

2018年6月14日

セミナー@立教大学

# ゆがんだ宇宙の大規模構造： 宇宙論の新しいプロローブ

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)



# 概要

観測される宇宙の大規模構造に現れる「ゆがみ」を用いた宇宙論、その新しい様相

大規模構造の観測

赤方偏移空間ゆがみ

相対論的ゆがみ

まとめ



# 宇宙の大規模構造

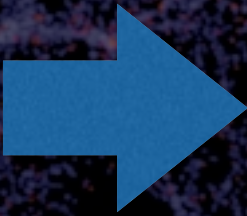
数ギガパーセクに渡って広がる質量分布の空間非一様性

≡  
3\*10<sup>9</sup> light years

コールドダークマターに占められている

(インフレーション時に生成)

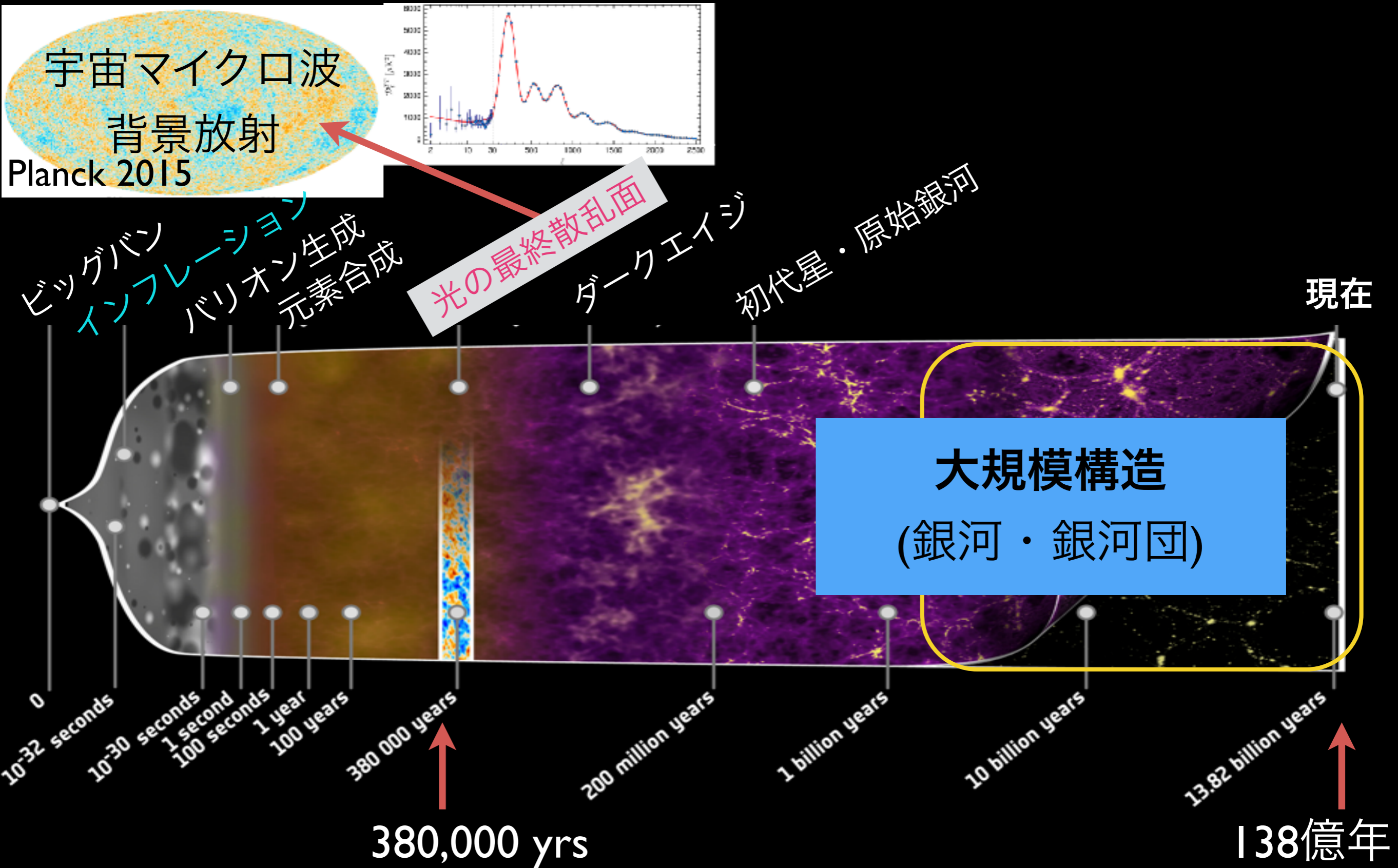
原始密度ゆらぎが宇宙膨張下で重力不安定性により成長

- 
- 豊富な宇宙論情報を有している
  - ポスト・プランク衛星の精密宇宙論研究を担う

加速膨張の性質・正体、宇宙のダークセクターの解明、...



# 宇宙の進化史





# 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 (チリ)



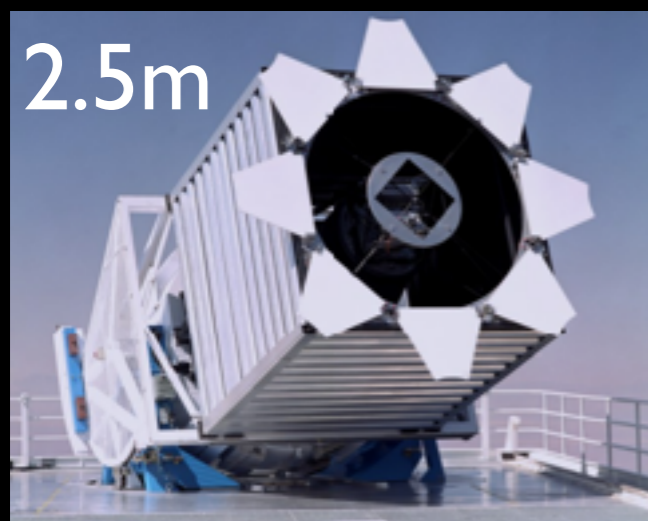
8.2m

すばる望遠鏡 (ハワイ)



3.6m

Canada-France-Hawaii Telescope (ハワイ)



2.5m

Sloan Digital Sky Survey @ APO (米・ニューメキシコ)



4m

Blanco telescope @ CTIO (チリ)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Very\\_Large\\_Telescope](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>





# 大論争 (1920年)

H. Shapley & H. Curtis

渦巻き星雲 (天の川銀河) の正体と宇宙の大きさについての公開討論会

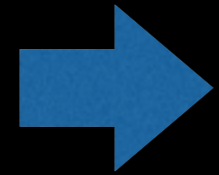
Shapley

天の川銀河は我々が知りうる宇宙の全て  
(アンドロメダ銀河は我々銀河の一部)

Curtis

アンドロメダや他の "星雲" は遠方の銀河、  
もしくは "島宇宙"

問題の解決に



距離 (指標)

を知ることが不可欠

(宇宙論では非自明な問題)



M31 (アンドロメダ)



# 赤方偏移

大規模構造の3次元構造を知る手がかり

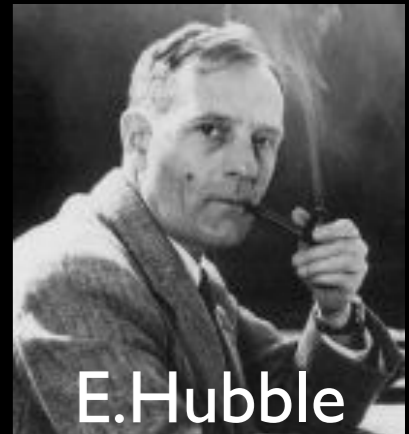
宇宙膨張により

遠方の銀河は近傍銀河に比べて「赤く」見える

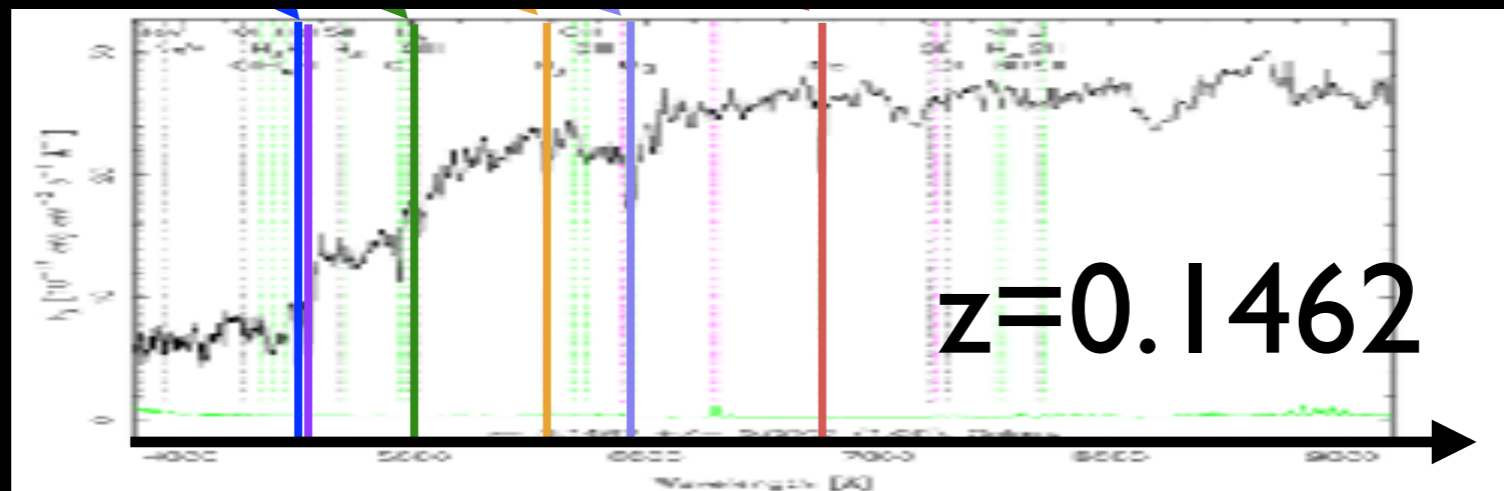
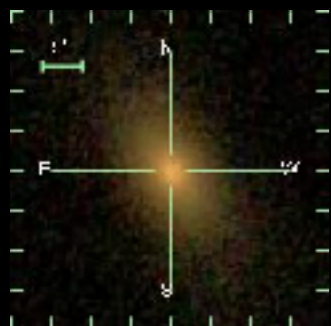
赤方偏移パラメーター  $z = \Delta\lambda / \lambda$

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)      H ハッブルパラメーター



遠方銀河

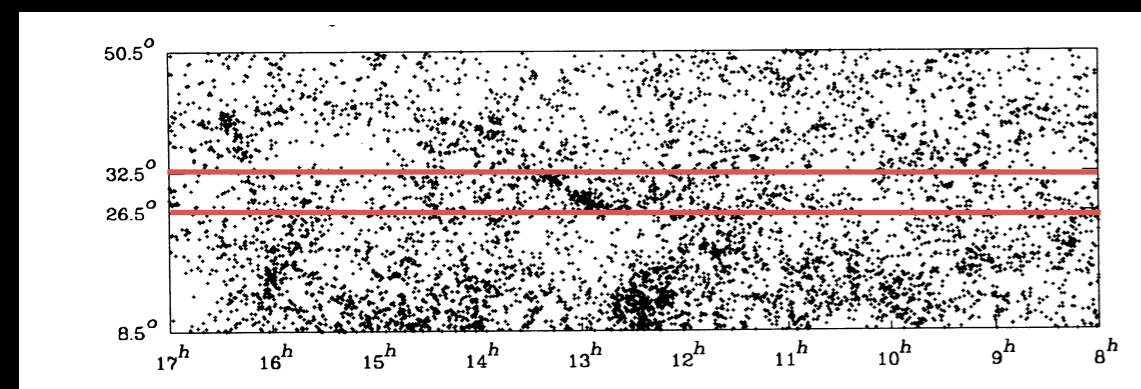
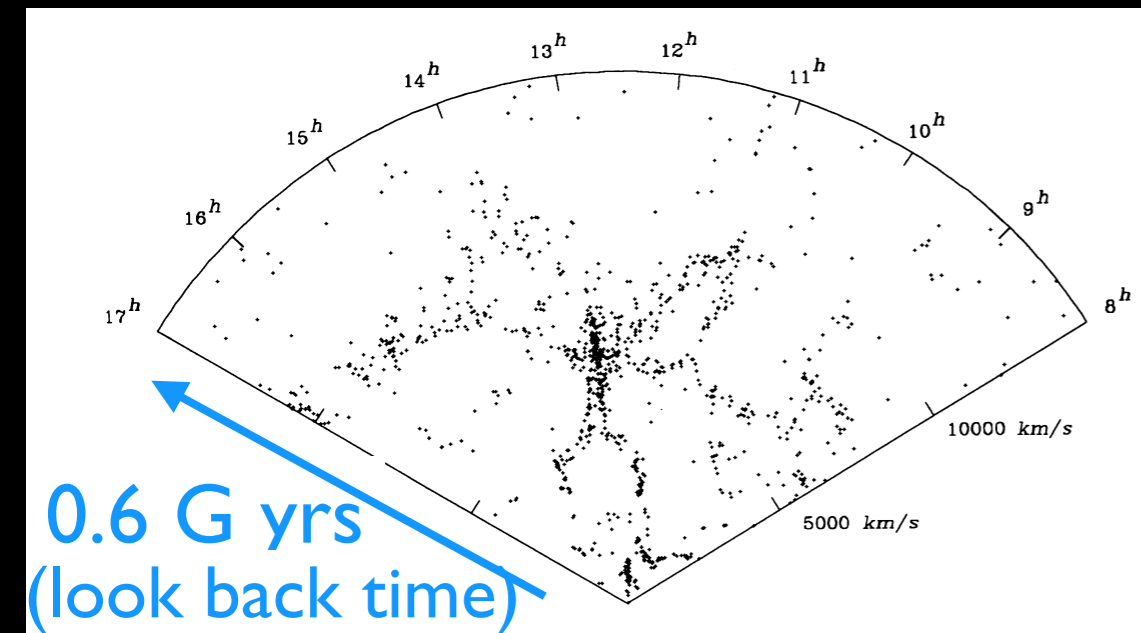


SDSS SkyServer



# 銀河一サベイ観測の黎明

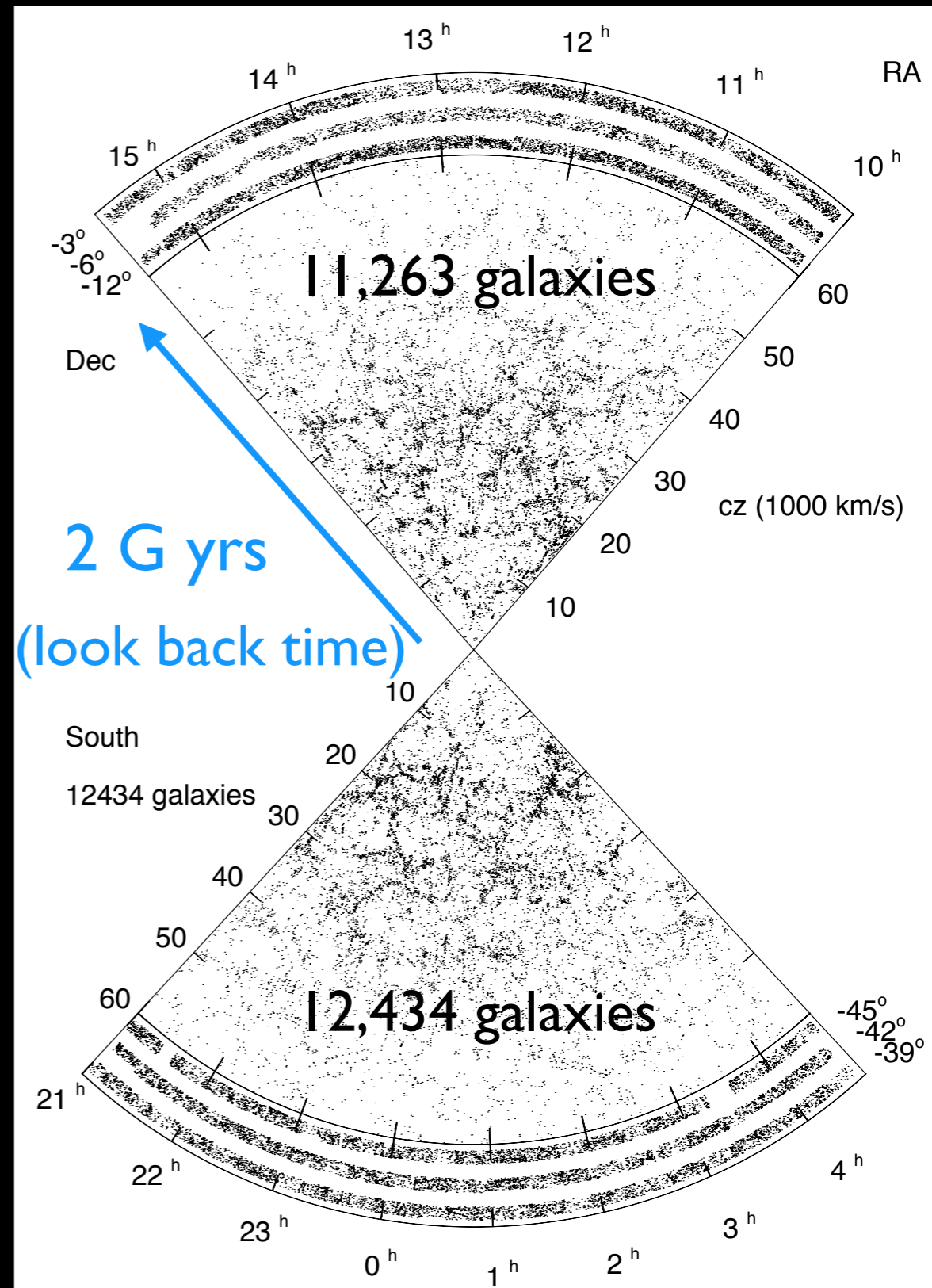
## CfA 銀河赤方偏移サーベイ



de Lapparant, Geller & Huchra ('86)

