

2018年後期大学院授業

宇宙論特論

樽家篤史

Atsushi Taruya

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

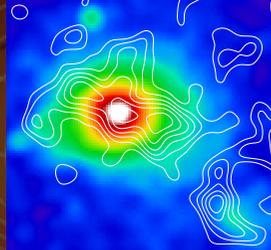
宇宙論の観測対象

観測対象：宇宙膨張、ゆらぎの進化の情報を担う天体（現象）

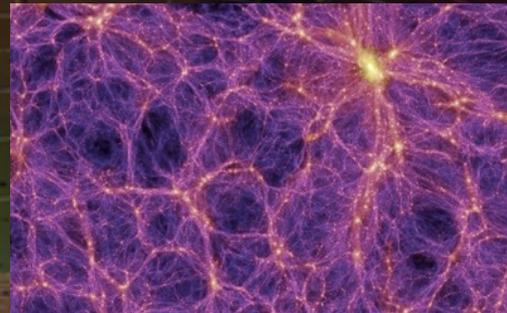
銀河



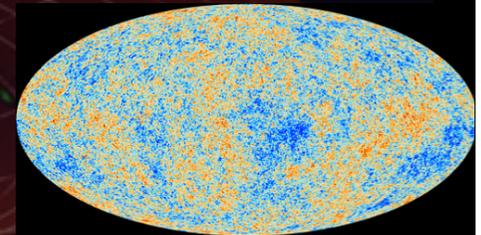
銀河団



銀河のクラスタリング
(キューサー)



CMB



小スケール
(~kpc)

大スケール
(~Gpc)

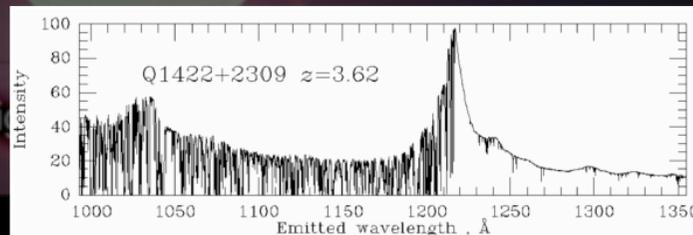


セファイド変光星



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



Very Large Telescope (Chile)



Subaru Telescope (Hawaii)

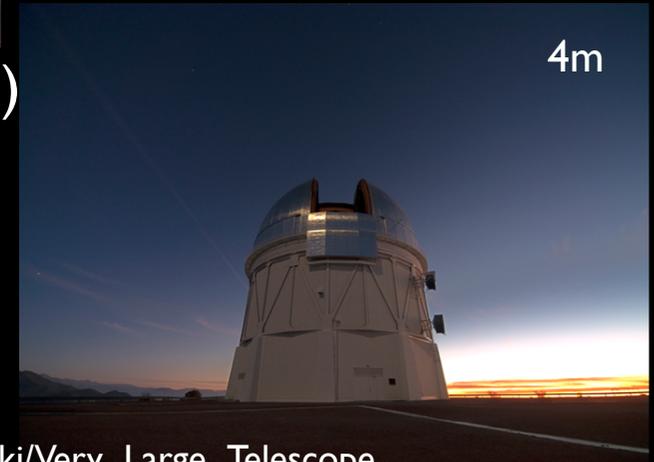


Canada-France-Hawaii Telescope (Hawaii)



Sloan Digital Sky Survey @ APO (New Mexico)

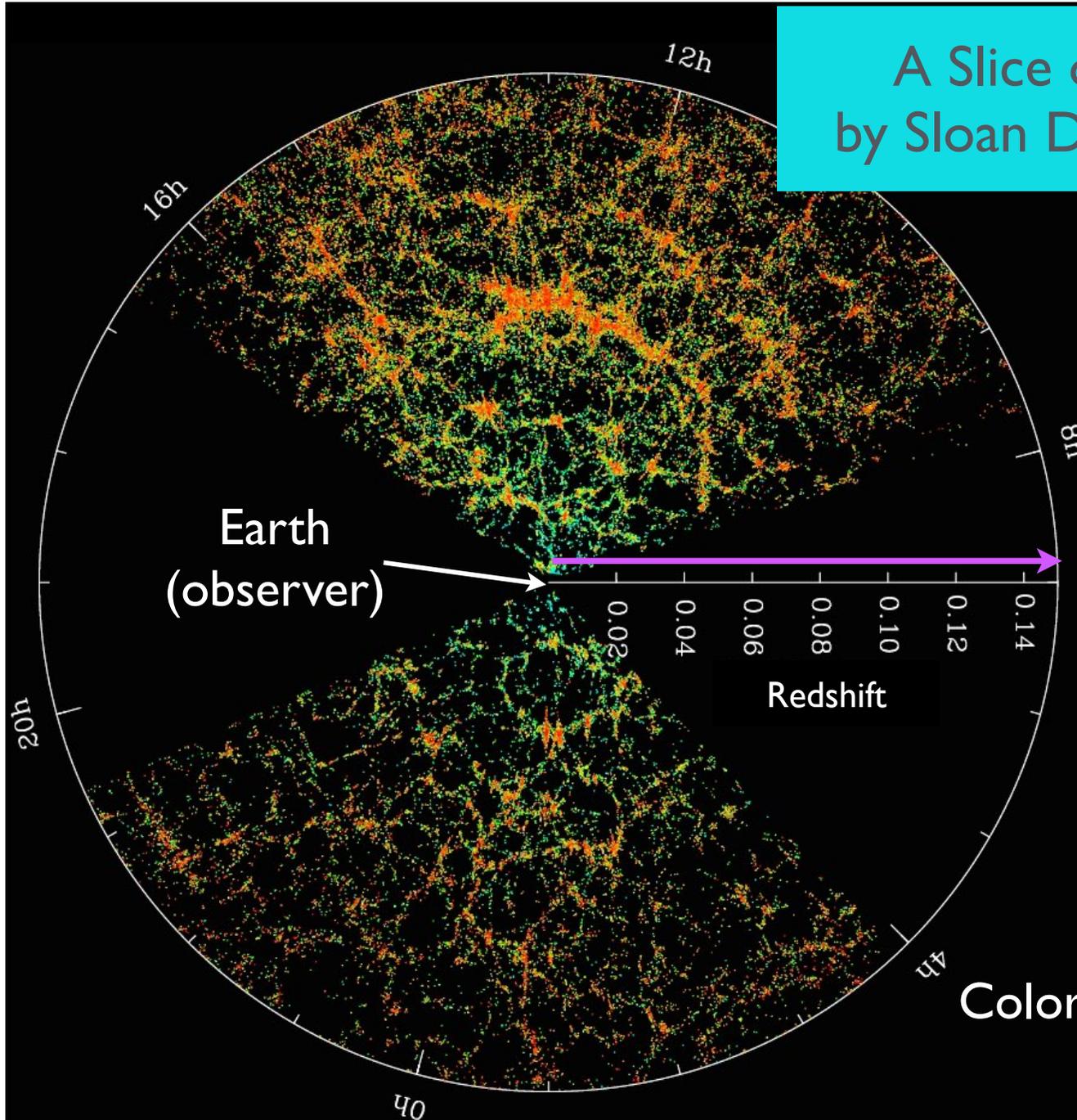
Blanco telescope @ CTIO (Chile)



