膨張宇宙における自己重力多体系

$N \rightarrow \infty$

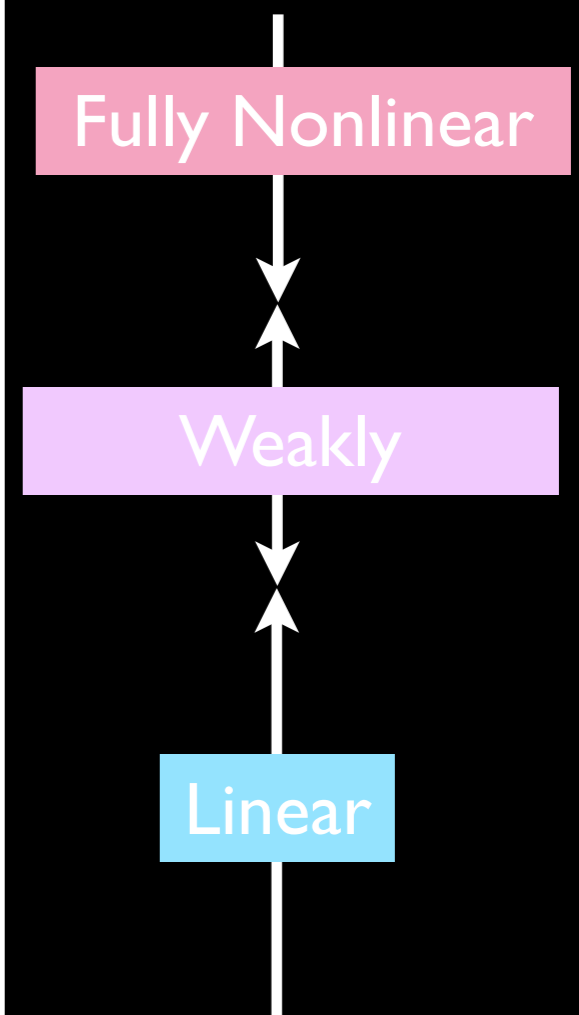
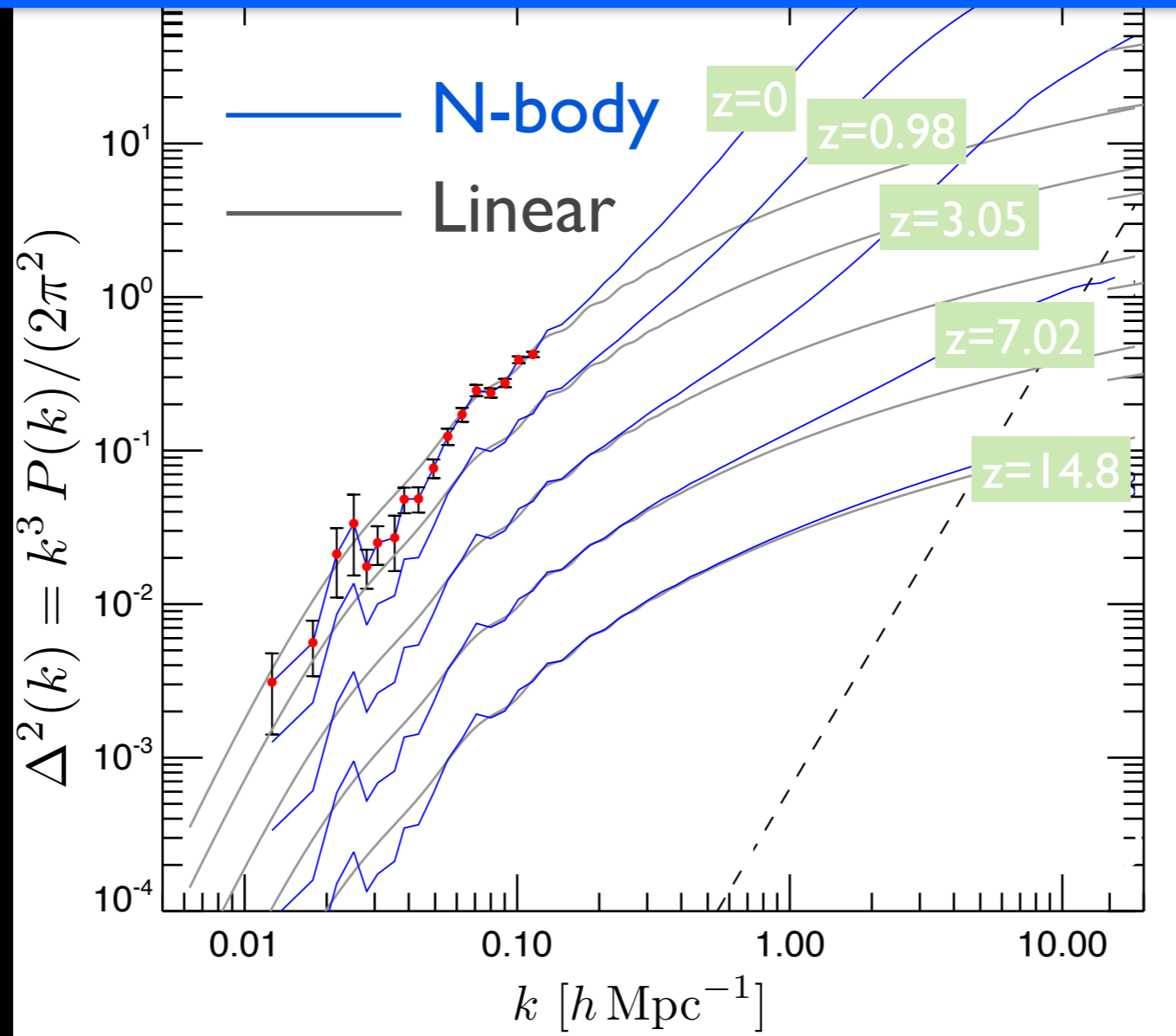
$$\frac{\vec{p}_i}{dt} = -\frac{Gm^2}{a} \sum_{j \neq i}^N \frac{\vec{x}_i - \vec{x}_j}{|\vec{x}_i - \vec{x}_j|^3} \quad \vec{p}_i = ma^2 \frac{d\vec{x}_i}{dt}$$

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

ハローの形成とフィラメント構造の発展

非線形パワースペクトル

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



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・重力不安定性
- 4・ゆらぎの相対論的進化
- 5・非線形構造形成

講義資料など

以下のサイトに置いています

http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~atsushi.taruya/Lecture2018_Rikkyo/lecture2018_rikkyo.html

現代物理学特別講義2「暗黒物質優勢宇宙における構造形成と観測的宇宙論」

日時: 2018年 6月13日(木)~15日(金)

場所: 立教大学池袋キャンパス4号館3階4340教室

講義資料: [PDF](#)

補足資料

オーバービュー: [PDF](#)

フリードマン宇宙モデル: [PDF](#)

重力不安定性: [PDF](#)

相対論的ゆらぎの進化: [PDF](#)

非線形構造形成: [PDF](#)

セミナー: [PDF](#)

課題レポート [PDF](#)