## Las Campanas 赤方偏移サーベイ

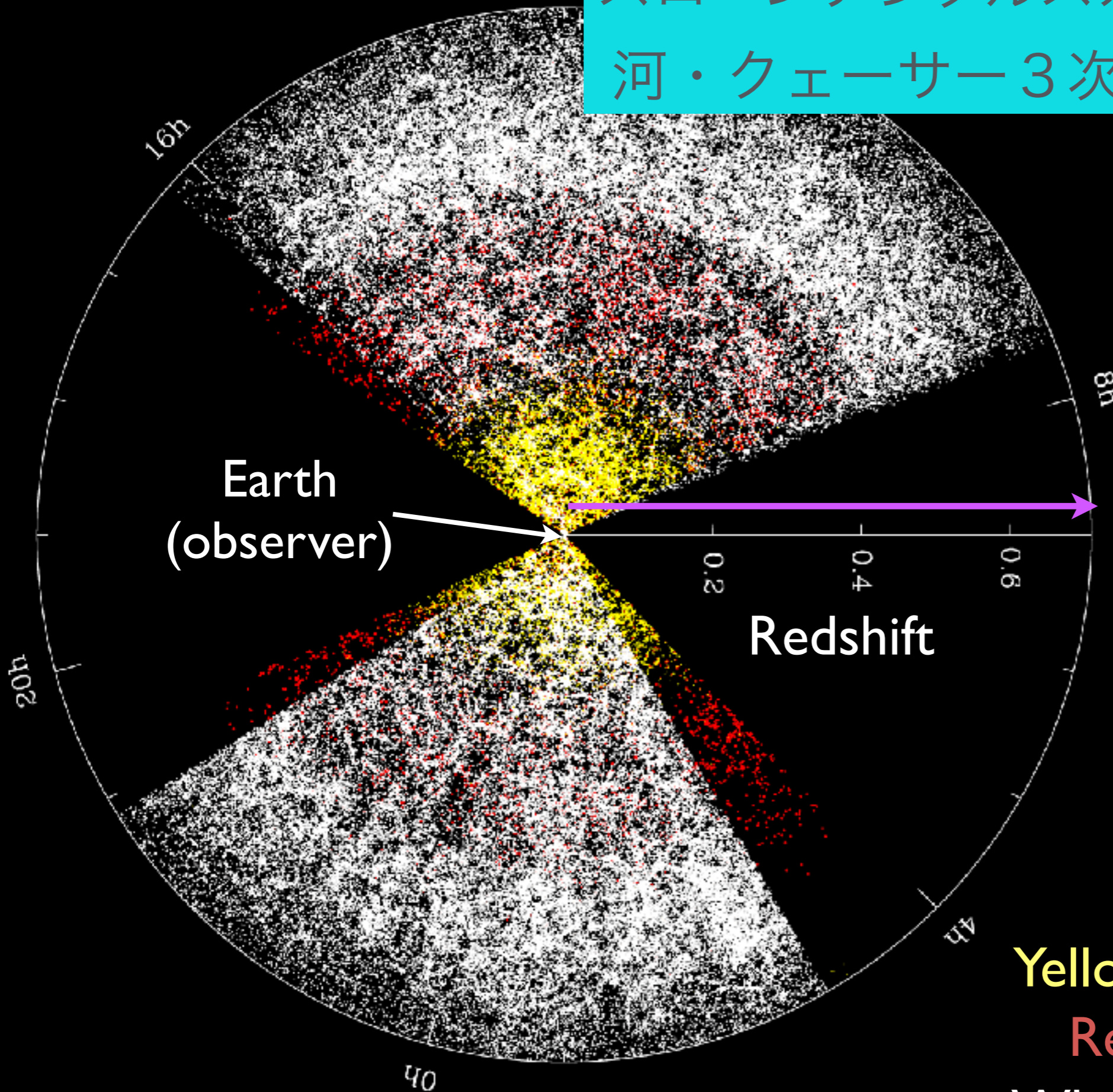
Shectmann et al. ('96)





スローンデジタルスカイサーベイIIIの銀河・クェーサー3次元地図のスライス

2011年時点  
(2014年終了)



6 G yrs  
(look back time)

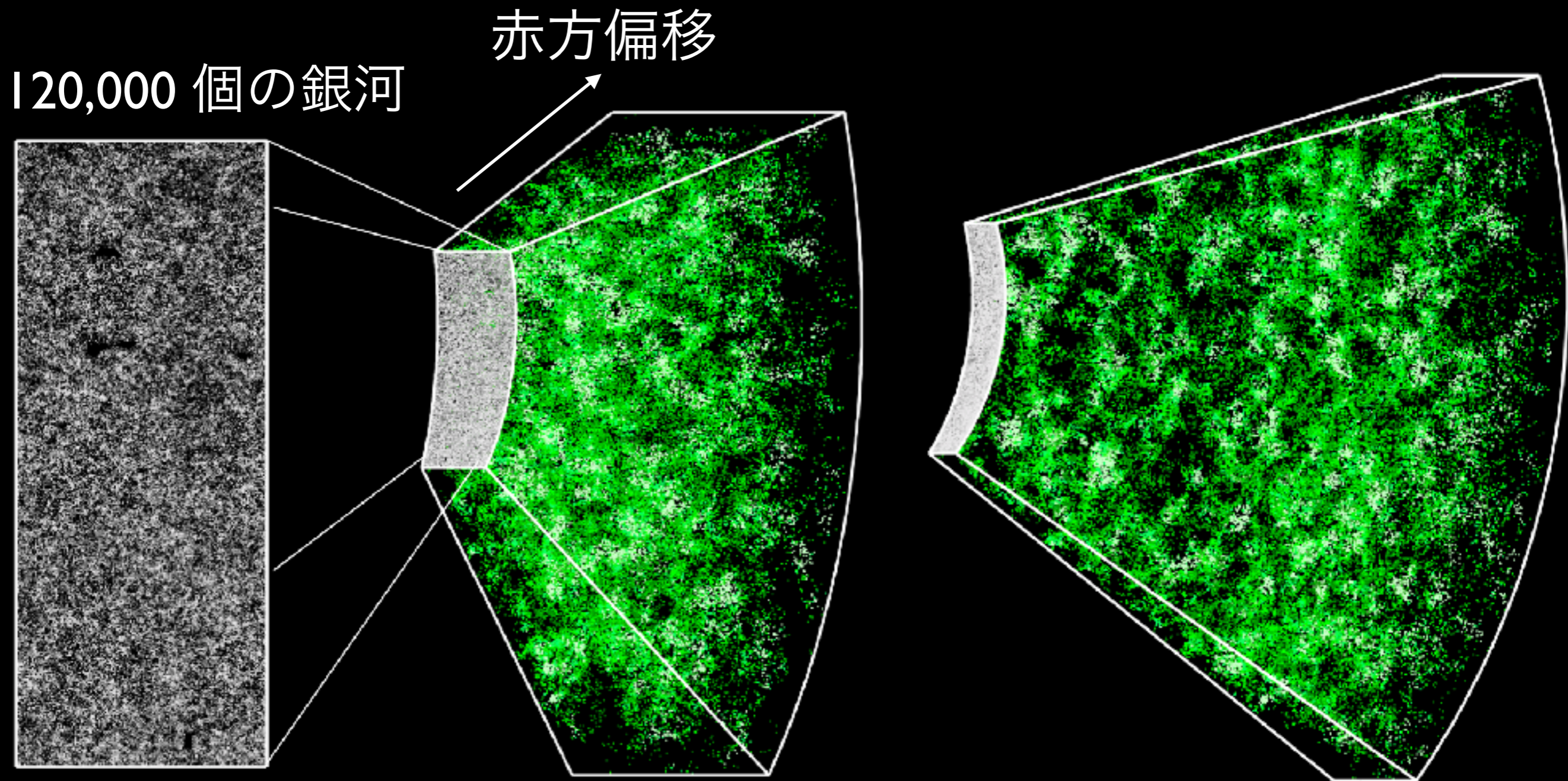
Yellow : SDSS-II main

Red : SDSS-II LRG

White : SDSS-II CMASS



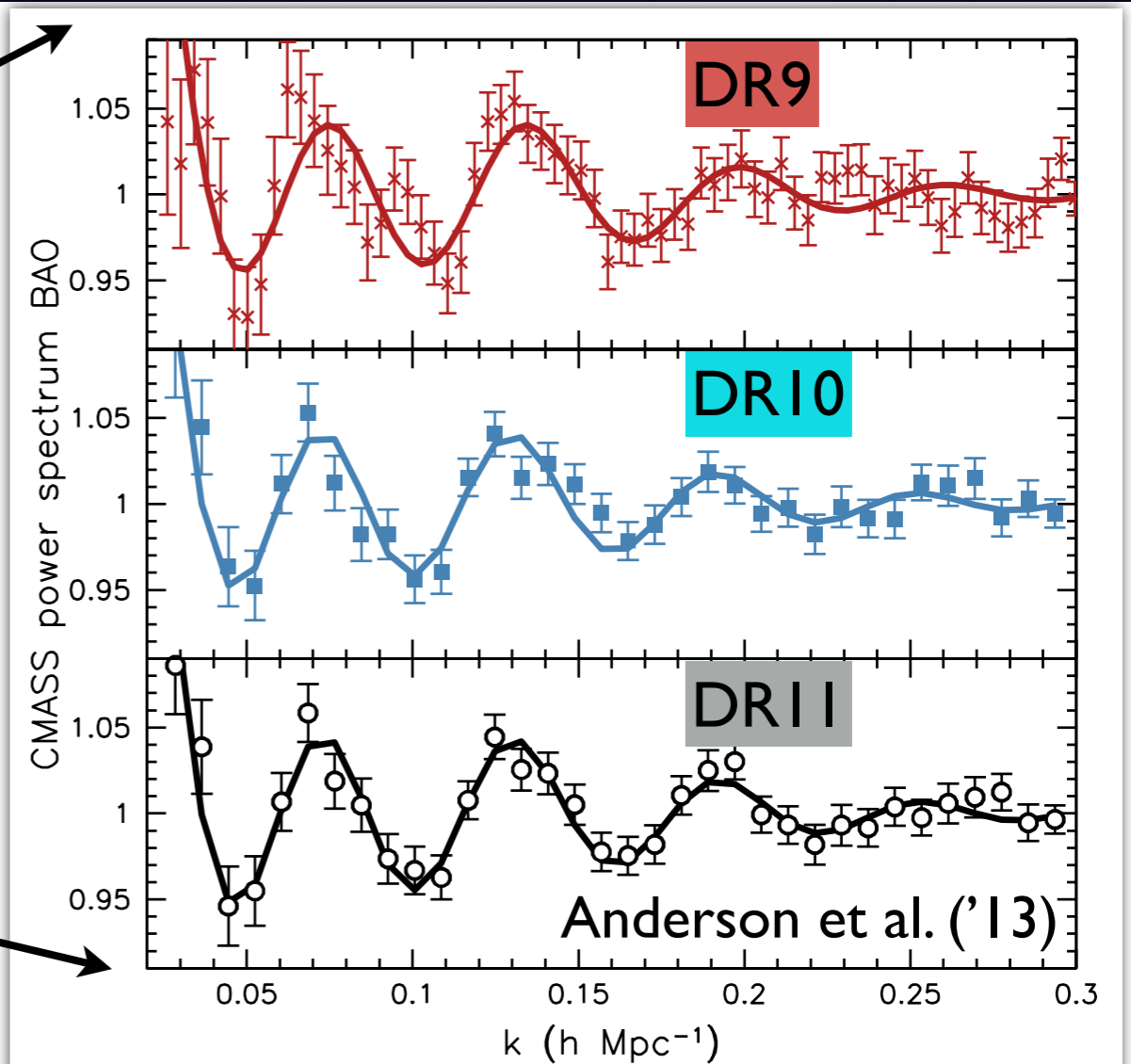
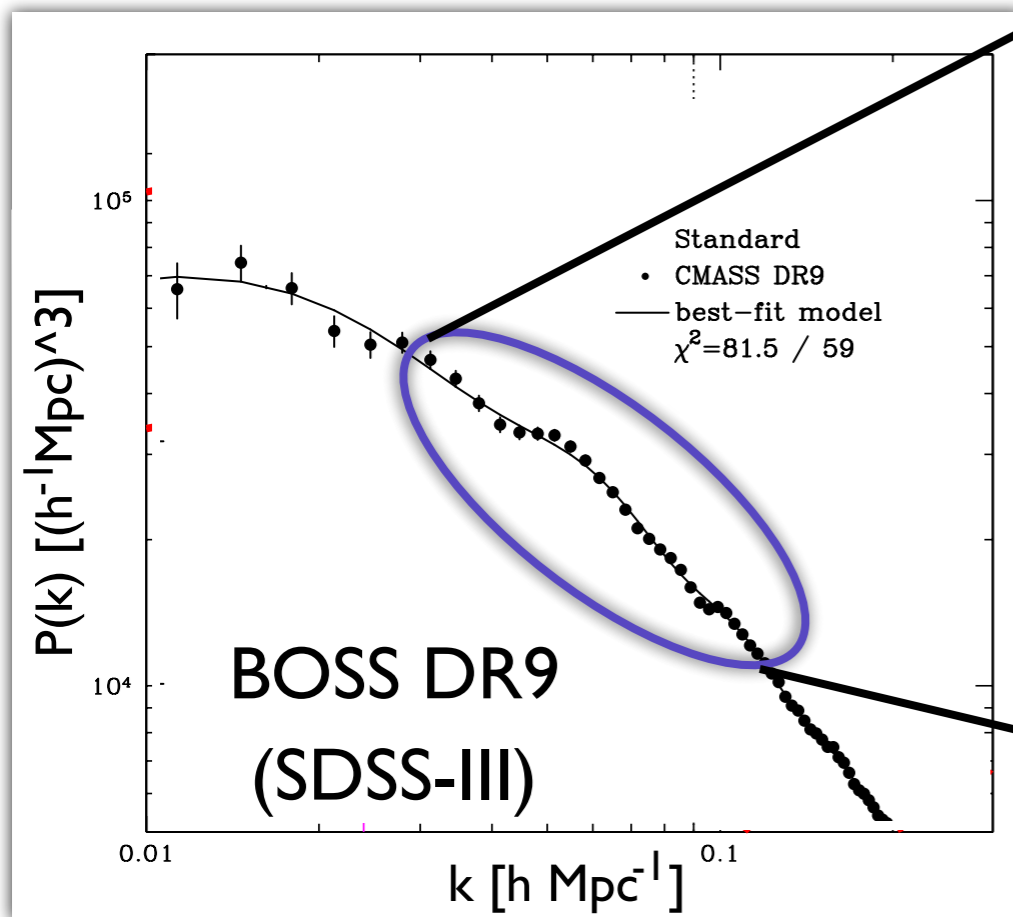
# 3次元地図の断面