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>

A Slice of galaxy catalog by Sloan Digital Sky Survey II

finished in 2008



2 G yrs
(look back time)

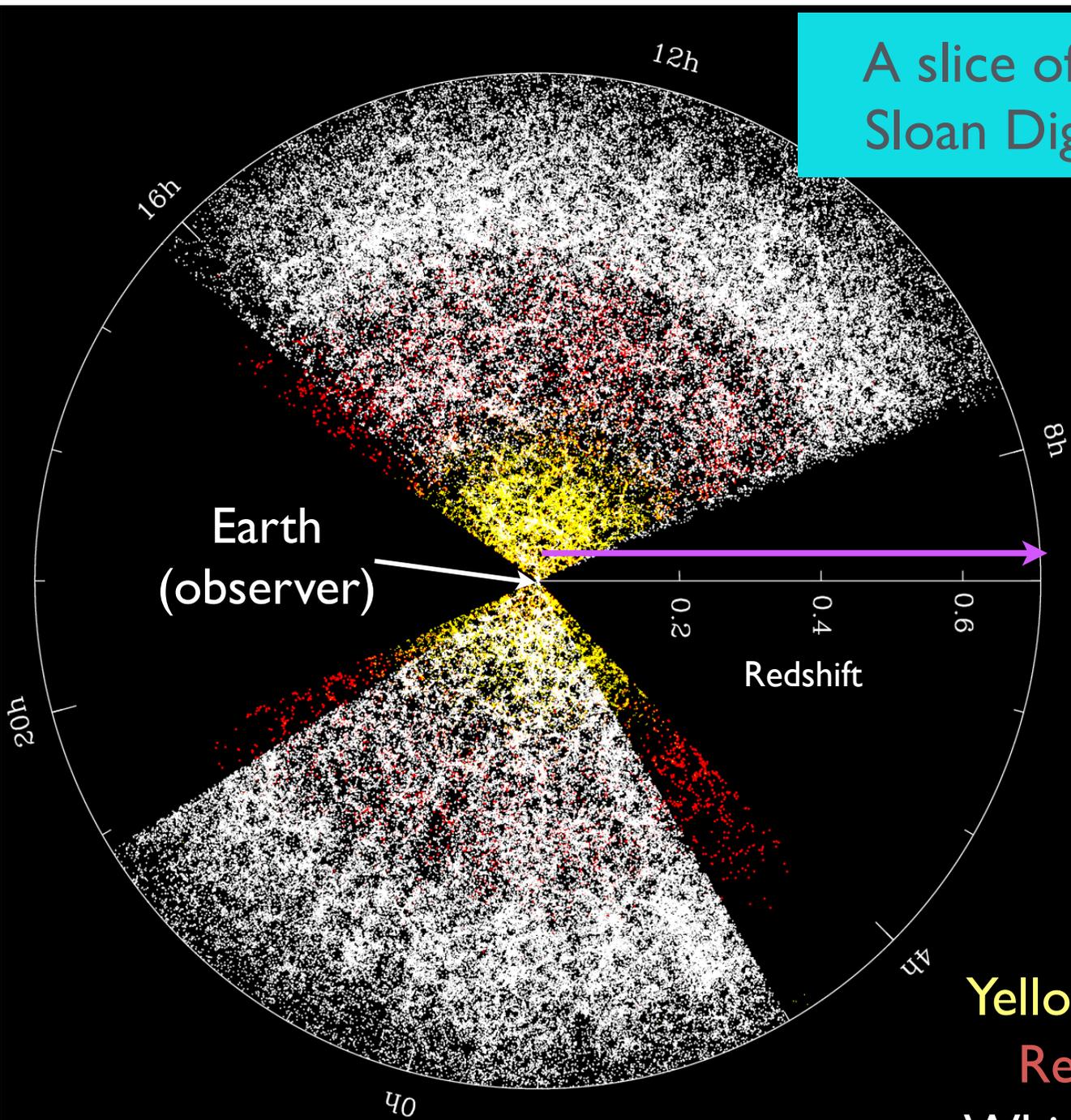
Color indicates age of galaxy

Blue : young
Red : old

A slice of galaxy catalog by Sloan Digital Sky Survey III

finished in 2014

6 G yrs
(look back time)



Earth
(observer)

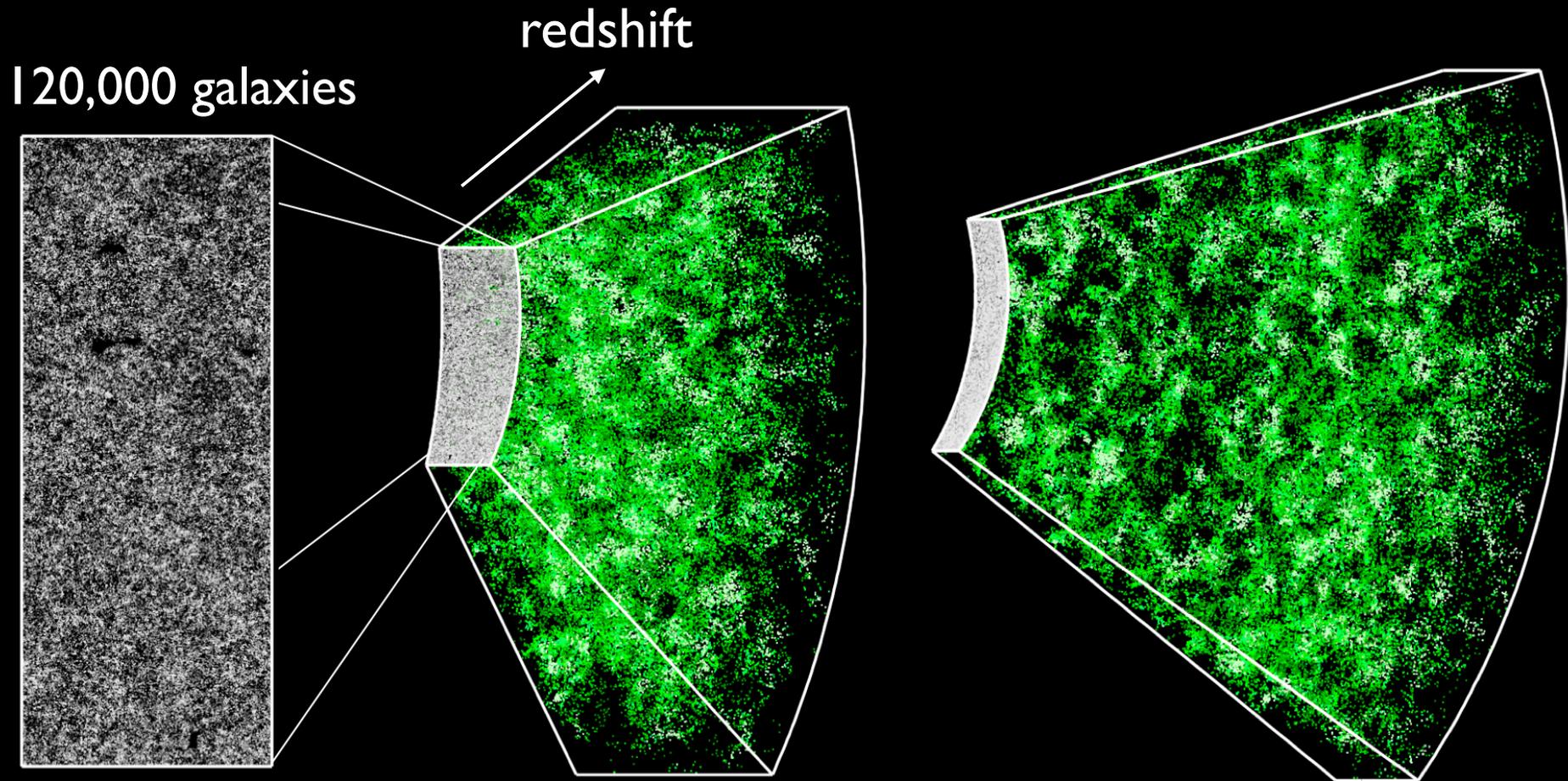
Redshift

Yellow : SDSS-II main

Red : SDSS-II LRG

White : SDSS-III CMASS

A section of 3D map



<http://www.sdss.org/press-releases/astronomers-map-a-record-breaking-1-2-million-galaxies-to-study-the-properties-of-dark-energy/>