# 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



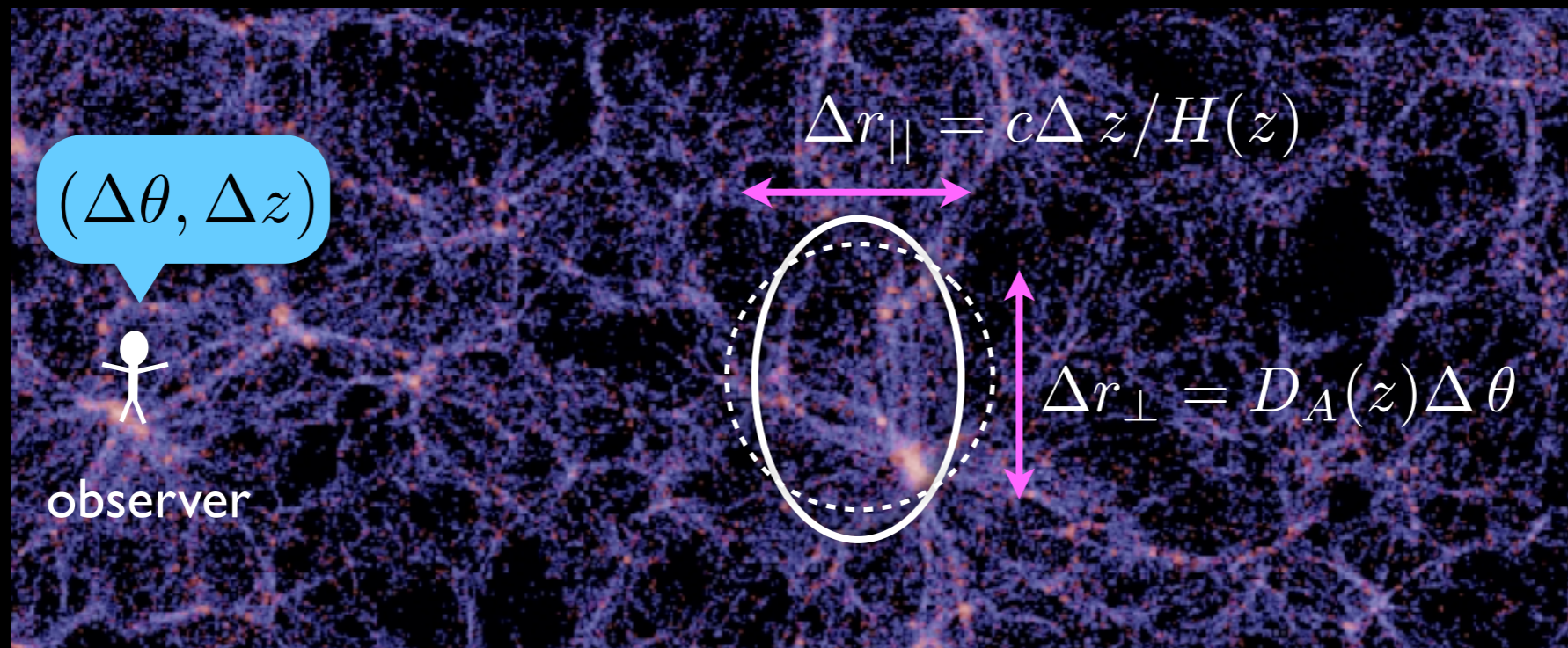


# 幾何学的ゆがみ

BAOの潜在的な能力を引き出す鍵

仮定した宇宙モデルがミスマッチしていると共動座標系の銀河分布が見かけ上ゆがむ（アルコック-パチンスキー効果）

→ 統計的な等方性が見かけ上破れる



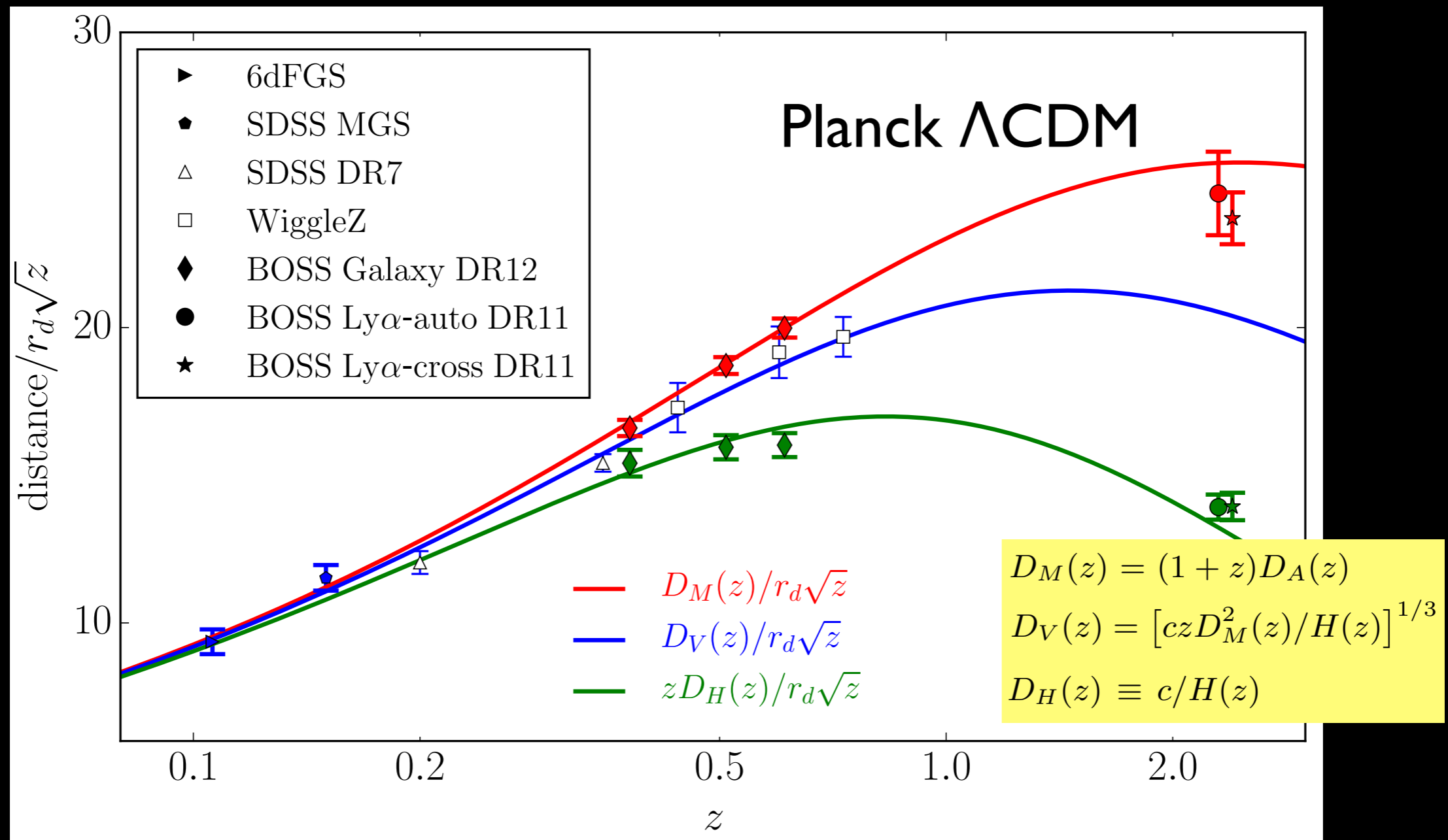
BAOを標準ものさしとして使えば

**$H(z)$**  &  **$D_A(z)$**  を銀河分布から同時に測定できる



# BAOを使った宇宙論的距離の制限

宇宙論的な距離は、宇宙膨張のパラメータに依存  
→ 加速膨張の精密診断に使える



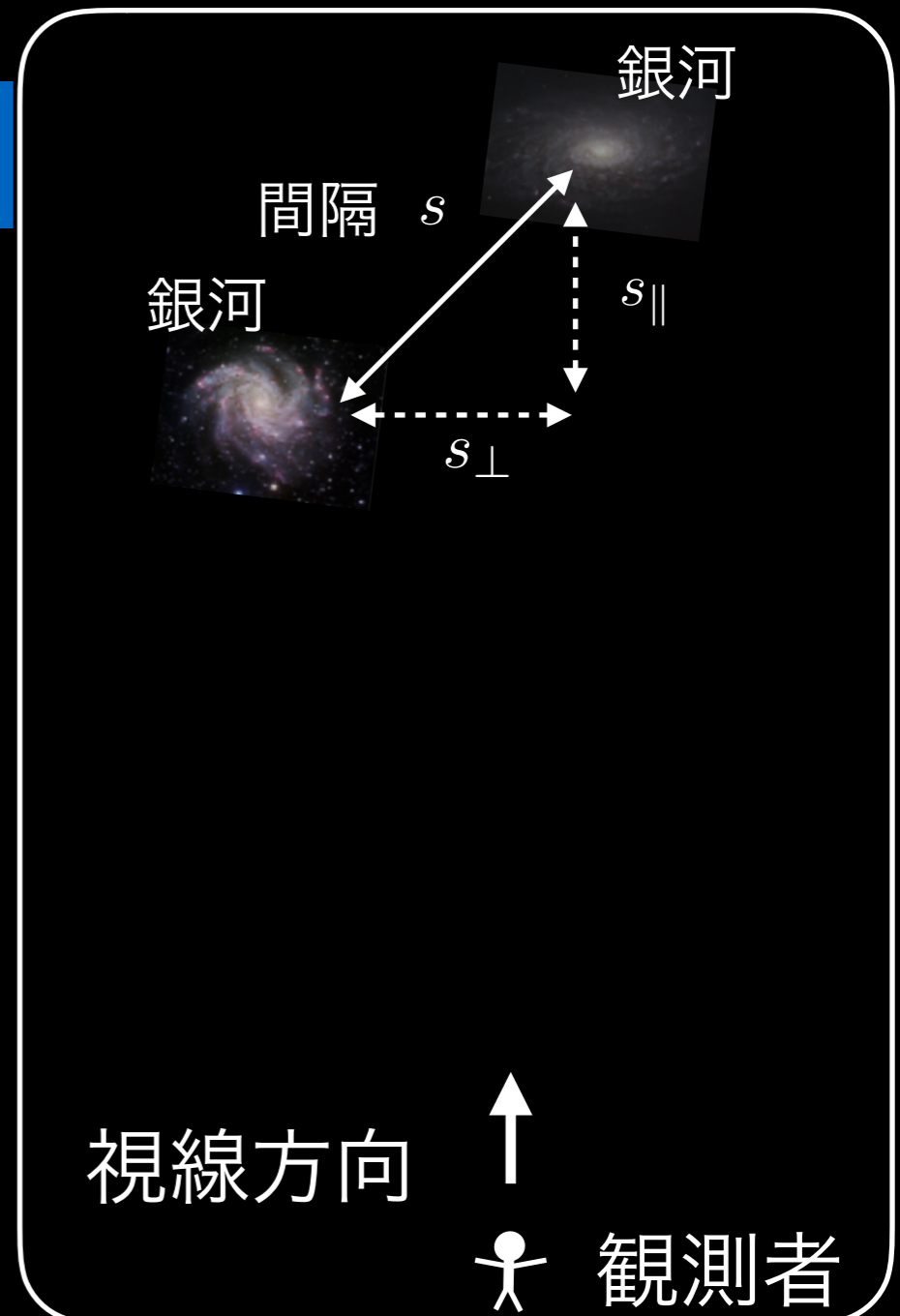
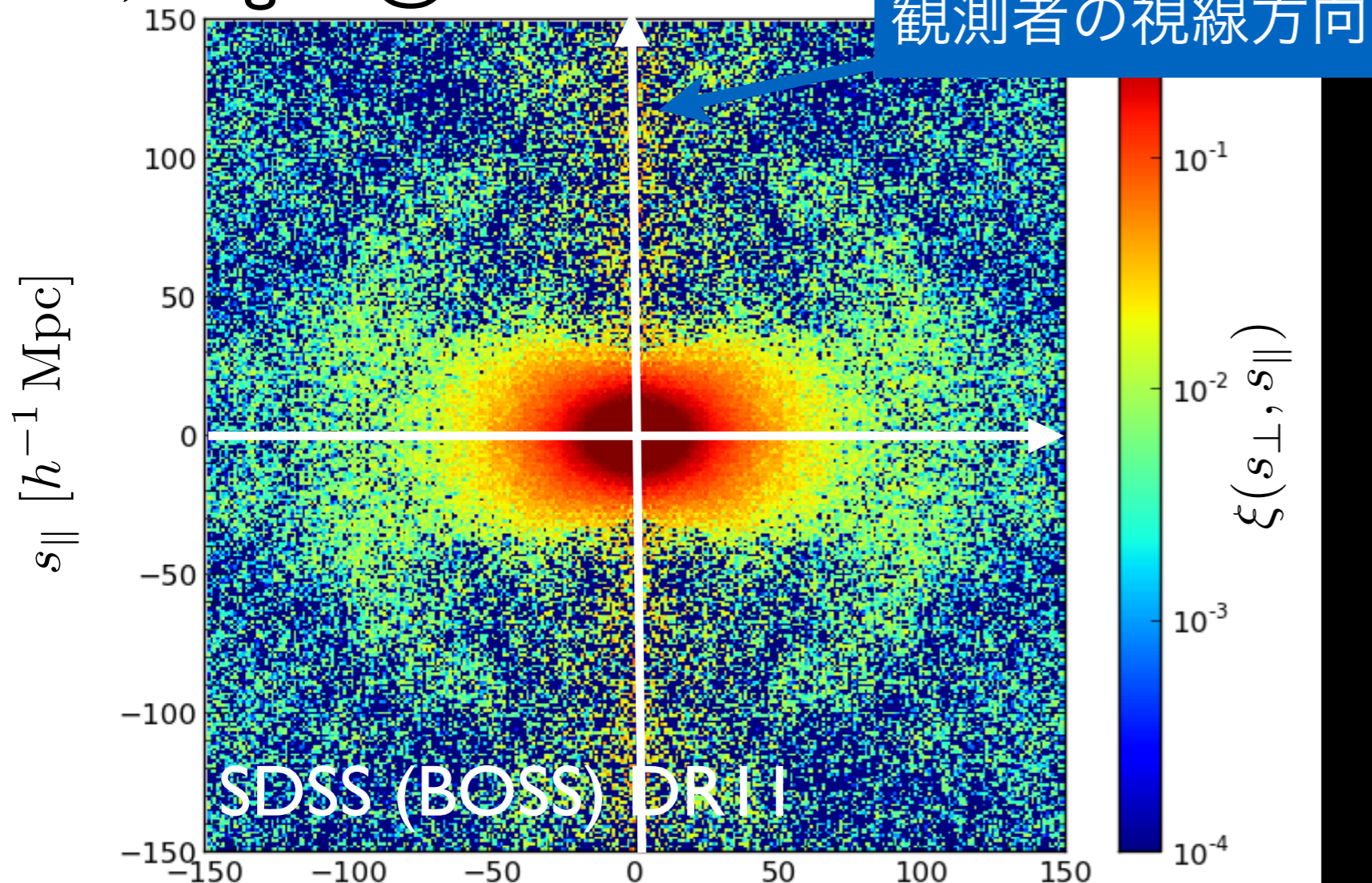


# 赤方偏移空間ゆがみ

(Redshift-space distortions, RSD)

(2点) 相関関数 = 銀河のペアをカウント → 特徴的な非等方性

700,000gals @  $0.43 < z < 0.7$



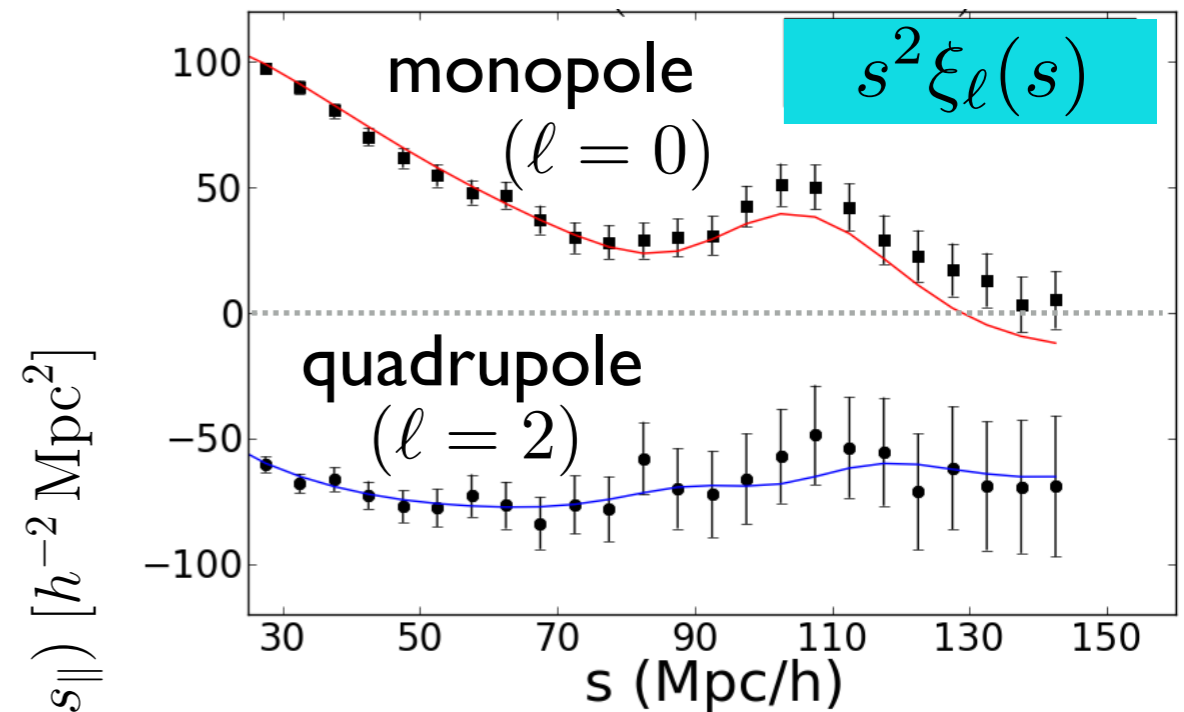
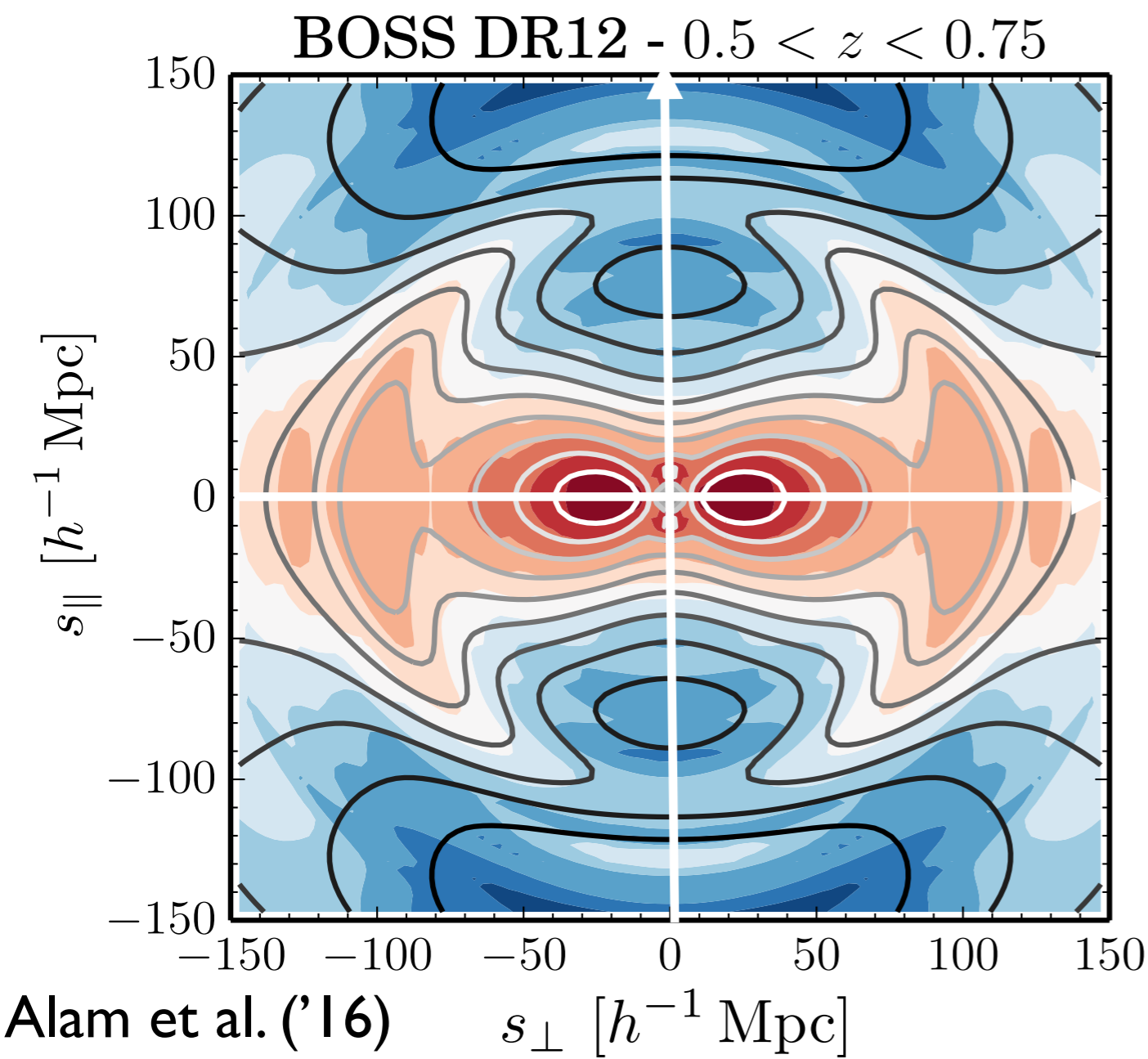
Samushia et al. (13)  $s_{\perp} [h^{-1} \text{Mpc}]$



# 赤方偏移空間ゆがみ

(Redshift-space distortions, RSD)

(2点) 相関関数 = 銀河のペアをカウント → 特徴的な非等方性



Satpathy et al. ('17)

$$\xi_{\ell}(s) = \frac{2\ell + 1}{2} \int_{-1}^1 d\mu \xi(s_{\perp}, s_{\parallel}) \mathcal{P}_{\ell}(\mu)$$

$$\mu = s_{\parallel} / s$$

$$s = (s_{\perp}^2 + s_{\parallel}^2)^{1/2}$$



# 非等方性の起源

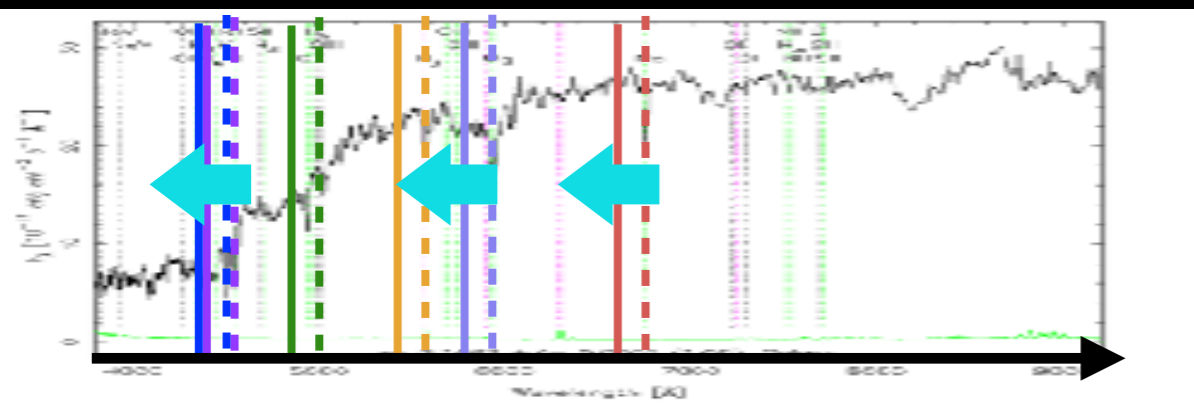
銀河の(視線方向の)特異速度場の影響が混入 (ドップラー効果)  
(赤方偏移は距離指標として完璧ではない)