3D Map of galaxies



Sloan Digital Sky Survey

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

Sloan Digital Sky Survey III

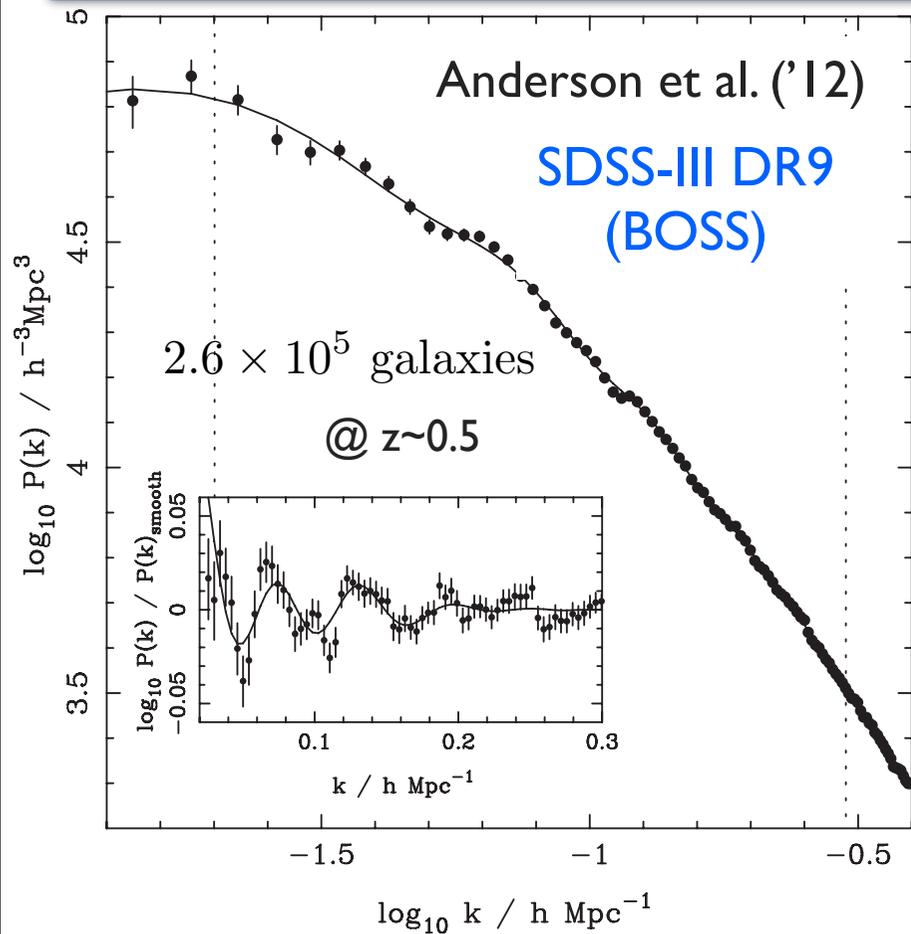
Baryon Oscillation Spectroscopic Survey

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

質量密度ゆらぎのパワースペクトル

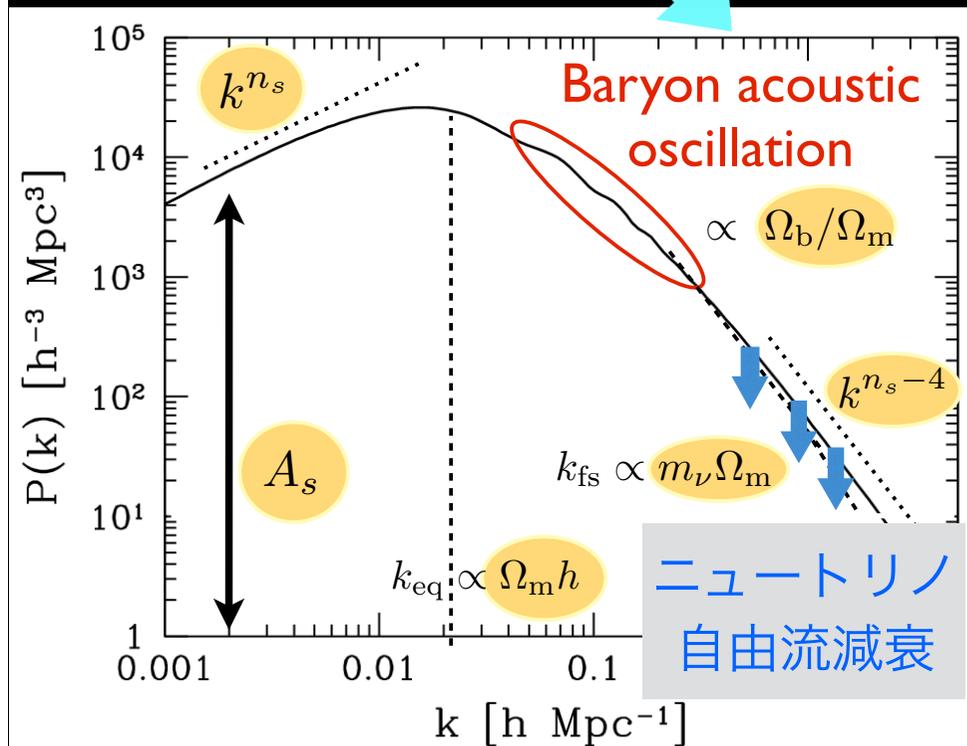
$$\delta(\vec{x}) \equiv \frac{\delta\rho_m(\vec{x})}{\bar{\rho}_m} = \frac{1}{\sqrt{V}} \sum_{\vec{k}} \delta(\vec{k}) e^{i\vec{k}\cdot\vec{x}}$$

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



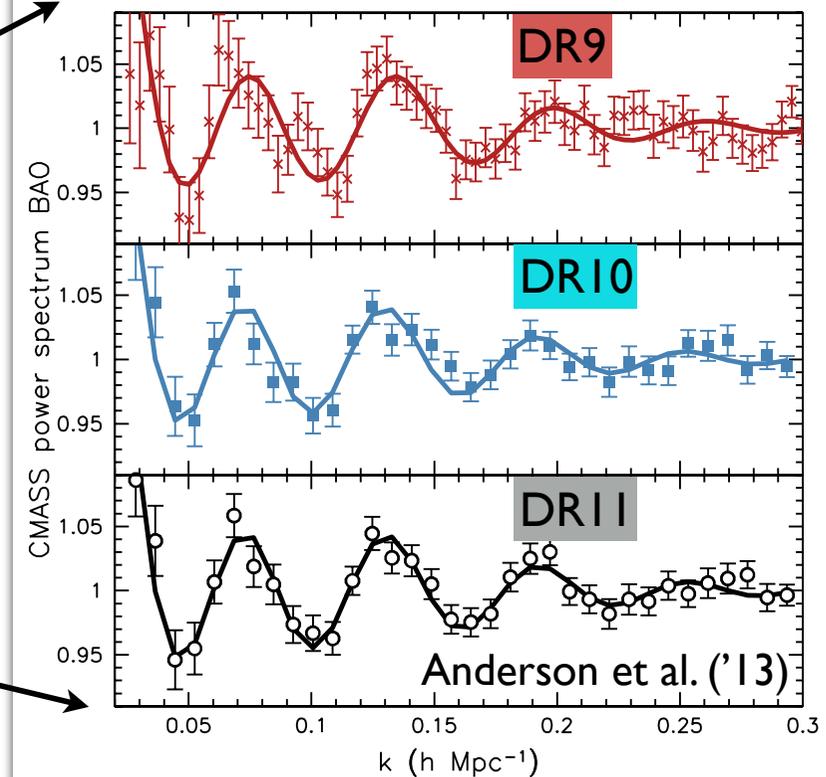
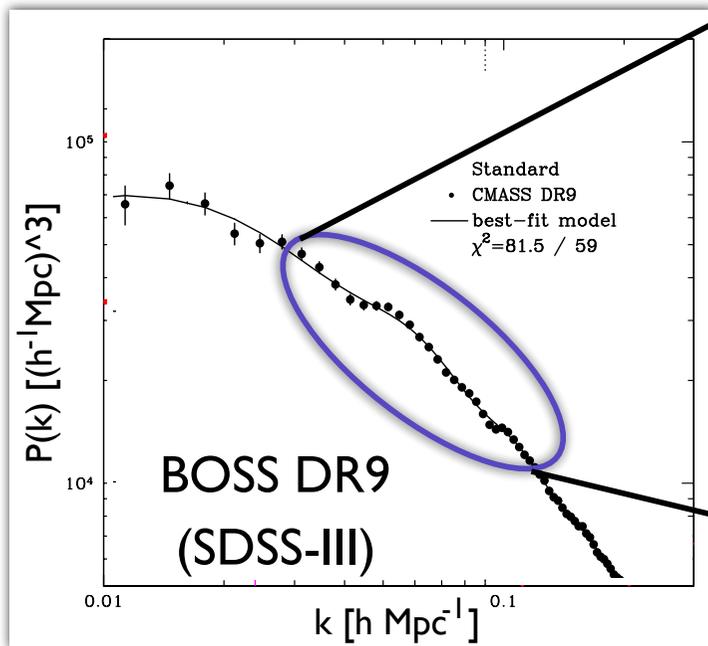
観測データ

線形理論



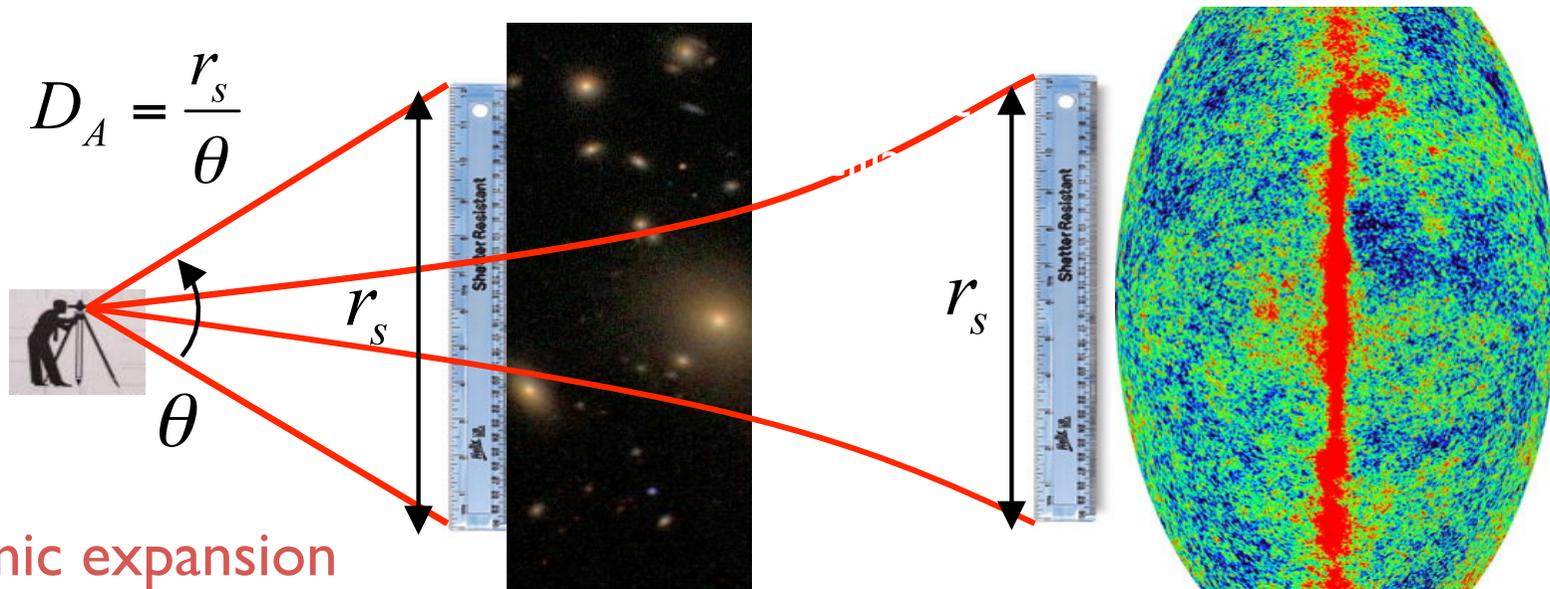
バリオン音響振動 (BAO)

- 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)
(⇔ 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) → 加速膨張のプローブ



cosmic expansion
changes the distances !!

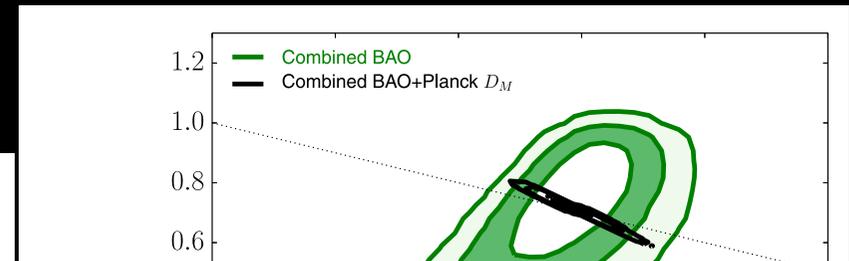
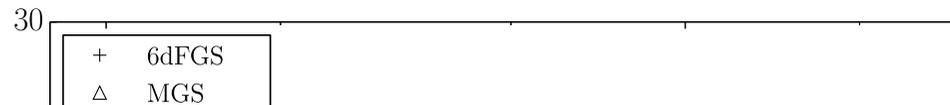
distant galaxies

cosmic microwave background

Cosmological constraints from BAO

Aubourg et al. '15

Distance-redshift relation from
BAO measurement



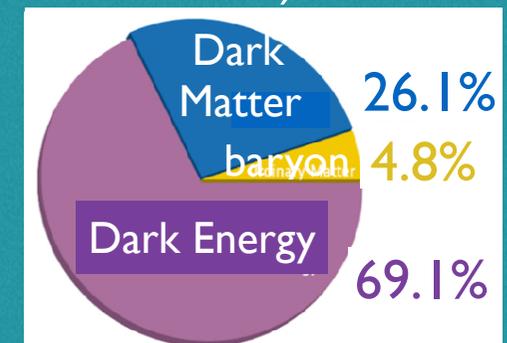
Λ CDM model (standard cosmological model)

flat universe filled with mysterious energy/matter components :

- dark matter → structure formation
- dark energy → late-time cosmic acceleration

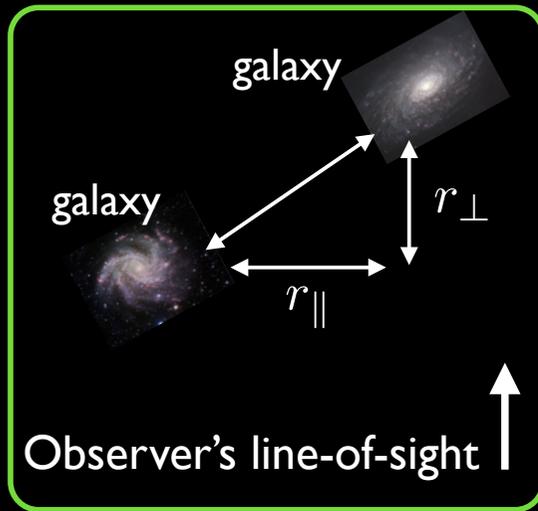
(In Λ CDM model, dark energy=cosmological constant, Λ)

Origin & nature of these components are largely unknown. Need further observations !!

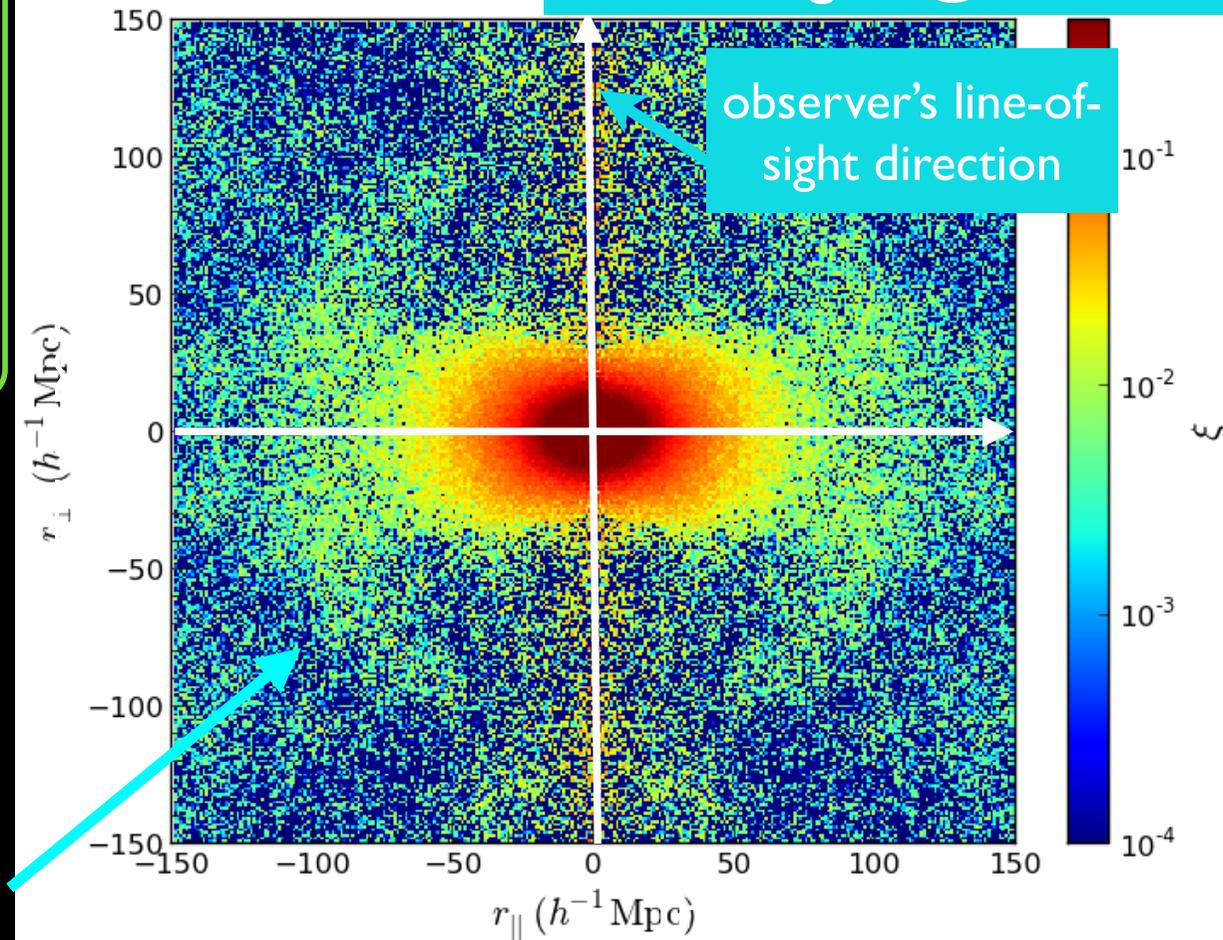


Two-point correlation function

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



Baryon acoustic oscillation (ridge)



RSD as a probe of gravity

Kaiser
formula

(Kaiser '87)

$$\delta^{(S)}(\mathbf{k}) = (1 + f \mu_k^2) \delta(\mathbf{k}) ;$$

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

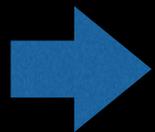
Linear growth
factor
scale factor

This parameter tells us

how the nature of gravity affects the growth of structure

Importantly,

This Kaiser formula holds irrespective of gravity theory



probe of gravity (general relativity) on cosmological scales

- Untested hypothesis in Λ CDM model
- Hint for cosmic acceleration

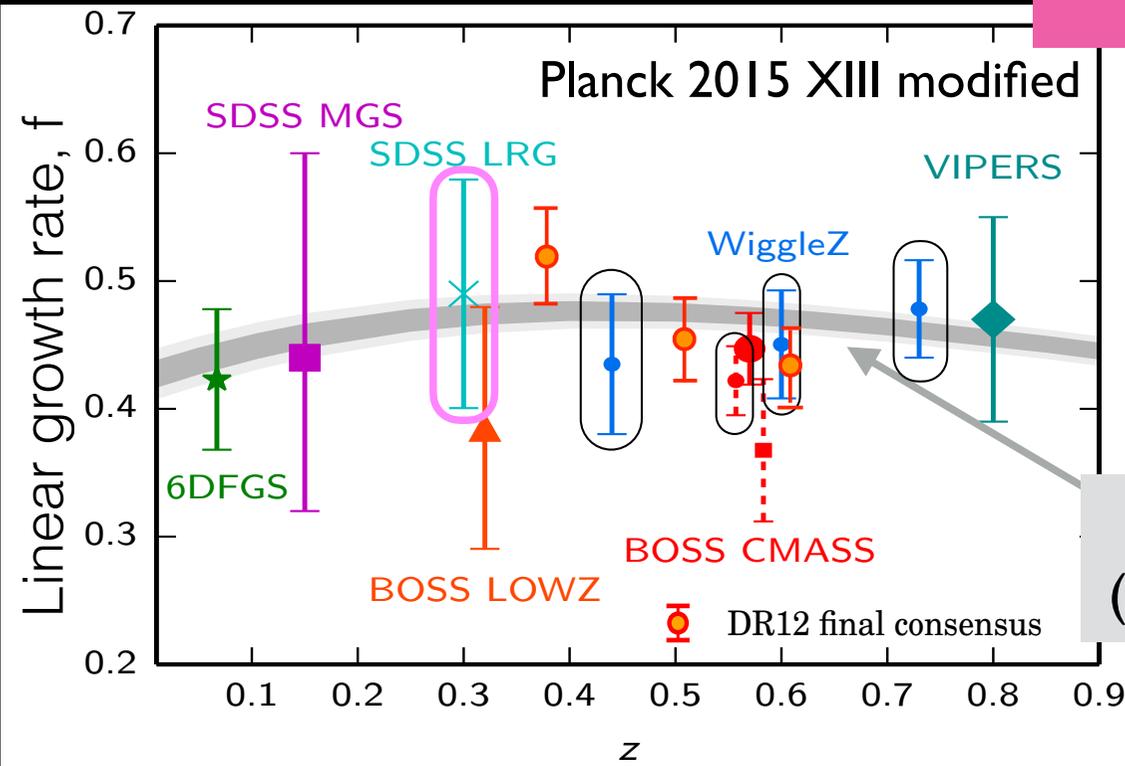
e.g., Linder ('08); Guzzo et al. ('08); Yamamoto et al. ('08); Percival & White ('09)