宇宙論的赤方偏移に加え、

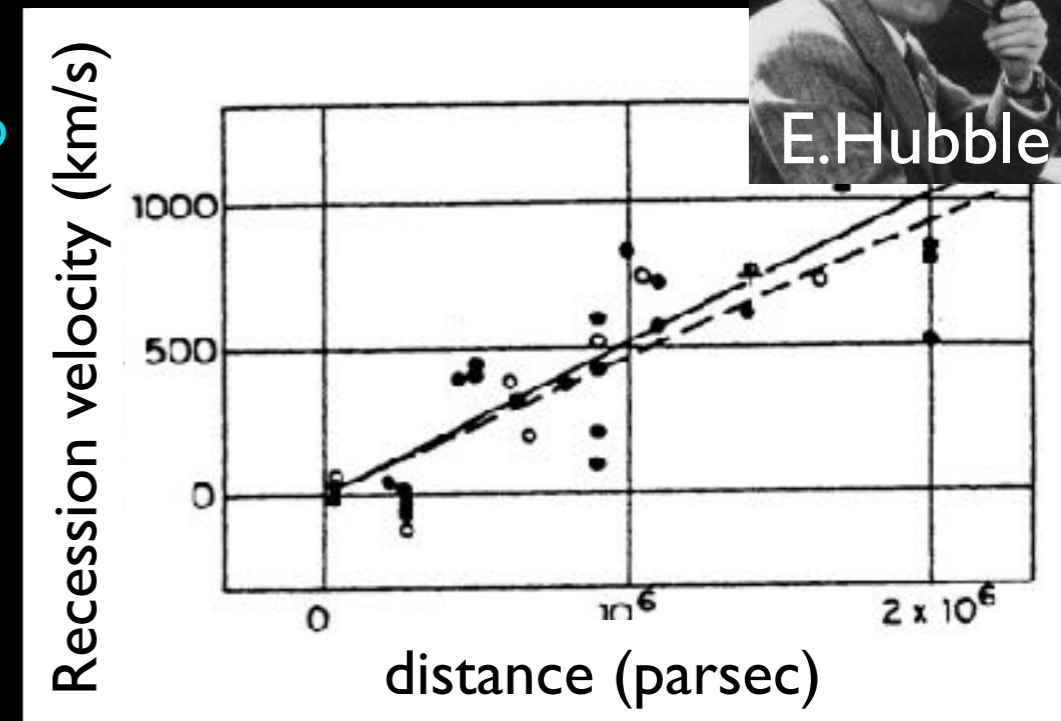
もし、銀河が我々目指して運動していると

銀河の分光スペクトル

やや青く見える



波長



ハッブルダイアグラムに見られるバラツキの原因

2点相関関数・パワースペクトルでは系統的効果として効く



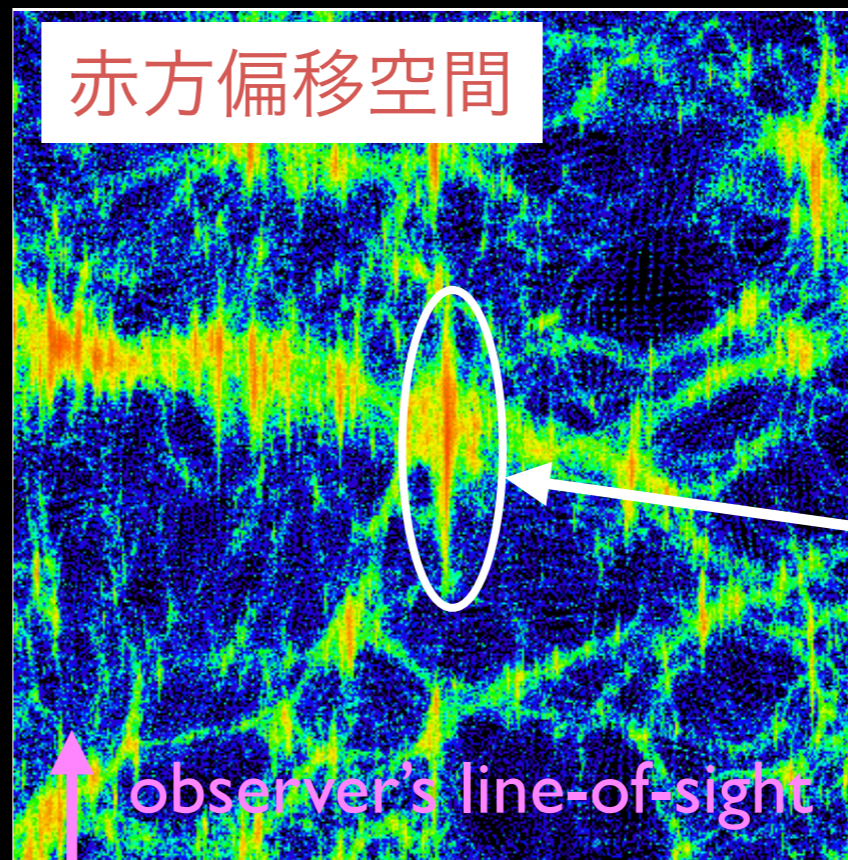
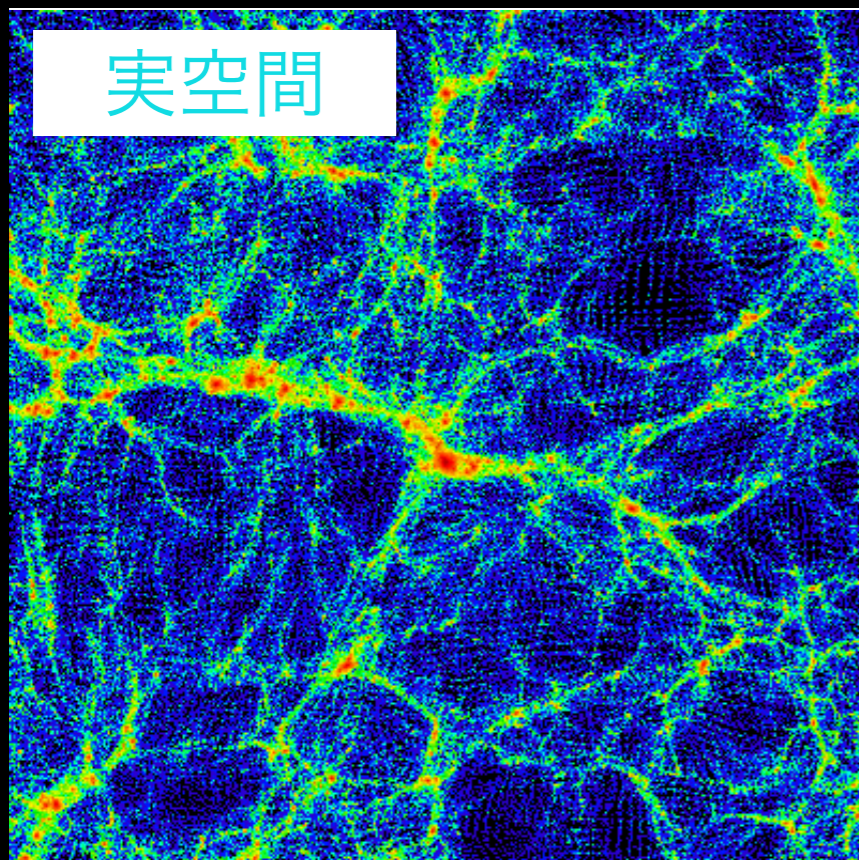
# 赤方偏移空間

観測者が定義する空間は‘実際’の空間とは違う

特殊相対論の最低次の効果 (i.e.,  $v/c \ll 1$ )

赤方偏移空間 (共動系)  $\vec{s} = \vec{r} + \frac{1+z}{H(z)} (\vec{v} \cdot \hat{z}) \hat{z}$  観測者の視線方向

実空間



N体シミュレーション (西道啓博)

Fingers-of-God effect



RSDは銀河のクラスタリング統計の解釈を複雑にする...



# カイザー公式

Kaiser ('87)

赤方偏移空間  
の密度場

$$\delta^{(S)}(\mathbf{s}) = \left| \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{x}} \right|^{-1} \{1 + \delta(\mathbf{s})\} - 1$$

質量密度の保存

$$\begin{aligned} \{1 + \delta^{(S)}(\mathbf{s})\} d^3 \mathbf{s} \\ = \{1 + \delta(\mathbf{r})\} d^3 \mathbf{r} \end{aligned}$$

$$\simeq \delta(\mathbf{r}) - \frac{(1+z)}{H(z)} \partial_z v_z \quad (\text{線形近似})$$

フーリエ変換

連続の式： $\dot{\delta} + \frac{1}{a} \nabla \cdot \mathbf{v} \simeq 0$   
(渦なし)

$$\delta^{(S)}(\mathbf{k}) = \left( 1 + \mu_k^2 \frac{d}{d \ln a} \right) \delta(\mathbf{k}) ; \quad \mu_k \equiv \hat{\mathbf{k}} \cdot \hat{\mathbf{z}} > 0$$

コヒーレントな

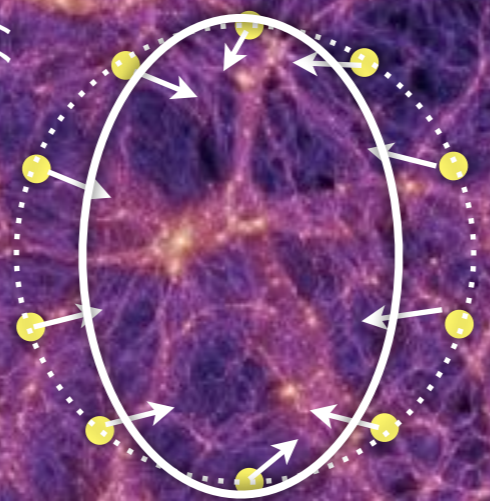
落下運動

視線方向

四重極的  
非等方性



観測者



視線方向に沿って密度場の  
振幅超過

# 重力のプローブ

カイザー  
公式

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

線形成長因子  
スケール因子

構造の成長率は重力の性質によって変わらうる

しかも

カイザー公式は重力理論とは無関係に成り立つ

宇宙論的大スケールで重力理論（相対論）を検証する手段

- $\Lambda$ CDMモデルの中で未だ検証されていない仮定
- 加速膨張の起源に迫る手がかり

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



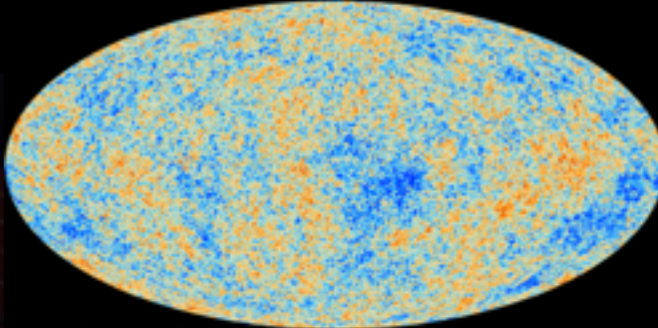
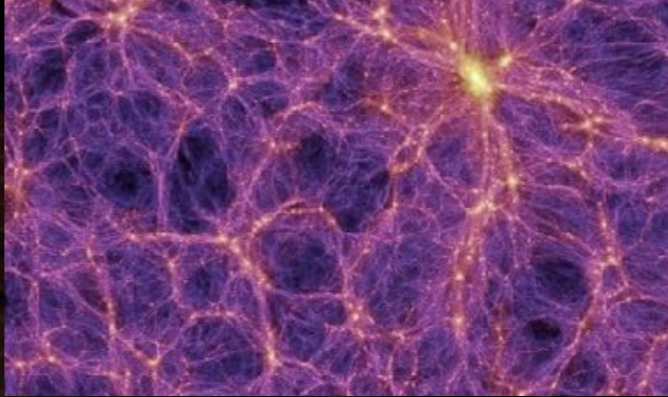
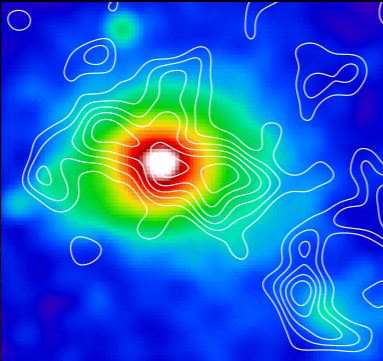
# 宇宙論的大スケールにおける重力

銀河

銀河団

銀河のクラスターリング

CMB



高密度

小スケール  
(~kpc)

構造形成の修正

大スケール  
(~Gpc)

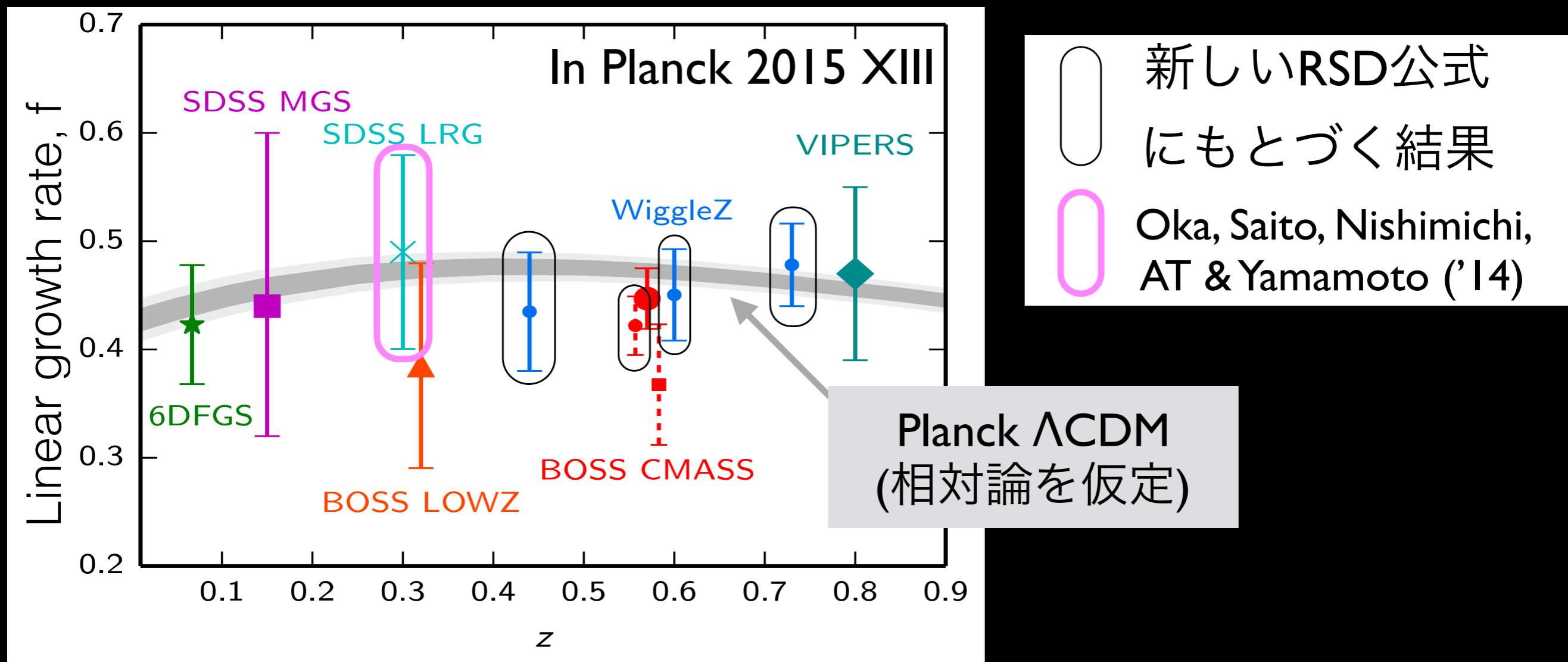
一般相対論を再現  
(重力スクリーニング)

スカラー自由度による  
第5の力の発現  
→ 加速膨張

修正重力を記述する理論的枠組みは十分すぎるほど発展した:  
f(R)重力、DGP、ホルンデスキー、ビヨンドホルンデスキー...