Consistency test of GR

In practice

Testing gravity needs a nonlinear RSD model assuming underlying theory of gravity

A blind fit of growth rate based on GR-based template



Based on perturbation theory template

Oka, Saito, Nishimichi, AT & Yamamoto ('14)

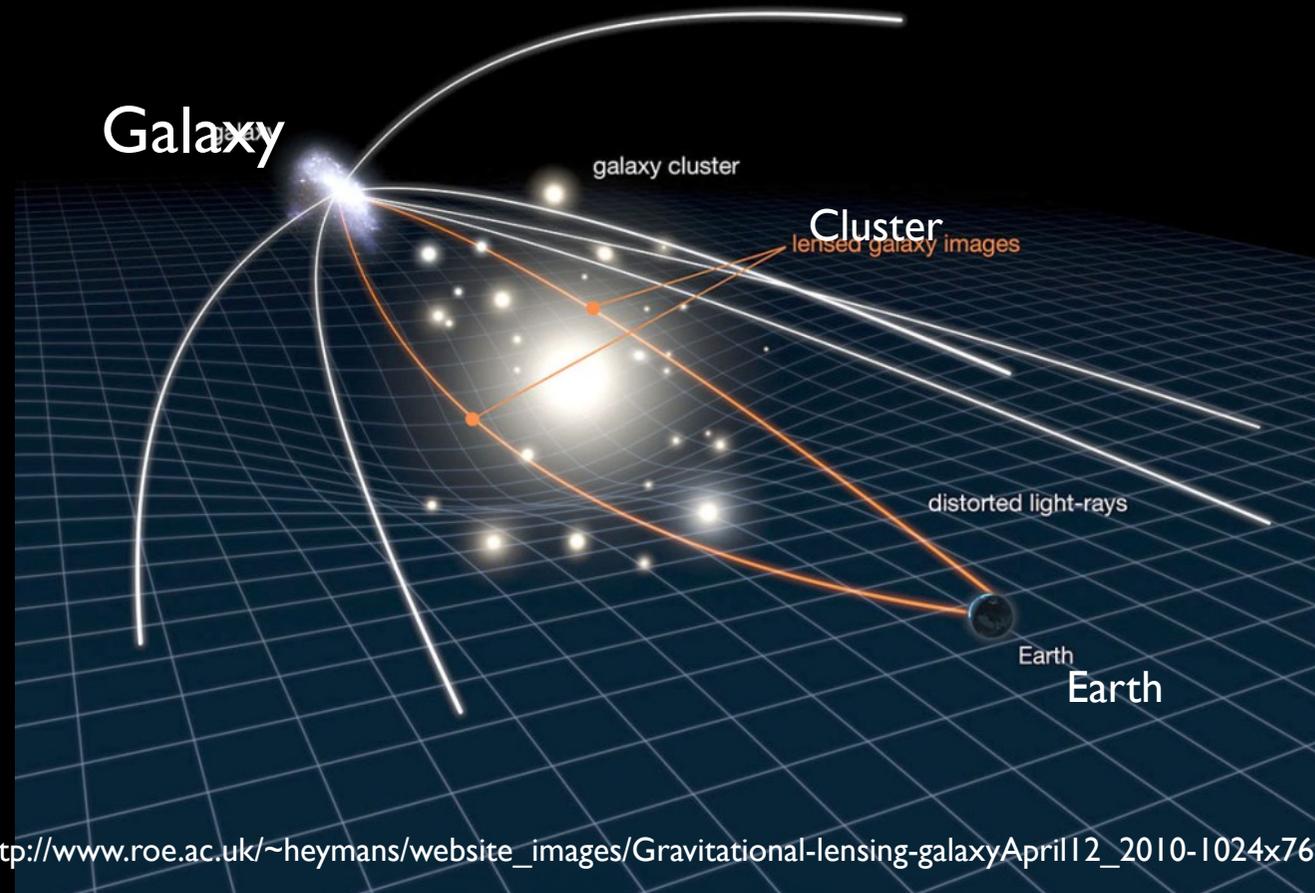
Planck Λ CDM (General relativity)

No strong evidence of deviation from GR

(See also Beutler, Seo, Saito et al. '16 for latest BOSS DR12)

Gravitational lensing effect

Light bending phenomena caused by gravity induced by massive objects such as galaxy and star

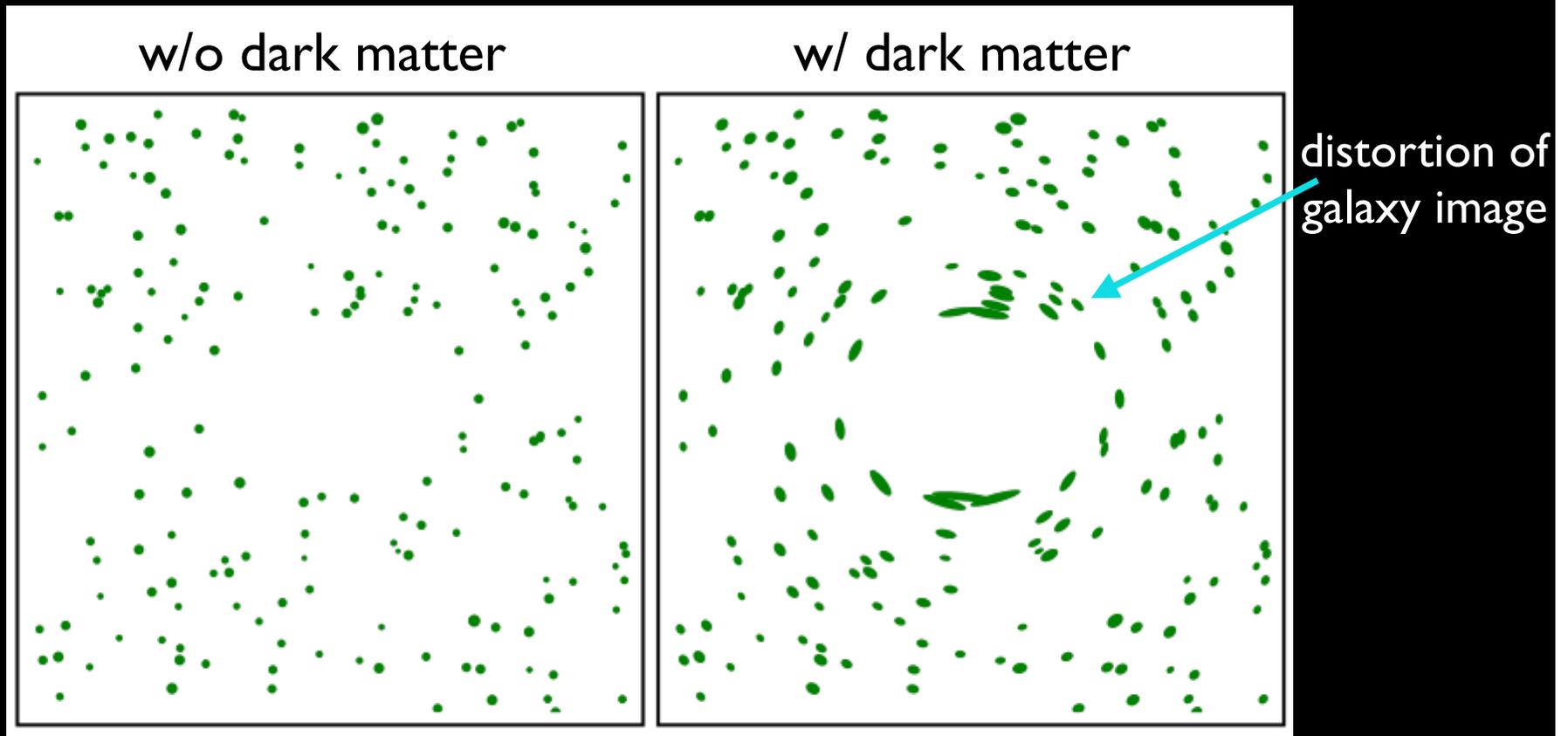


http://www.roe.ac.uk/~heyman/website_images/Gravitational-lensing-galaxyApril12_2010-1024x768.jpg