# 相対論のテスト

相対論 ( $\Lambda$ CDM) が正しいと仮定して構築した理論テンプレートと観測データを比較して、正しく成長率が求まるか？



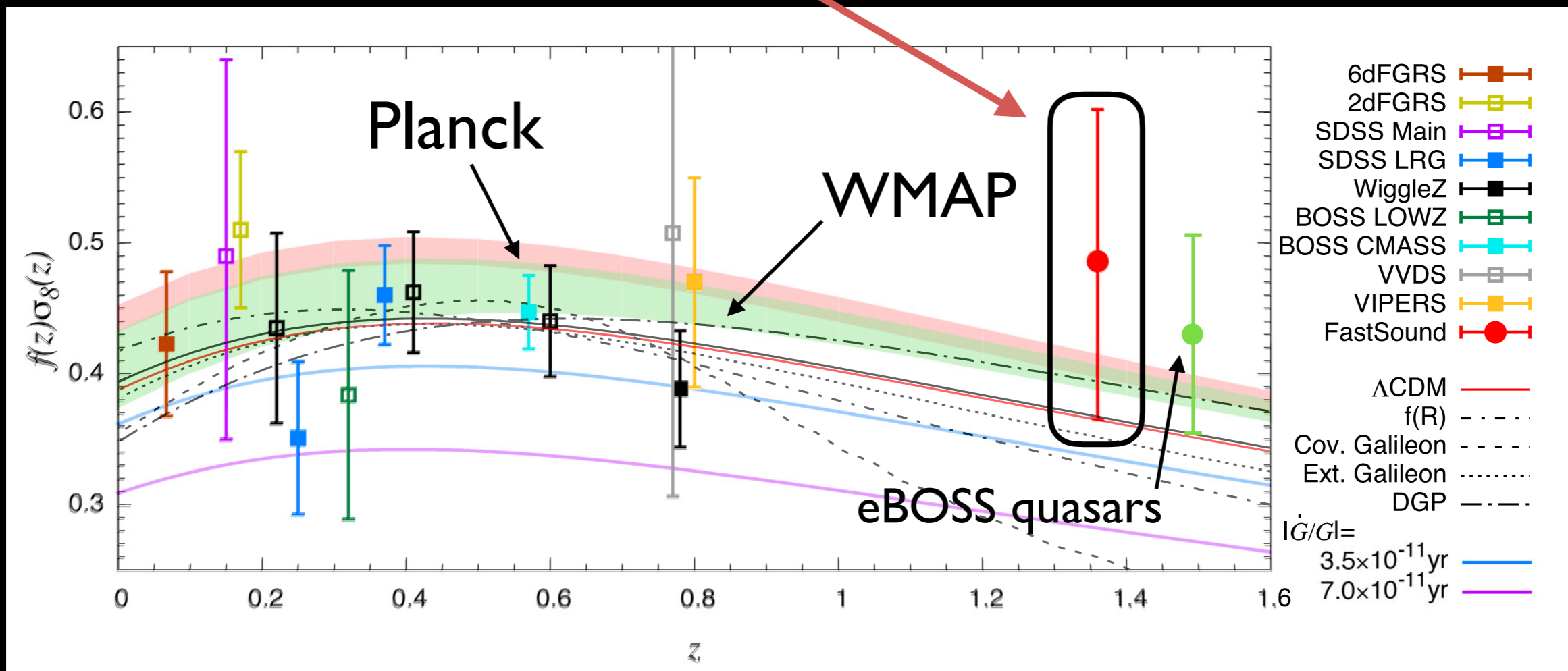
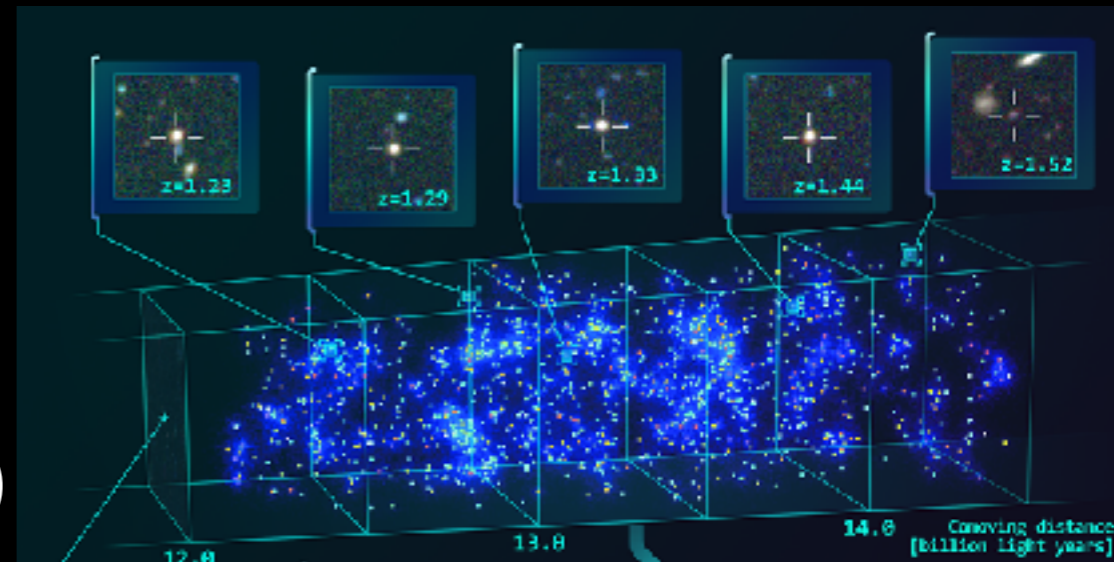
最近のデータ (BOSS DR12) でも新しいRSD公式が使われたが、相対論からの有意なずれは見つかっていない (Beutler, Seo, Saito et al. '16)



# 高赤方偏移での制限



$z \sim 1.4$  で2800個の輝線銀河を用いた  
RSD観測 (線形理論でよくフィット)



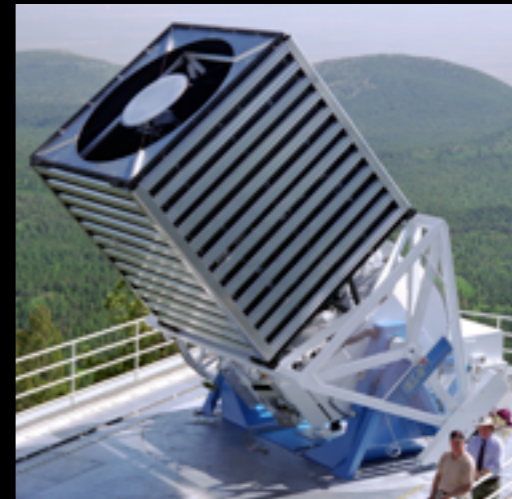
# Upcoming/on-going projects

Multi-purpose ground- & space-based experiments

DES (2013~)

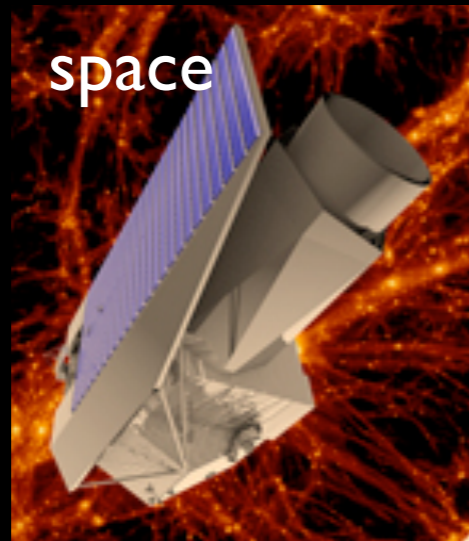


HETDEX (2016+)



DESI  
(2018+)

WFIRST  
(2024++)



eBOSS (2014~)

Euclid (2020)



LSST  
(2022++)



**SuMIRe**  
(2014~)





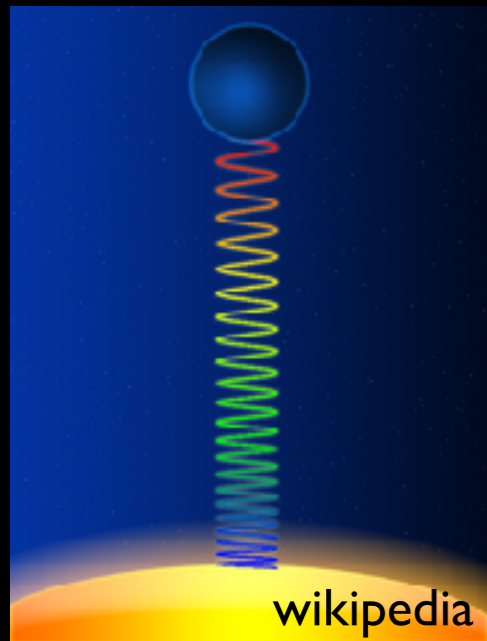
# 相対論的ゆがみ

大規模銀河サーベイによる高精度統計データは、

従来不可能だった**新しい相対論効果**の検出を可能にする

(かもしれない)

従来の赤方偏移空間ゆがみに加え、



横ドップラー効果

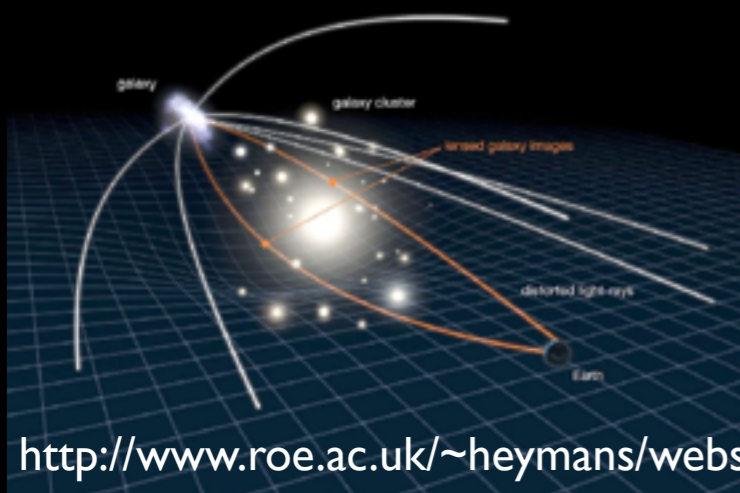
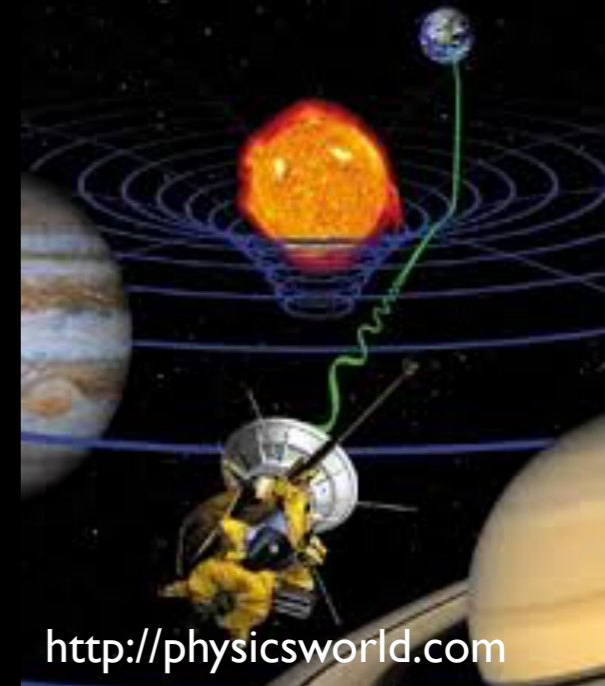
重力赤方偏移効果

積分ザックス-ヴォルフェ効果

弱重力レンズ効果

光円錐効果

シャピロ時間遅延効果



Yoo, Fitzpatrick & Zaldarriaga ('09);  
McDonald ('09); Yoo ('10), Challinor  
& Lewis ('11); Bonvin & Durrer ('11)

# 観測空間とは何か？

我々は観測量を本当に理解しているか？



摂動入りのフリードマン宇宙における光の経路を考える：

$$ds^2 = \left[ -(1 + 2\Psi/c^2)(c dt)^2 + a^2(t)(1 + 2\Phi/c^2)\delta_{ij}dx^i dx^j \right]$$

天体から観測者までを結ぶ光の測地線を解く：

Null geodesic :  $\frac{dk^a}{d\lambda} + \Gamma_{bc}^a k^b k^c = 0$      $k^a k_a = 0$      $k^a = \frac{dx^a}{d\lambda}$

Redshift :  $1 + z = \frac{(k_a u^a)_S}{(k_a u^a)_O}$      $u^a$     Observer/source's 4-velocity



# (相対論的) 赤方偏移空間

E.g., Challinor & Lewis ('11)

(光で見た) 観測者からの銀河の位置

$$\mathbf{s} = \mathbf{x} + \mathbf{n} \left\{ \frac{c}{H} \delta z - \frac{1}{c^2} \int_0^{\chi(z_{\text{obs}})} d\chi' (\Psi - \Phi) \right\} - \chi(z_{\text{obs}}) \boldsymbol{\alpha}$$

シャピロ時間遅延

$\mathbf{n}$  : 視線方向 (単位ベクトル)

$\chi$  : 共動距離

重力レンズ効果による光の折れ曲り:

天球面の位置

$$\vec{\theta}_{\text{obs}} = \vec{\theta}_{\text{source}} - \vec{\alpha} ; \quad \vec{\alpha} = -\frac{1}{c^2} \int_0^{\chi(z_{\text{obs}})} d\chi' \frac{\chi(z_{\text{obs}}) - \chi'}{\chi(z_{\text{obs}})} \nabla_{\perp} (\Psi - \Phi)$$

曲がり角

特殊・一般相対論的な光のエネルギーシフト

赤方偏移

For rest-frame observer

$$z = z_{\text{obs}} - \delta z ;$$

横ドップラー

$$\delta z = (1 + z_{\text{obs}}) \left\{ \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_s}{c} - \frac{\Psi_s}{c^2} + \frac{1}{2} \frac{v_s^2}{c^2} - \frac{1}{c^2} \int_{t_s}^{t_o} dt' (\dot{\Psi} - \dot{\Phi}) \right\}$$

standard RSD

(古典ドップラー)

重力赤方偏移

積分ザックス-ヴォルフエ

# オーダー評価

効果	$\frac{\delta z}{1+z}$	[km/s]
Standard RSD (古典ドップラー)	$O(>10^{-3})$	$O(>10^2)$
重力赤方偏移	$O(10^{-5})$	$O(1)$
横ドップラー	$O(10^{-5})$	$O(1)$
積分ザックス-ヴォルフエ	$O(<10^{-5})$	$O(<1)$
		e.g., Cai et al. ('16); Sakuma et al. ('17)
重力レンズの曲がり角	$O(10^{-3})$ rad ~ $O(1)$ arcmin	(コヒーレンス: few deg or ell~100)
シャピロ時間遅延	$O(1)$ Mpc	(コヒーレンス: 100 deg or ell~2)
		e.g., Hu & Cooray ('01); Lewis & Challinor ('06)



# 相対論的ゆがみのシミュレーション

M-A. Breton, Y. Raseria, AT, O. Lacombe & S. Saga  
arXiv:1803.04294

標準的なN体コード(RAMSES)から

➡ ダークマター・ハロー分布のスナップショット

- 光円錐上の重力ポテンシャルデータを保存
- 光の測地線方程式を観測者から天体（ハロー）に向けて逆解きする（ただし $\Phi = \Psi$ を仮定）

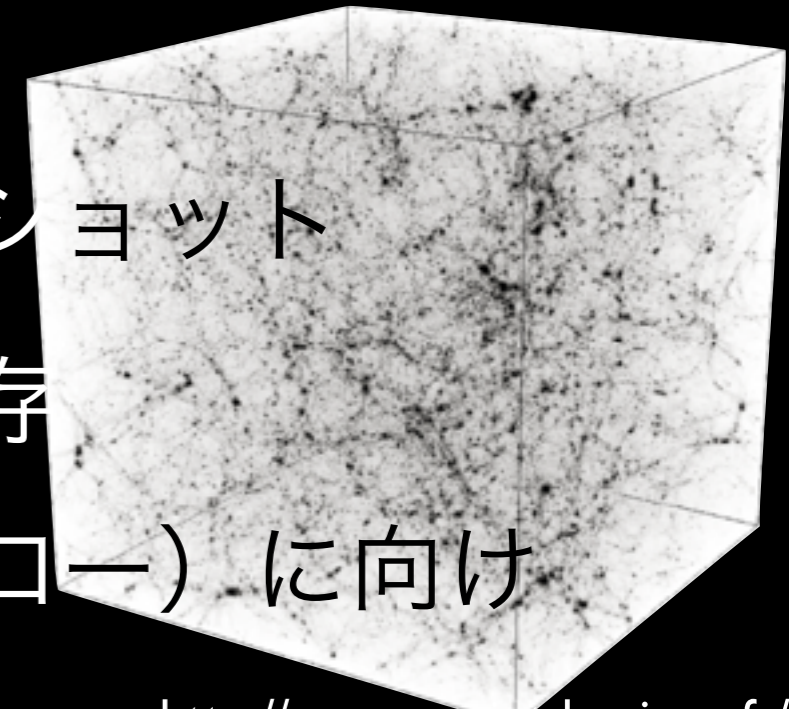
➡ ゆがんだ天球面の位置 & 赤方偏移：

$$1 + z = \frac{(g_{\mu\nu} k^\mu u^\nu)_s}{(g_{\mu\nu} k^\mu u^\nu)_o}$$

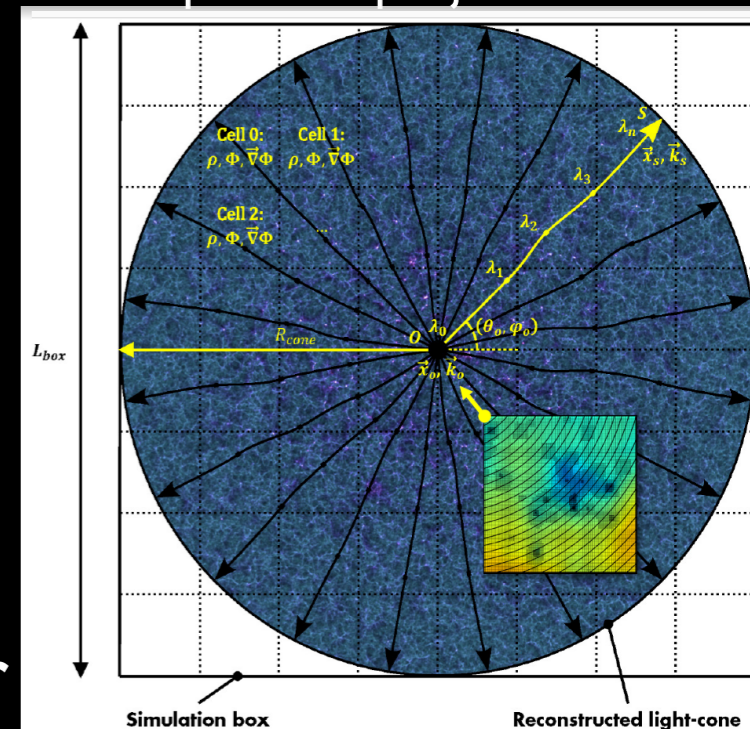
弱場近似の下で考えられる

相対論的効果全てが入る

$k^\mu$  : null 4-vector       $u^\mu$  : observer's or source's 4-vector



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



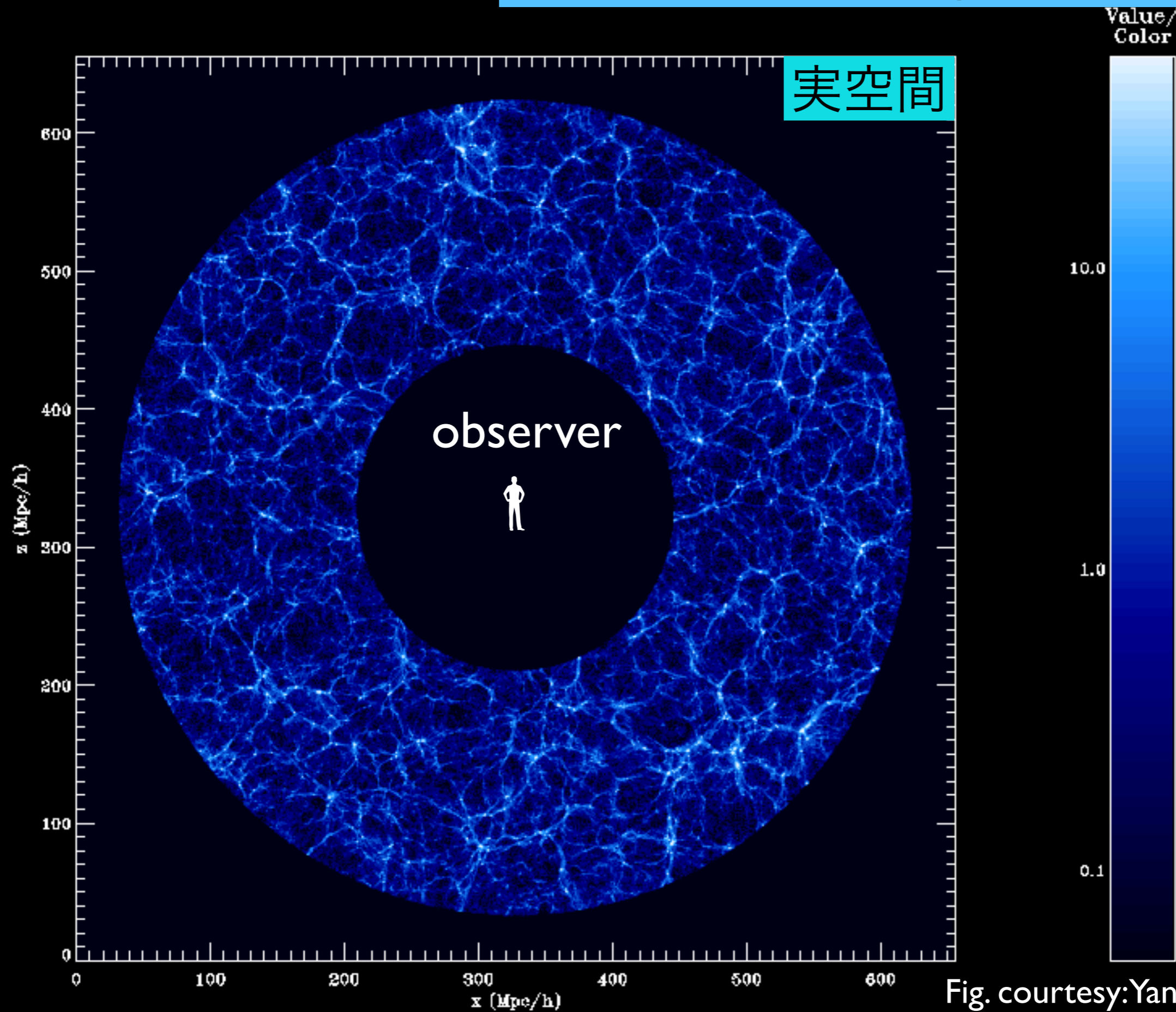
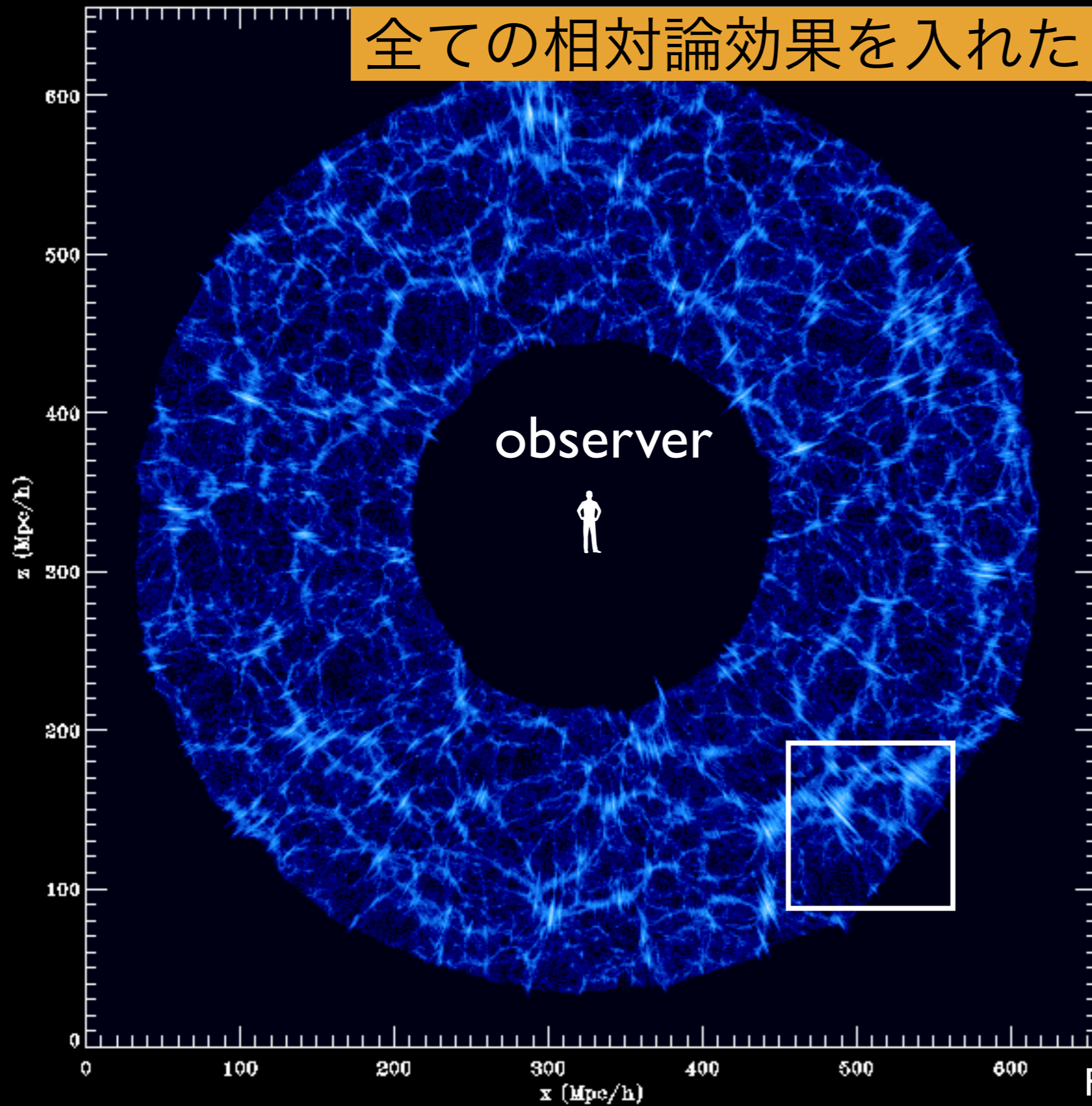