Observer will see distorted or multiple images of distant objects

Mapping dark matter with weak lensing effect

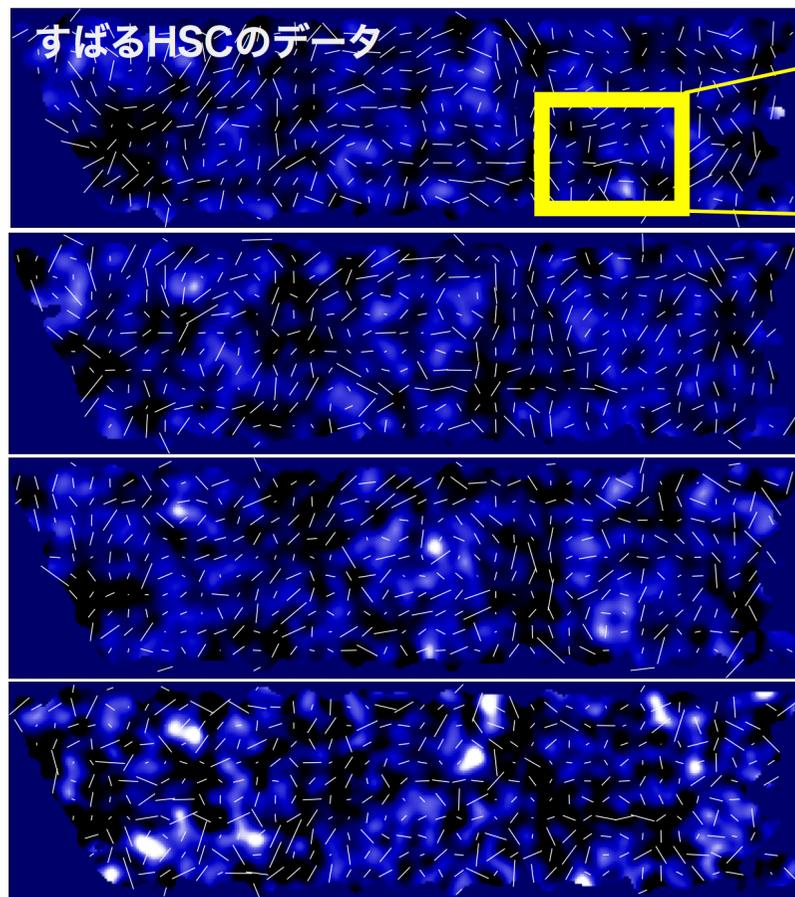
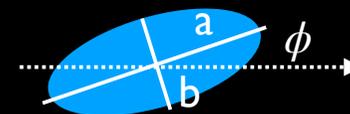
Gravitational lensing effect can be powerful to probe
invisible mass distribution (dark matter)



Subaru HSC 1 year result

Ellipticity of each object :

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



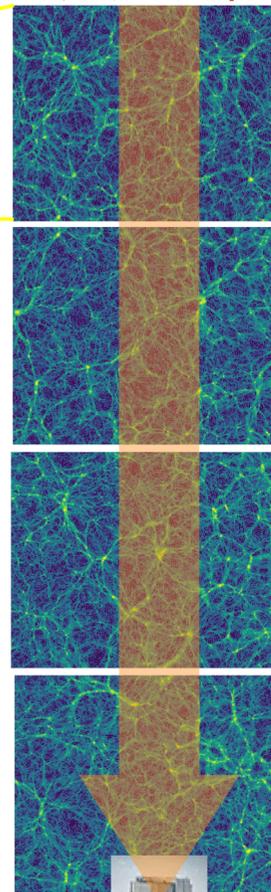
シミュレーション

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)

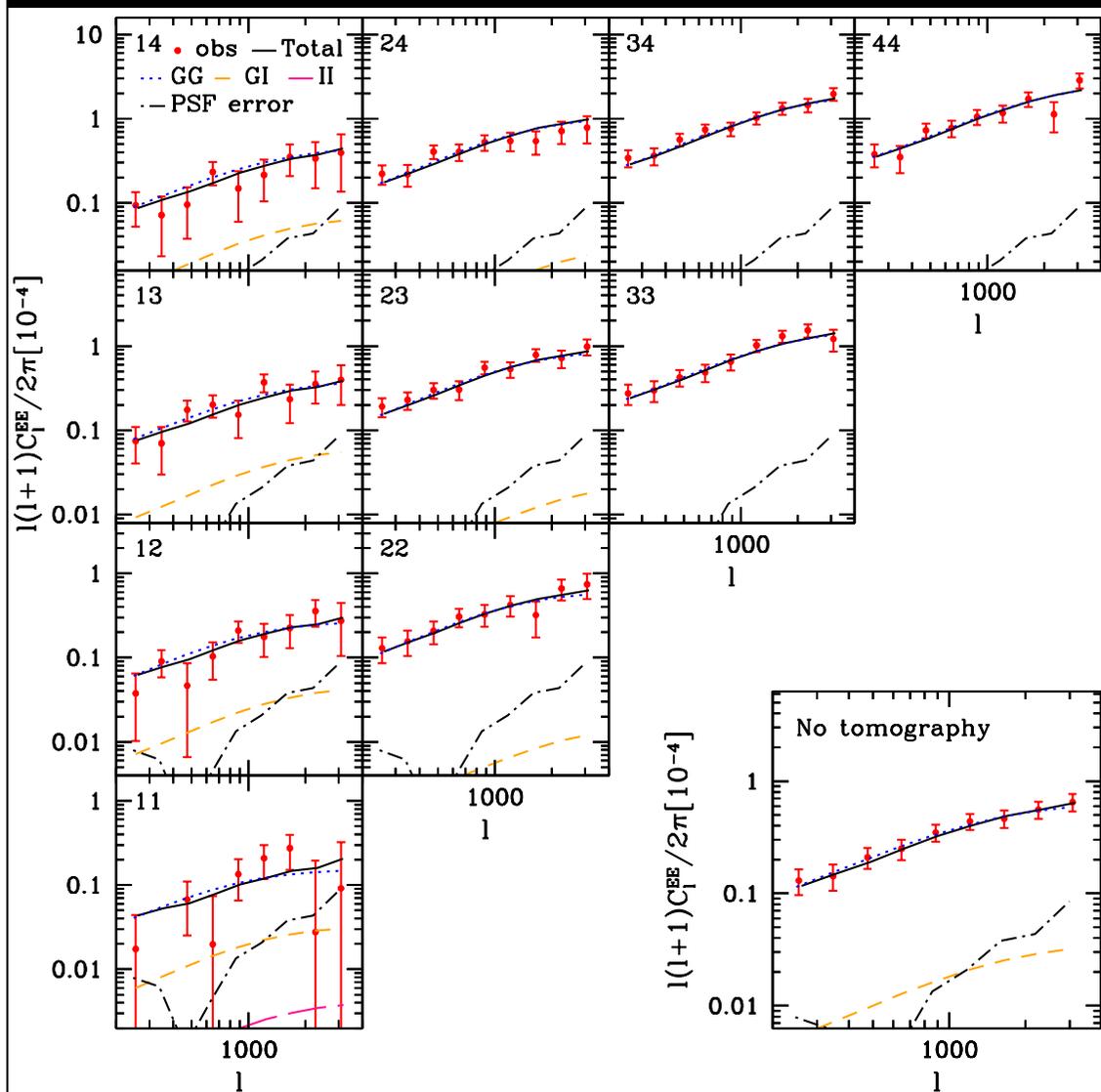


(クレジット : HSC Project/東京大学)

すばる望遠鏡



Cosmic shear power spectrum



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

Multipole

bin number	z range	z_{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

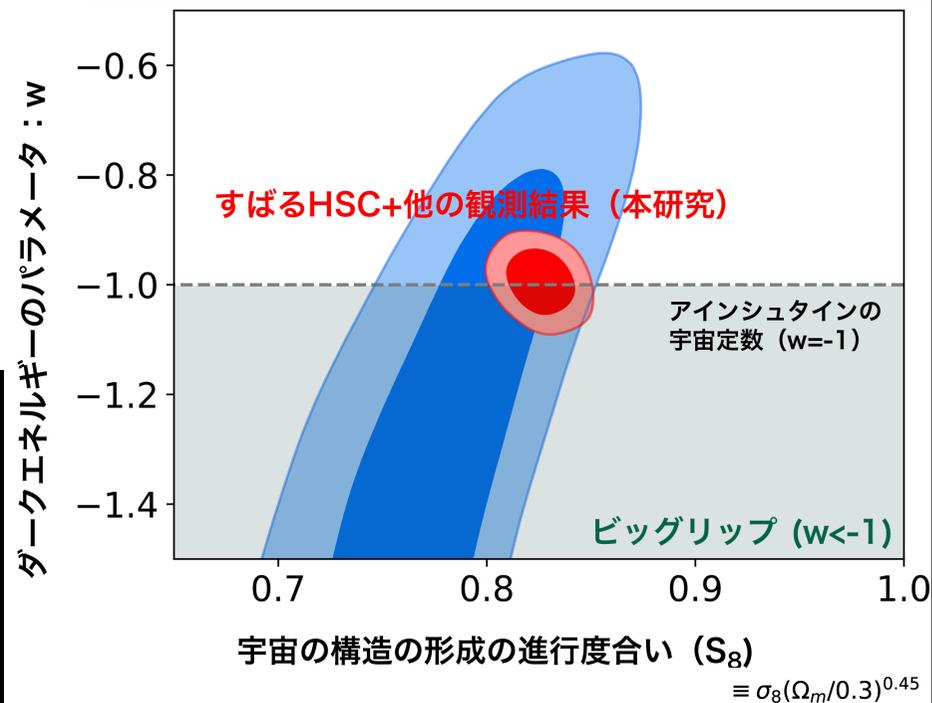
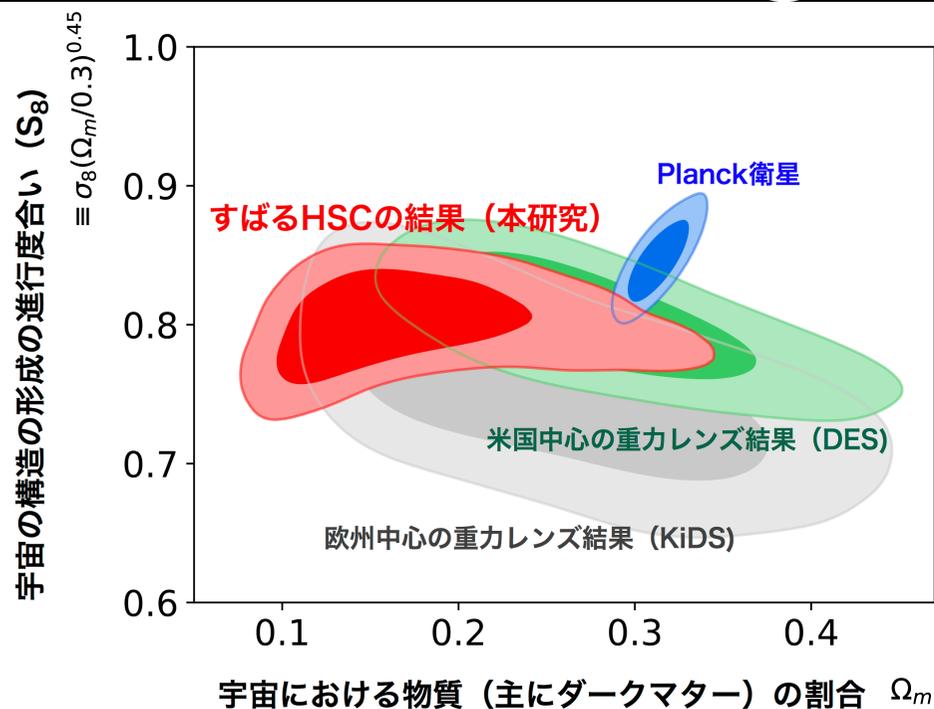
Auto- & cross power spectrum between multiple photo- z bins
(lensing tomography)