Fig. courtesy: Yann Rasera, based on the data by Michel-Andres Breton



全ての相対論効果を入れた



Value/  
Color

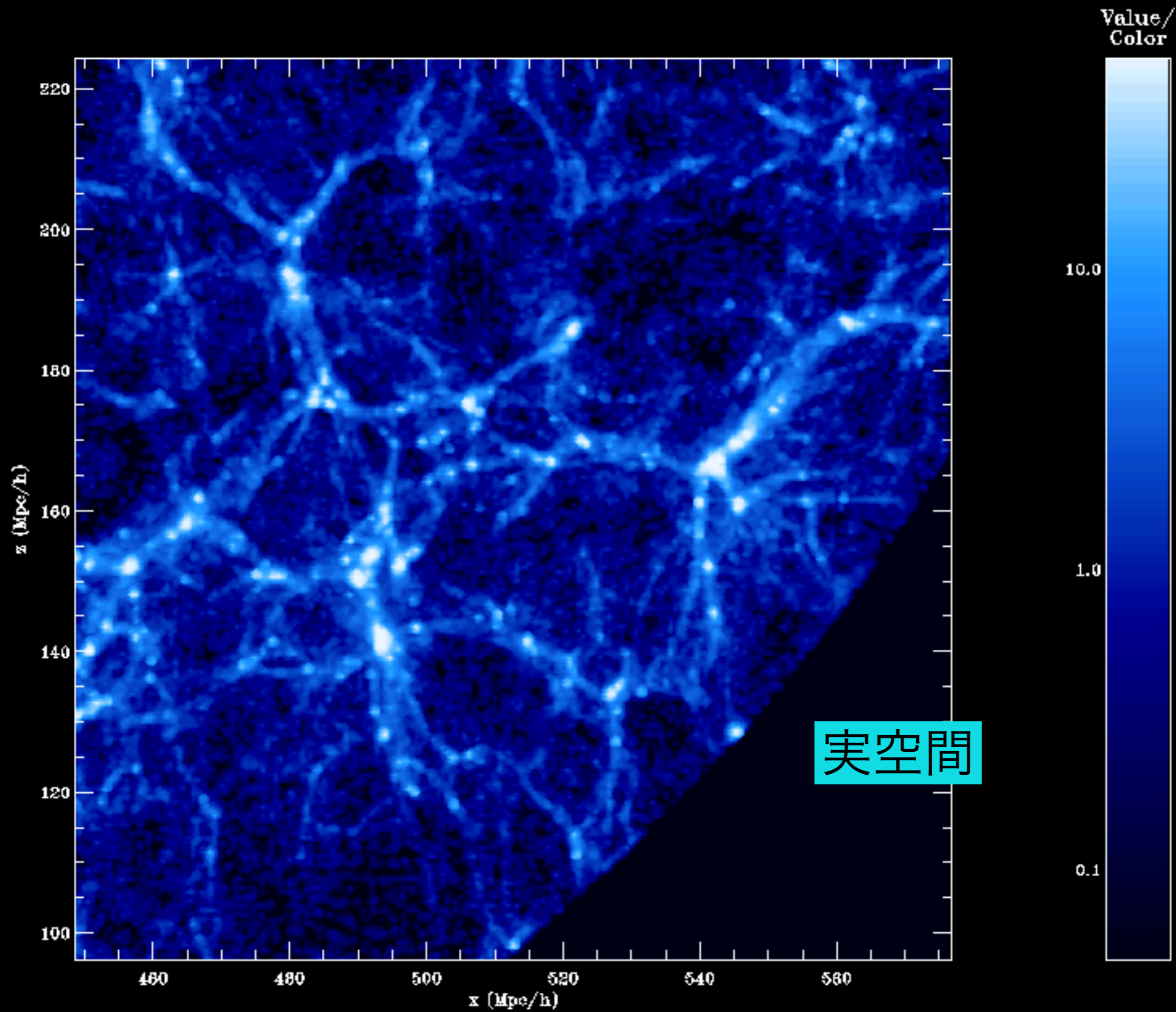
10.0

1.0

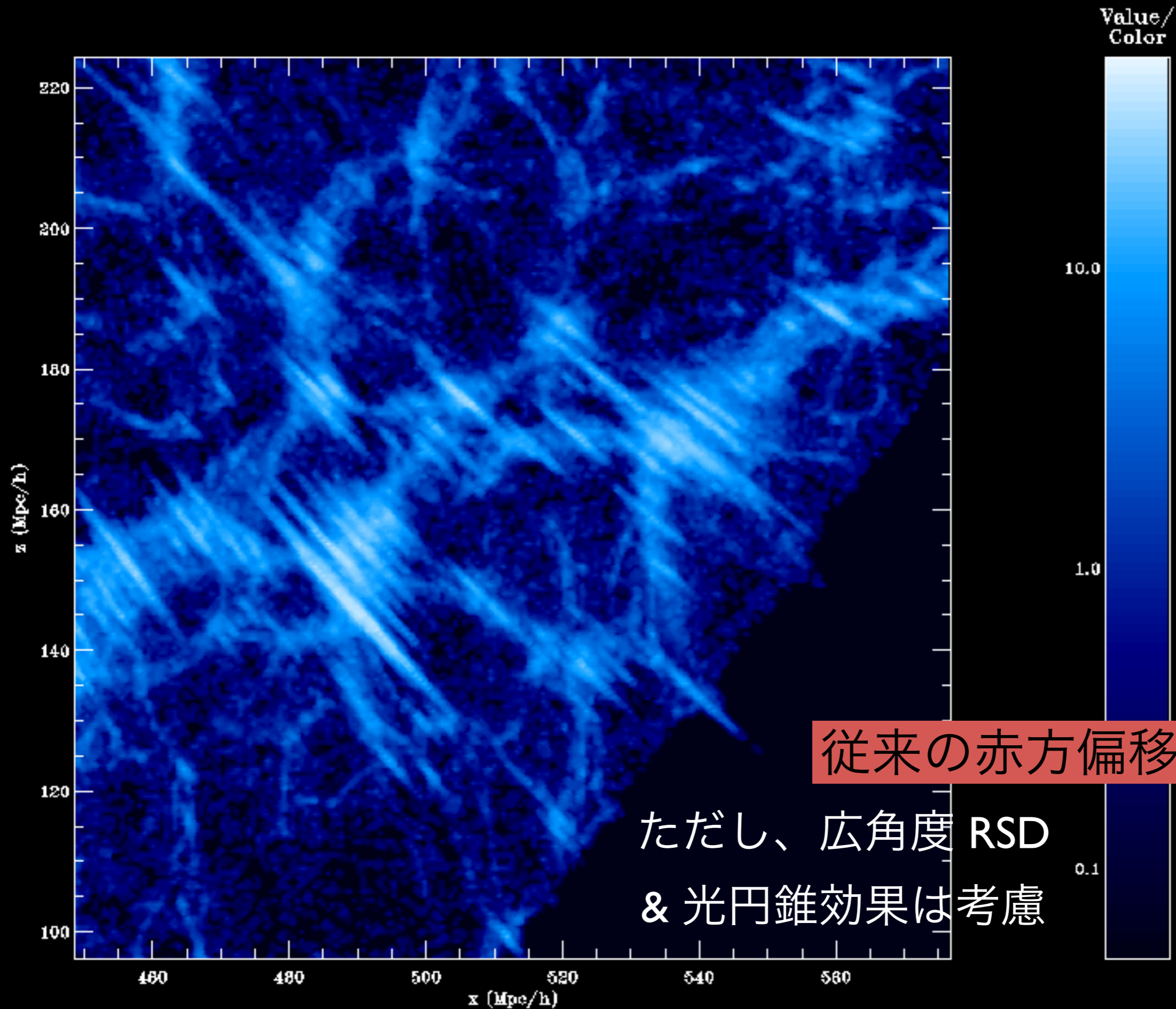
0.1

Fig. courtesy: Yann Rasera, based on the data by Michel-Andres Breton

density\_zoom2\_realspace



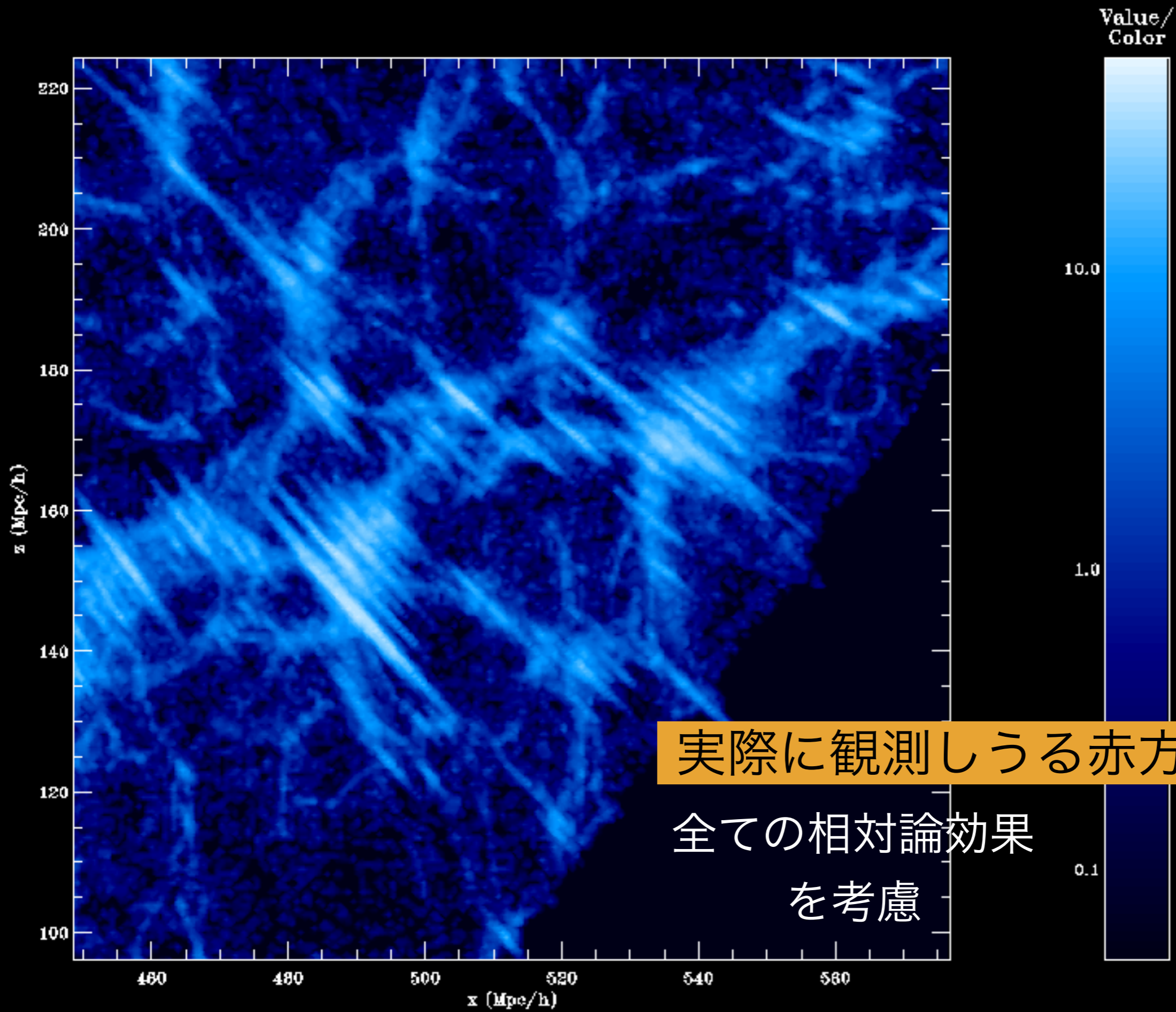




従来の赤方偏移空間

ただし、広角度 RSD  
& 光円錐効果は考慮

density\_allrelativisticeffects

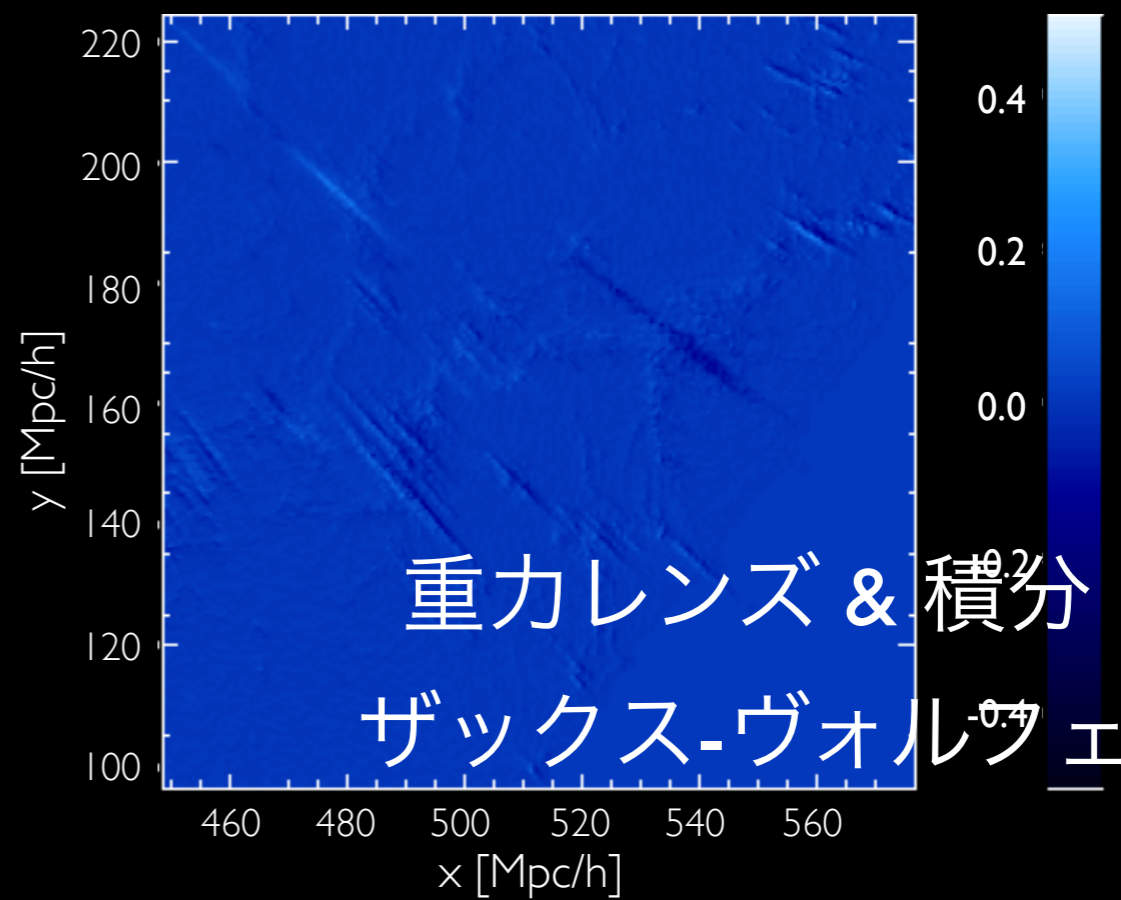
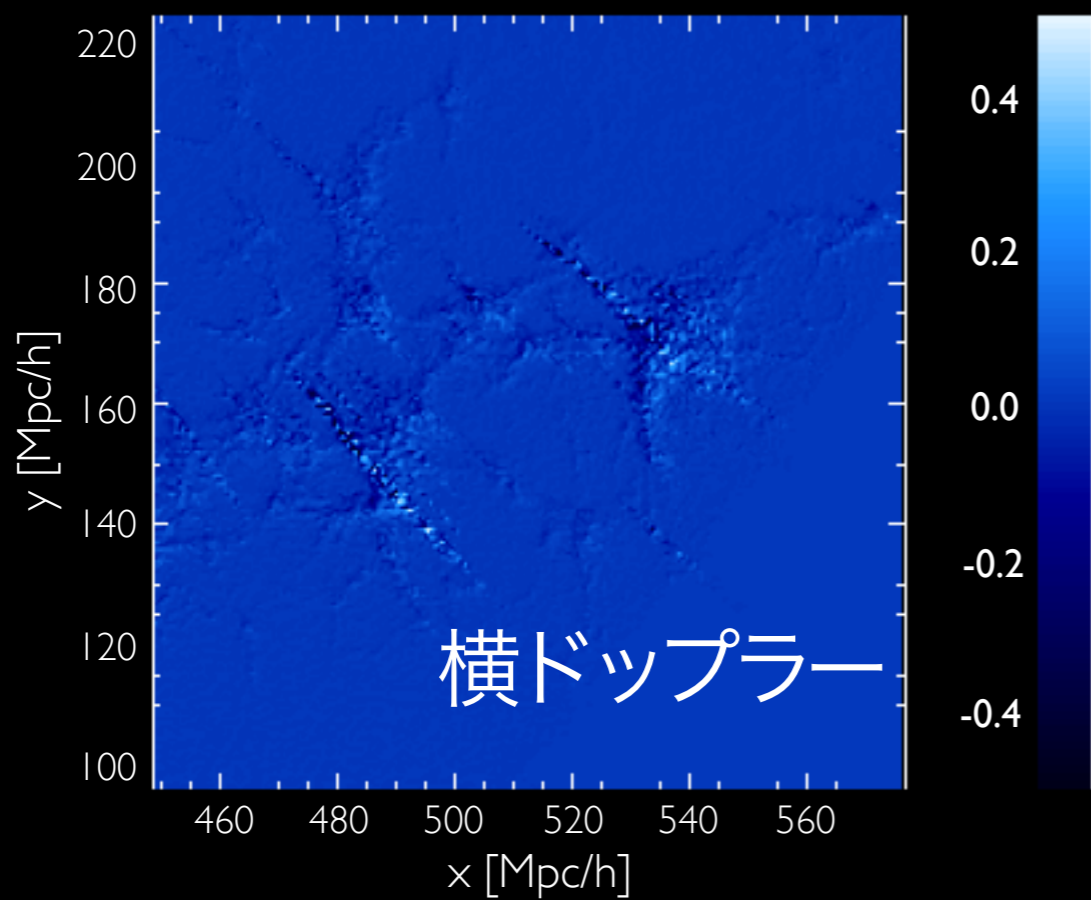
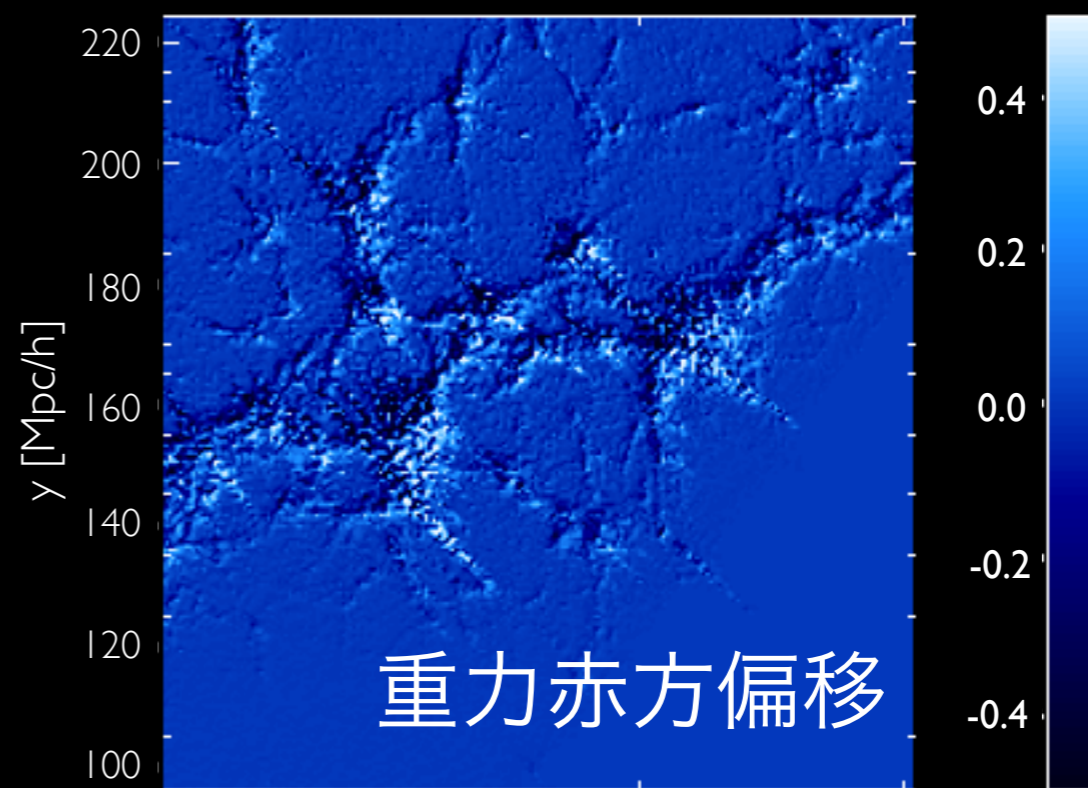
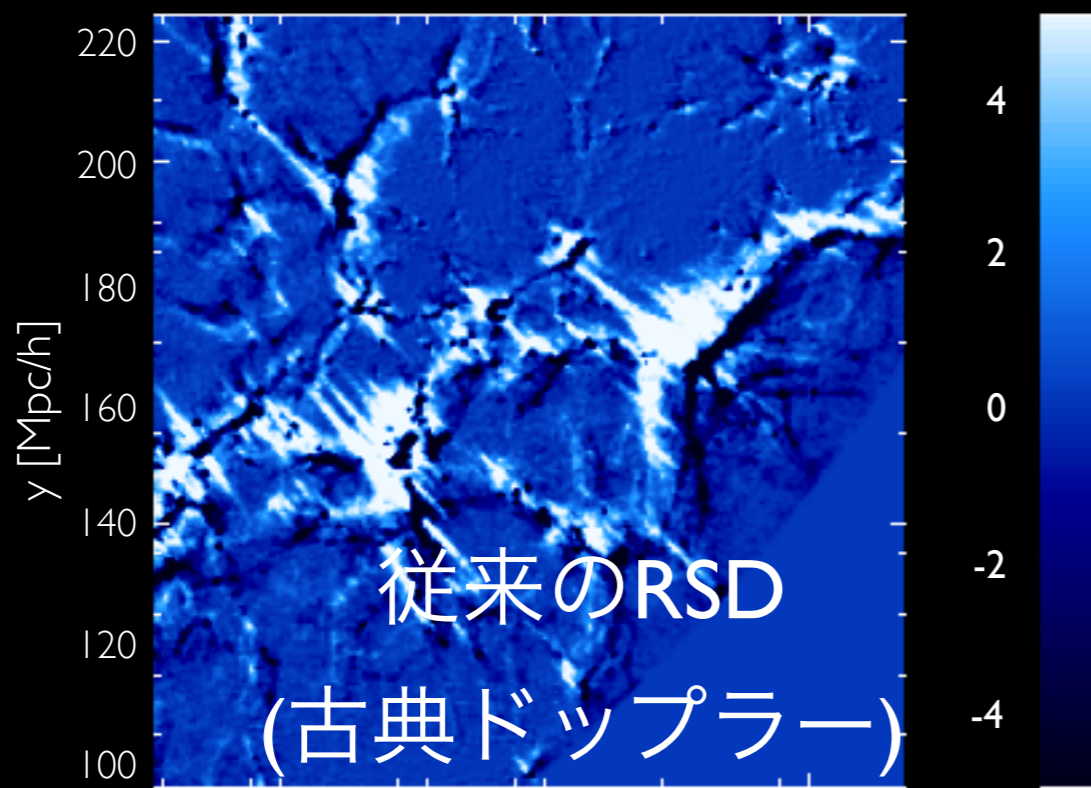


実際に観測しうる赤方偏移空間

全ての相対論効果  
を考慮



# 差分をとった時の相対的寄与



# 観測される密度ゆらぎ：線形理論

## 相対論的な線形摂動論

e.g., Bonvin & Durrer ('11)

従来の RSD (カイザー効果)

*magnification bias ignored*

$$\Delta(\mathbf{n}, z) = b \delta - 2\Phi + \Psi - \frac{1}{\mathcal{H}} \partial_r (\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}) - \left( \frac{2}{r\mathcal{H}} + \frac{\dot{\mathcal{H}}}{\mathcal{H}^2} \right) \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} + \frac{\dot{\Phi}}{\mathcal{H}} + \frac{1}{\mathcal{H}} (\partial_r \Psi + \mathcal{H} \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} + \mathbf{n} \cdot \dot{\mathbf{v}}) + \frac{1}{r} \int_0^r dr' \left[ 2 - \frac{r-r'}{r'} \Delta_\Omega \right] (\Phi + \Psi) + \left( \frac{2}{r\mathcal{H}} + \frac{\dot{\mathcal{H}}}{\mathcal{H}^2} \right) \left( \Psi + \int_0^r (\dot{\Psi} + \dot{\Phi}) dr' \right).$$

$\delta$  : 共動ゲージにおける密度ゆらぎ

$\mathbf{n}$  : (広角度) 視線方向

相関関数に双極子的  
非対称性

( $\dot{\phantom{x}}$ ) : 共形時間微分

双極子的非等方性の一部は相対論的效果によって生み出される  
(i.e., 重力赤方偏移)



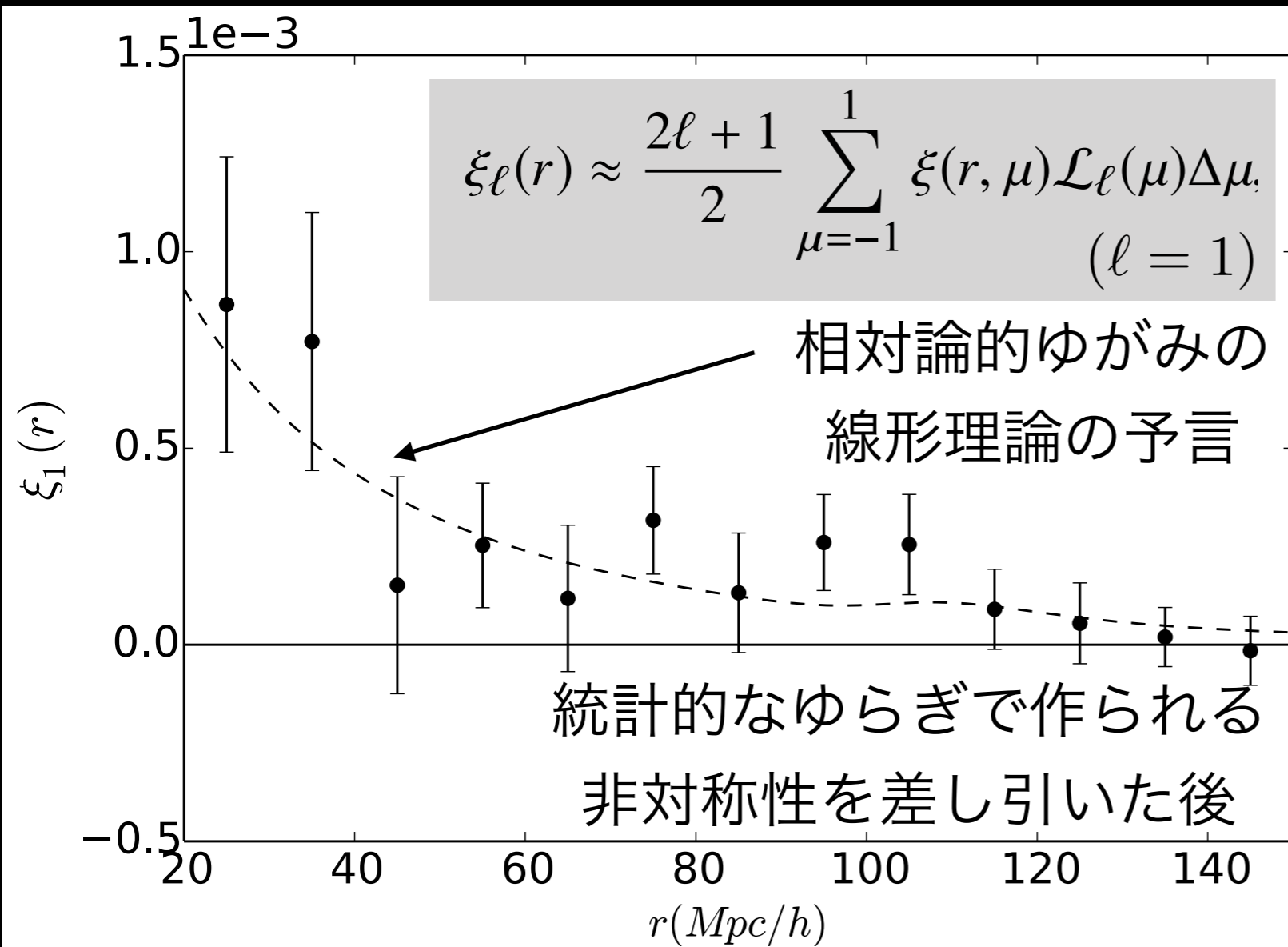
# 相関関数の双極子非対称性・1

異なる質量同士のハローの相関関数

(質量： $4.5 \times 10^{13}$  &  $2.6 \times 10^{12} M_{\text{sun}}/h$ )

(5,400,000個)

(400,000個)



より大きなカタログを作成

- $4096^3$  個のダークマター粒子
- 2.625 Gpc/h ボックス ( $z < 0.46$ )