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

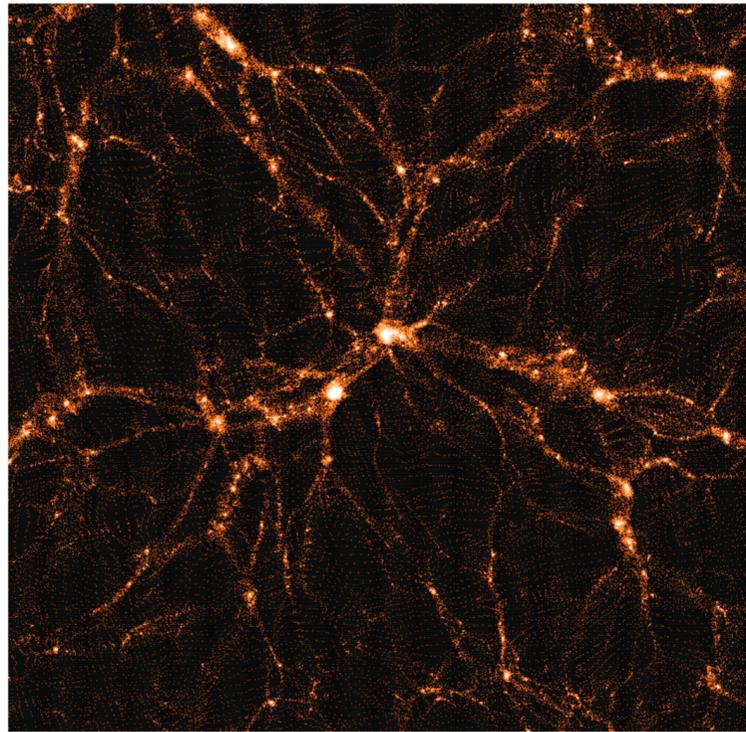
$$\left(e(\vec{\theta}) = \sum_{\ell, m} e_{\ell m} Y_{\ell m}(\vec{\theta}) \right)$$

Hikage et al. (arXiv:1809.09148)

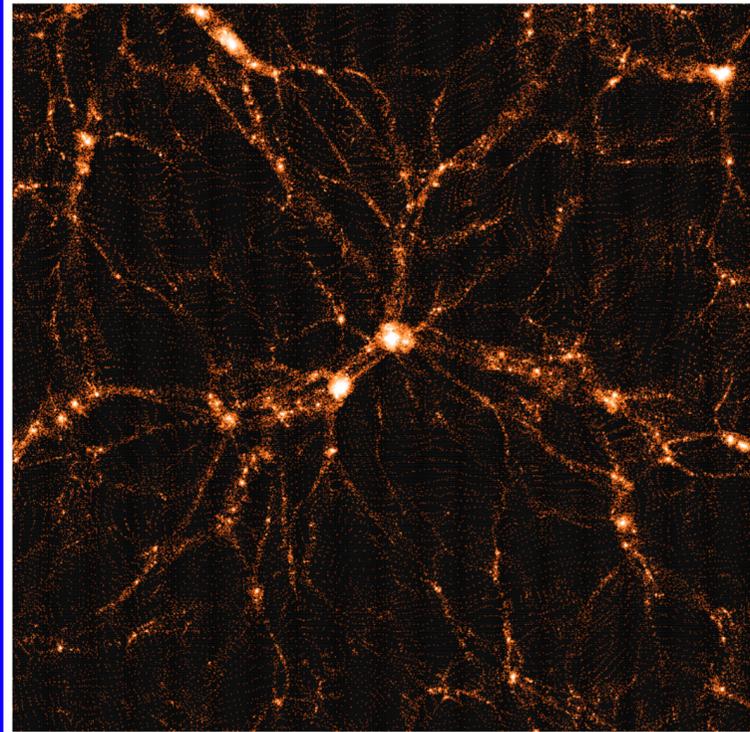
Cosmological constraint



**HSCデータが支持する宇宙
(シミュレーション)**



プランク衛星が支持する宇宙



クレジット：東京大学、Kavli IPMU 西道啓博特任助教提供)

現在稼働中・今後の観測

Multi-purpose ground- & space-based experiments

DES (2013~)

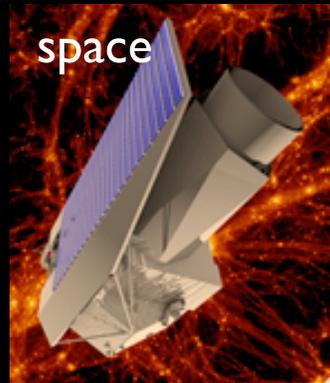


HETDEX (2016+)



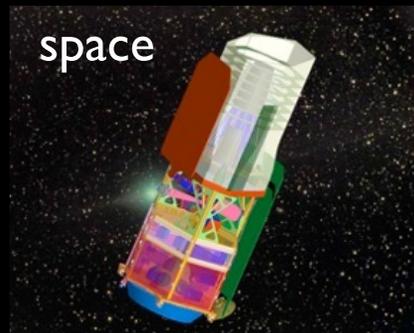
DESI
(2018+)

WFIRST
(2024++)



eBOSS (2014~)

Euclid (2020)



LSST
(2022++)

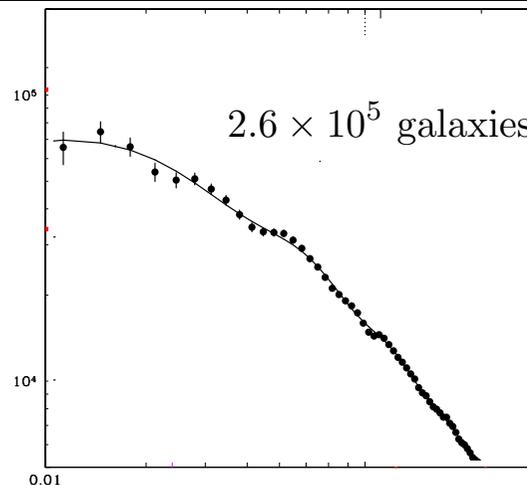
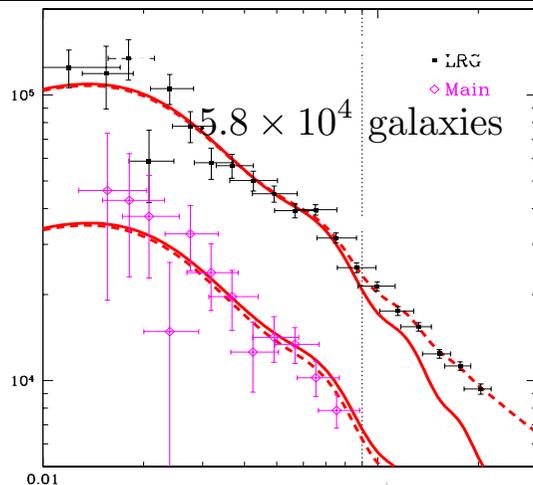
SuMIRe
(2014~)



subaru

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



$10^7 \sim 10^9$ galaxies

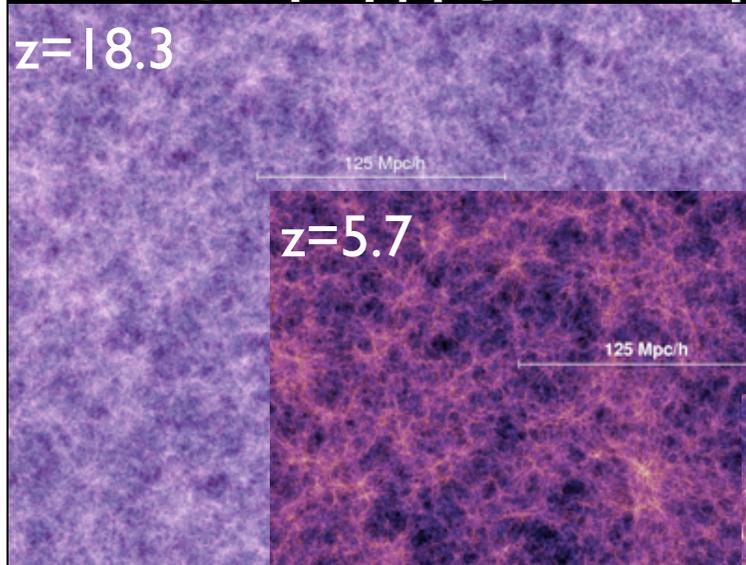
広がる可能性と理論・観測とのシナジー：

- 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

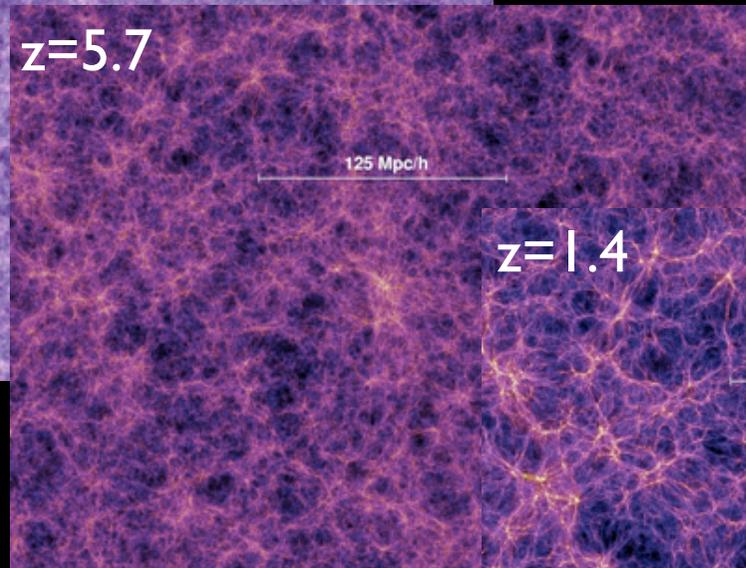
観測の精度とともに理論の精度向上も要求されている

宇宙論的N体シミュレーション

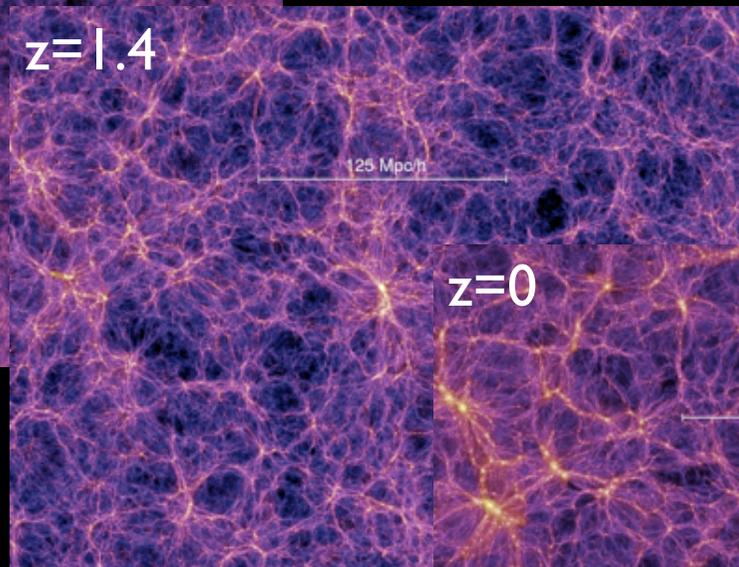
z=18.3



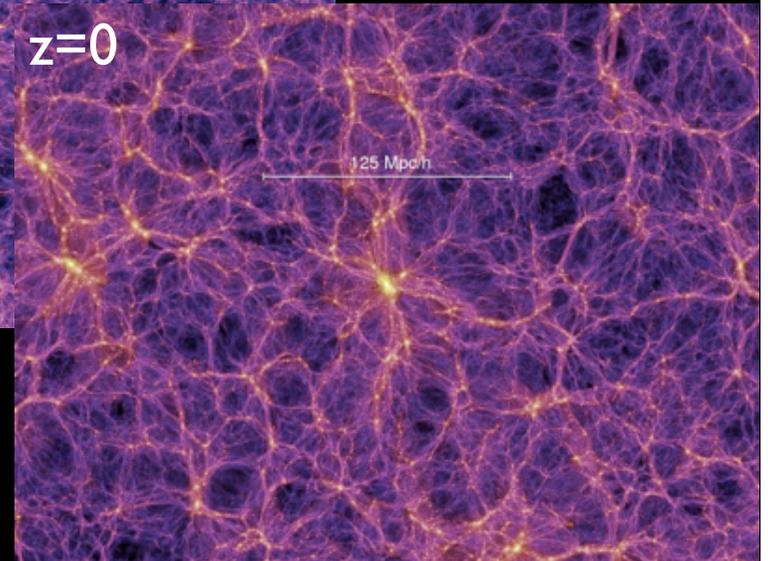
z=5.7



z=1.4



z=0



膨張宇宙における自己重力多体系

$N \rightarrow \infty$

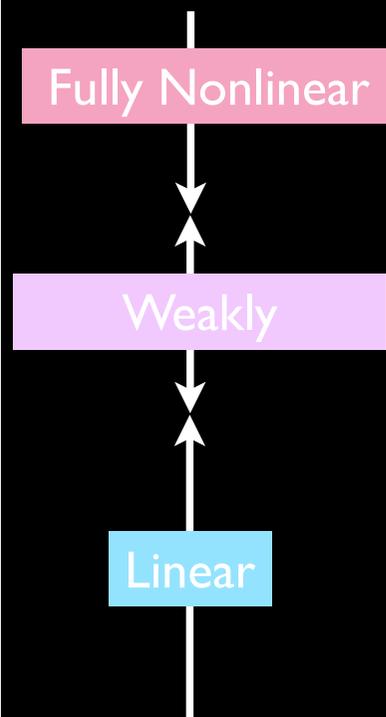
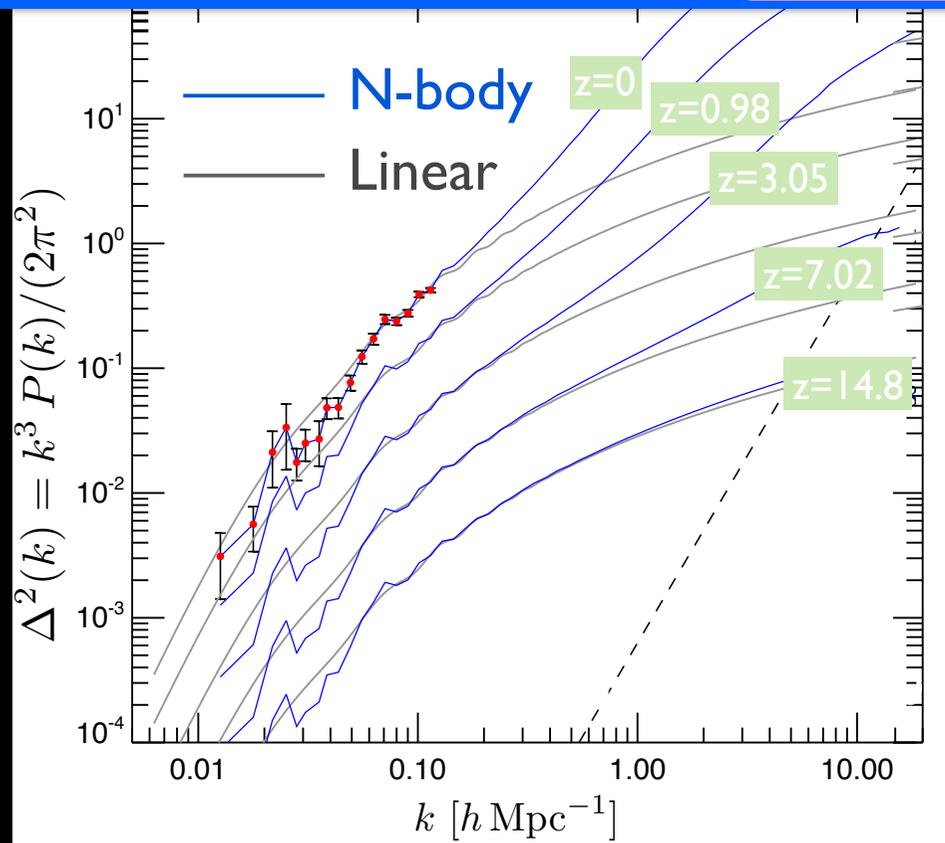
$$\frac{\vec{p}_i}{dt} = -\frac{Gm^2}{a} \sum_{j \neq i}^N \frac{\vec{x}_i - \vec{x}_j}{|\vec{x}_i - \vec{x}_j|^3} \quad \vec{p}_i = ma^2 \frac{d\vec{x}_i}{dt}$$

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

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

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



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

以下のサイトを参照

http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~atsushi.taruya/Lecture2018_YITP/lecture2018_yitp.html

宇宙論特論

日時: 2018年後期 水曜日 14:45--16:10

場所: 基礎物理学研究所 研究棟 K202

講義ノート: [PDF](#)

資料

概観: [PDF](#)

課題レポート