**RayGalGroupSims**  
(will be public)

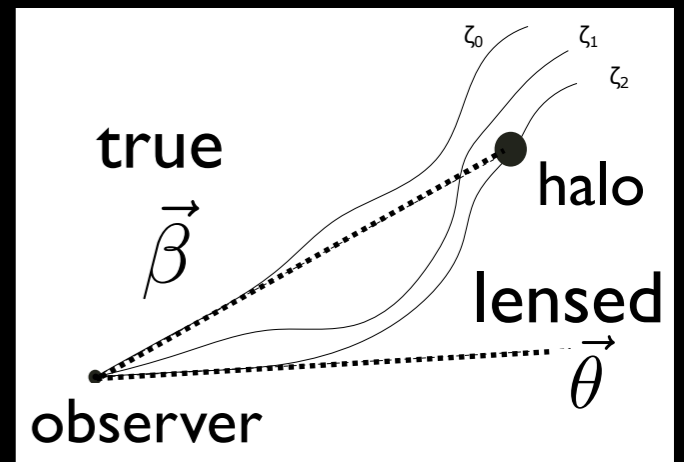
全ての相対論効果を考慮

# 双極子非等方性: 詳細 (1)

大スケール

## ハローのカタログ

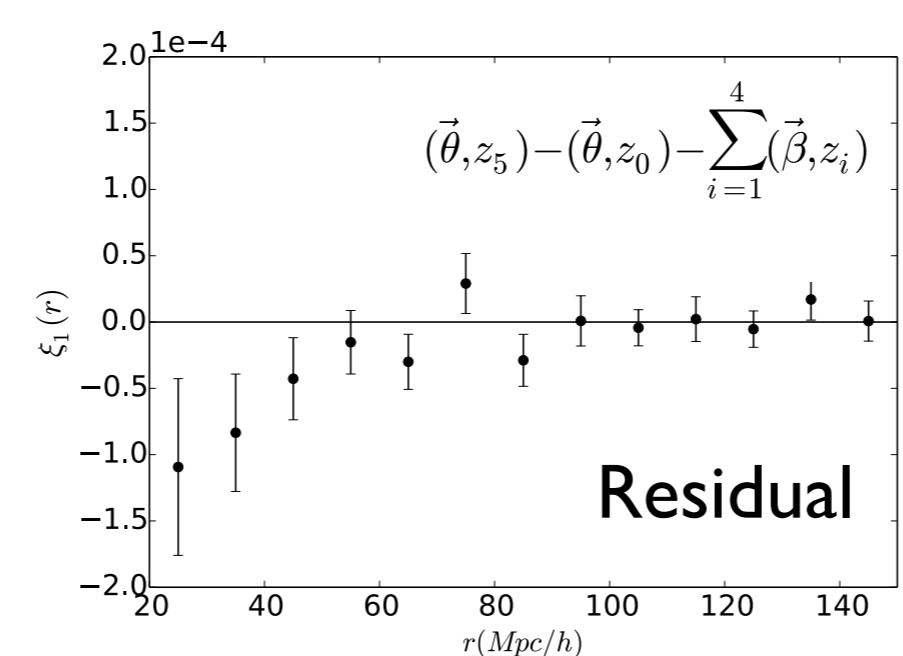
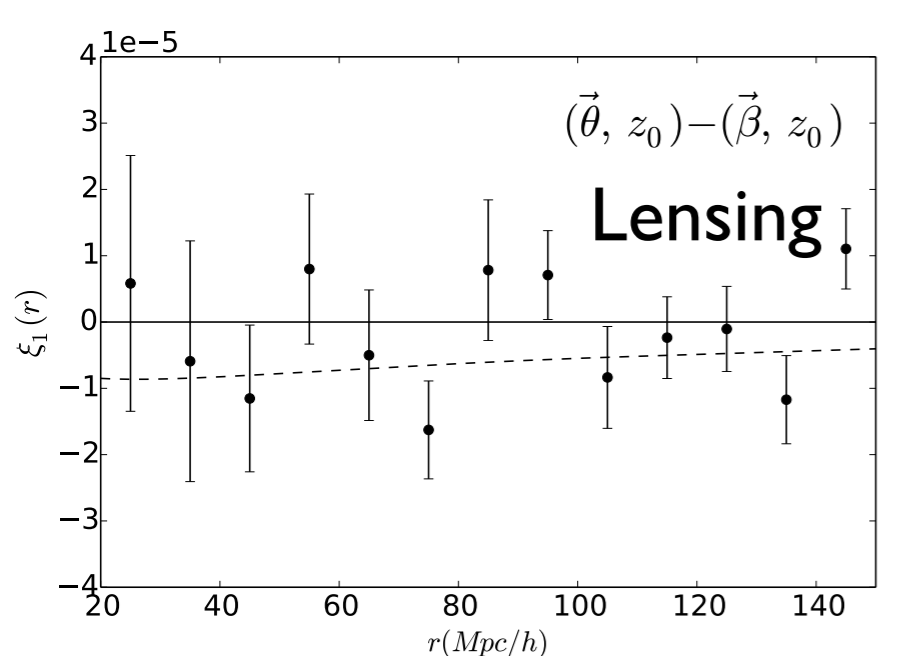
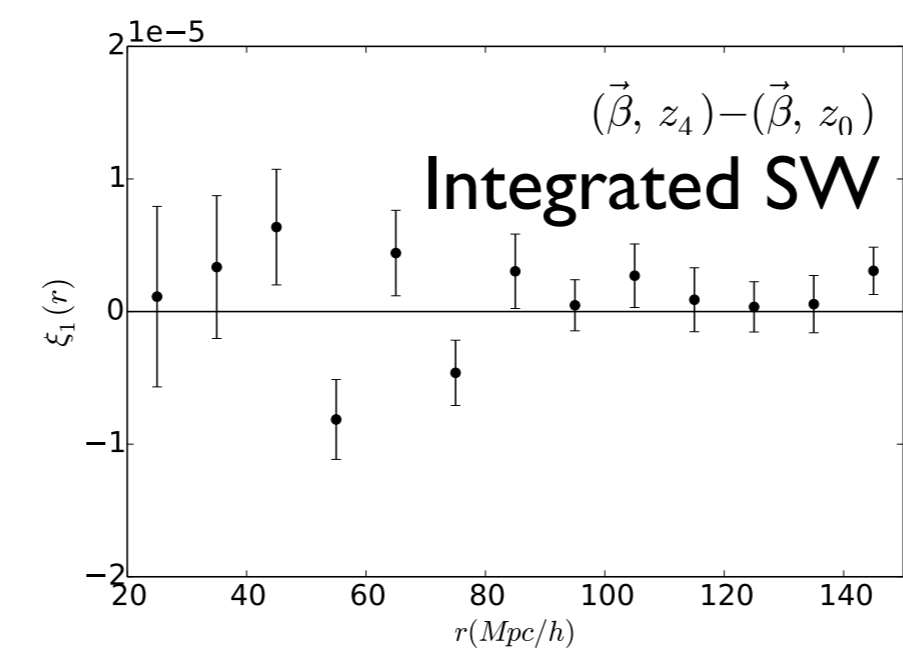
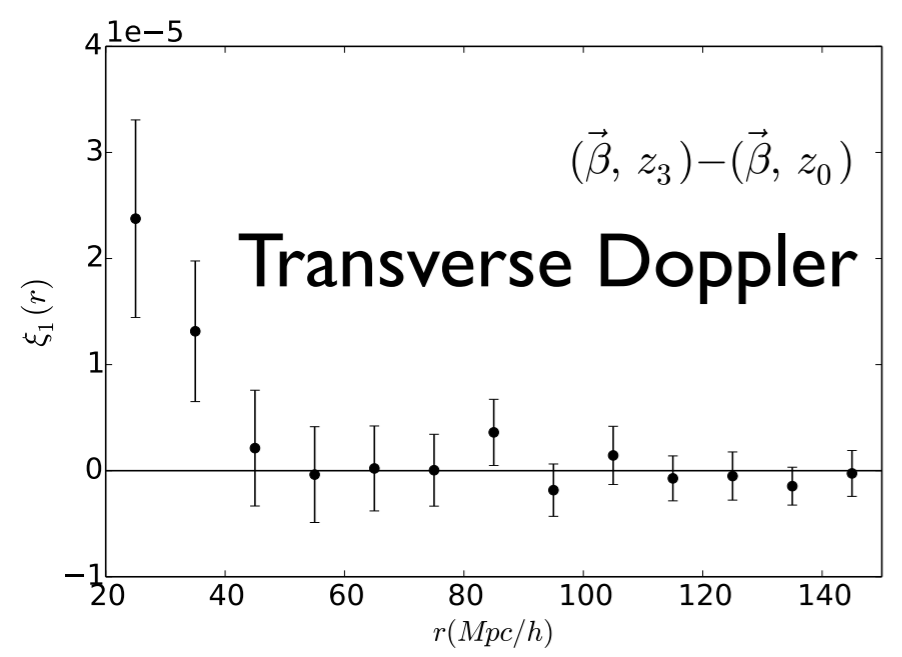
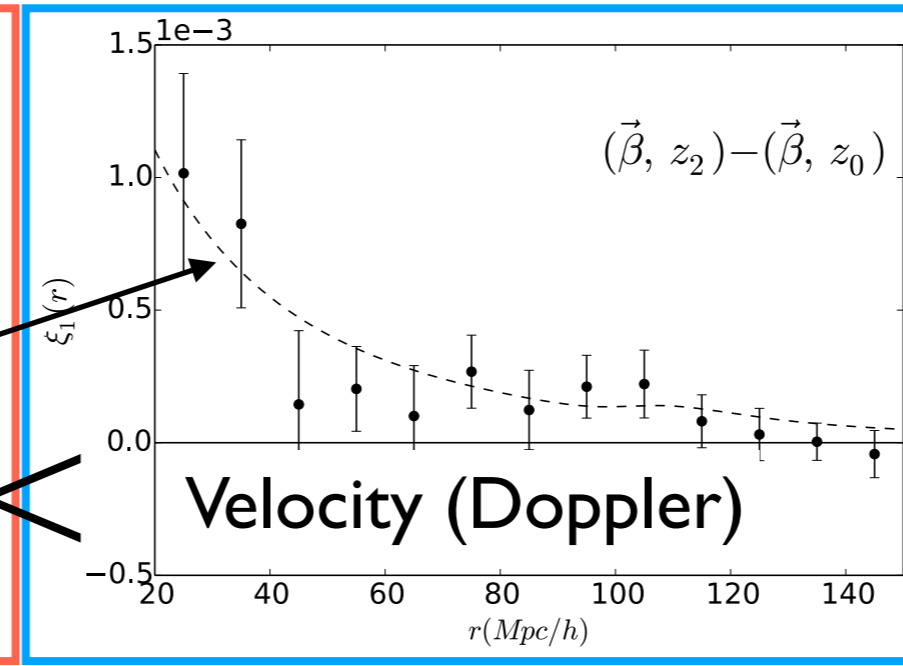
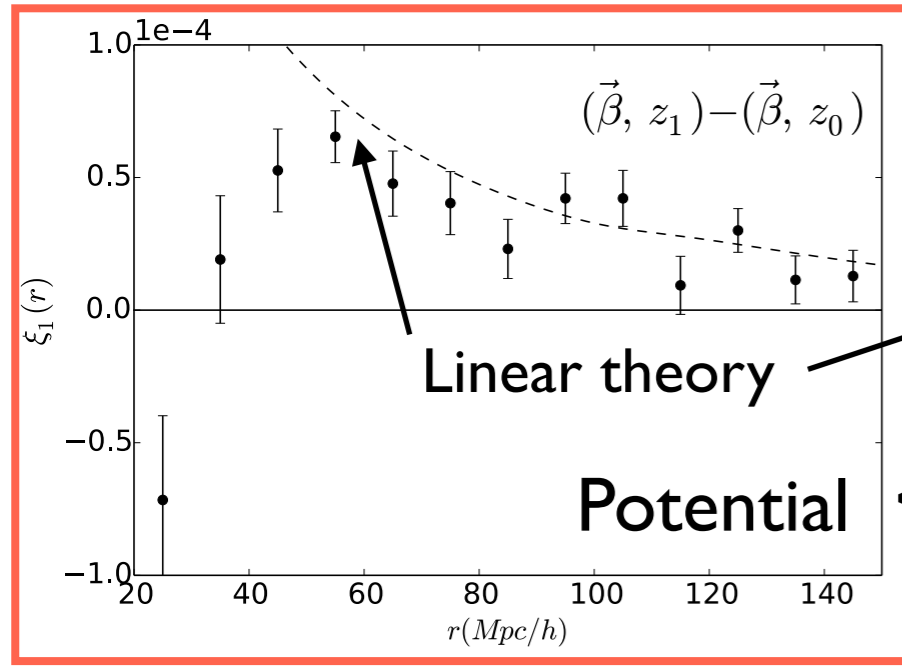
- 天球角:  $\beta, \theta$



- 赤方偏移:

$$\begin{aligned}
 z_0 &= \frac{a_0}{a} - 1, \\
 z_1 &= \frac{a_0}{a} \left( 1 + \phi_o/c^2 - \phi_s/c^2 \right) - 1, \\
 z_2 &= \frac{a_0}{a} (1 + \mathbf{v}_s \cdot \mathbf{n}/c) - 1, \\
 z_3 &= \frac{a_0}{a} \left( 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{v_s}{c} \right)^2 \right) - 1, \\
 z_4 &= \frac{a_0}{a} \left( 1 - \frac{2}{c^2} \int_{\eta_s}^{\eta_o} \phi d\eta \right) - 1, \\
 z_5 &= \frac{(g_{\mu\nu} k^\mu u^\nu)_s}{(g_{\mu\nu} k^\mu u^\nu)_o} - 1,
 \end{aligned}$$

with  $g_{\mu\nu} k^\mu u^\nu = -ack^0 \left( 1 + \phi/c^2 + \mathbf{v} \cdot \mathbf{n}/c + \frac{1}{2} \left( \frac{v}{c} \right)^2 \right)$

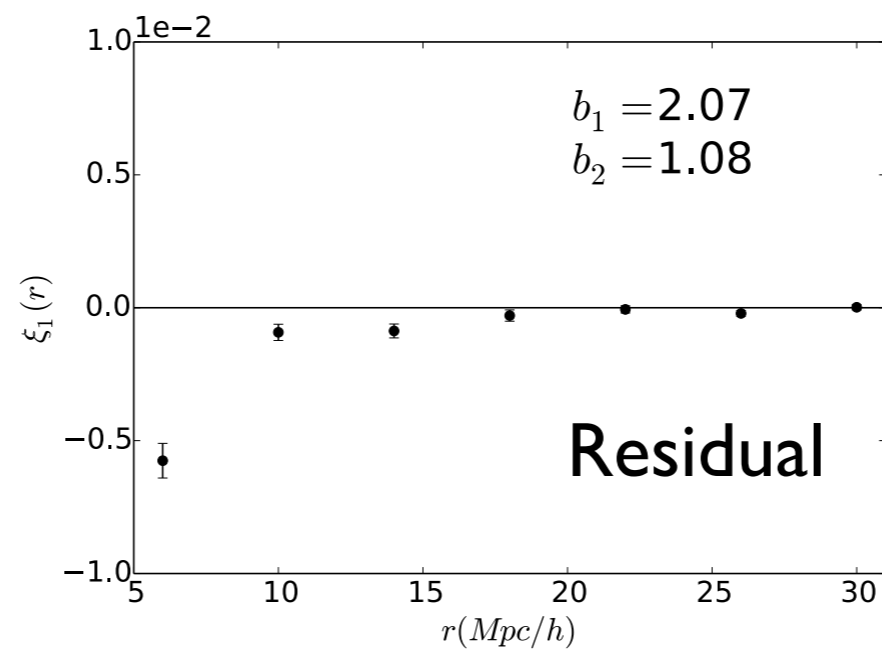
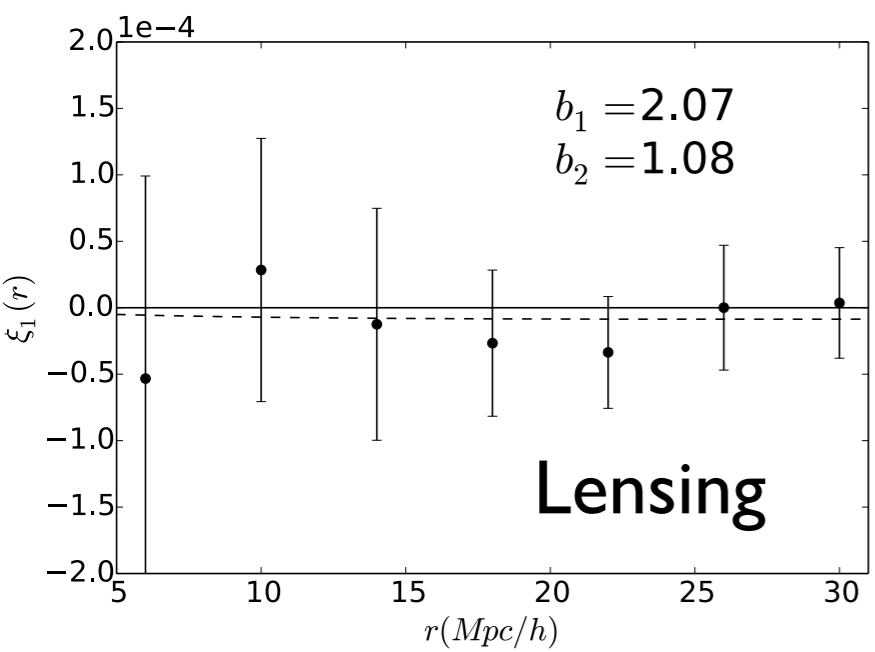
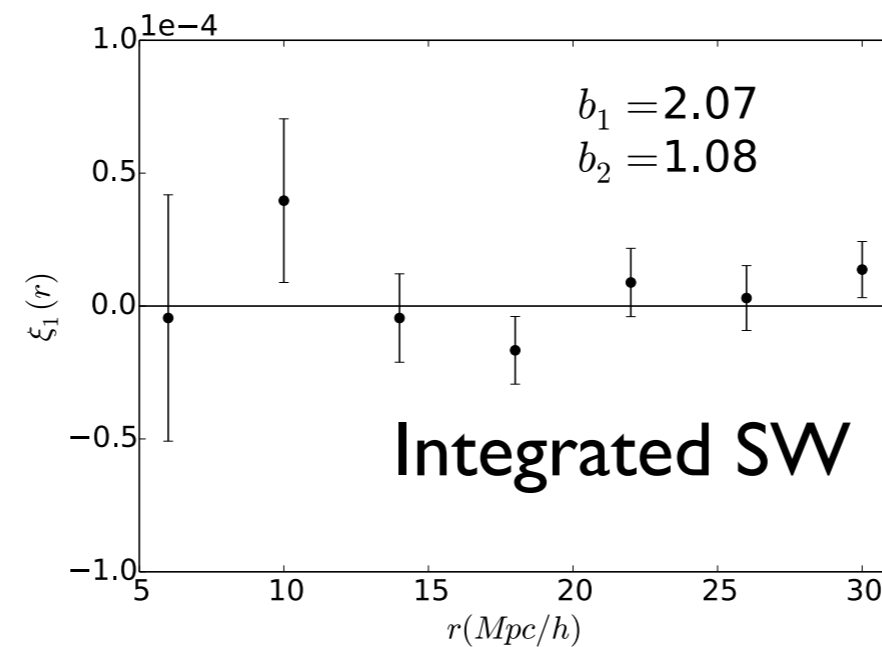
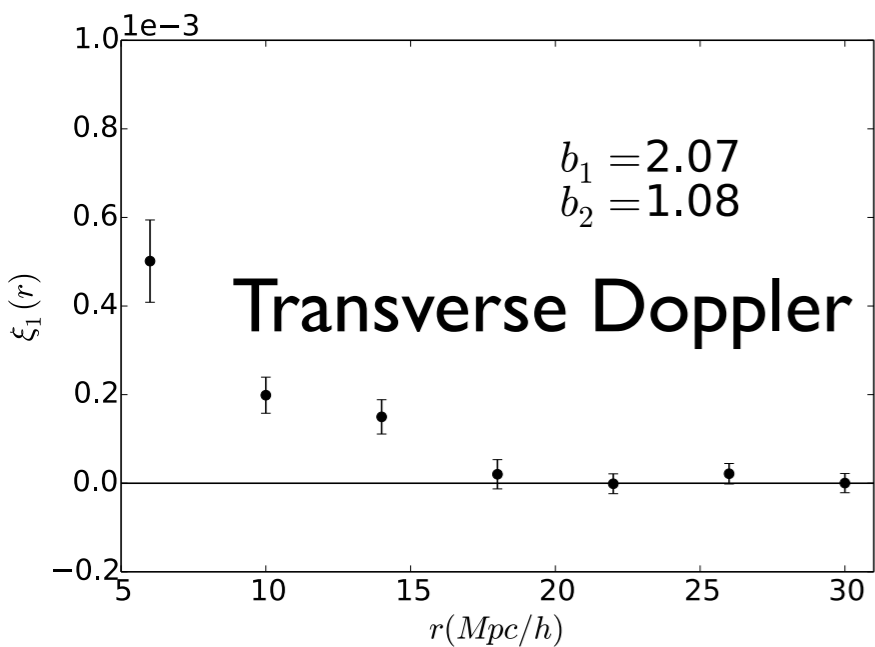
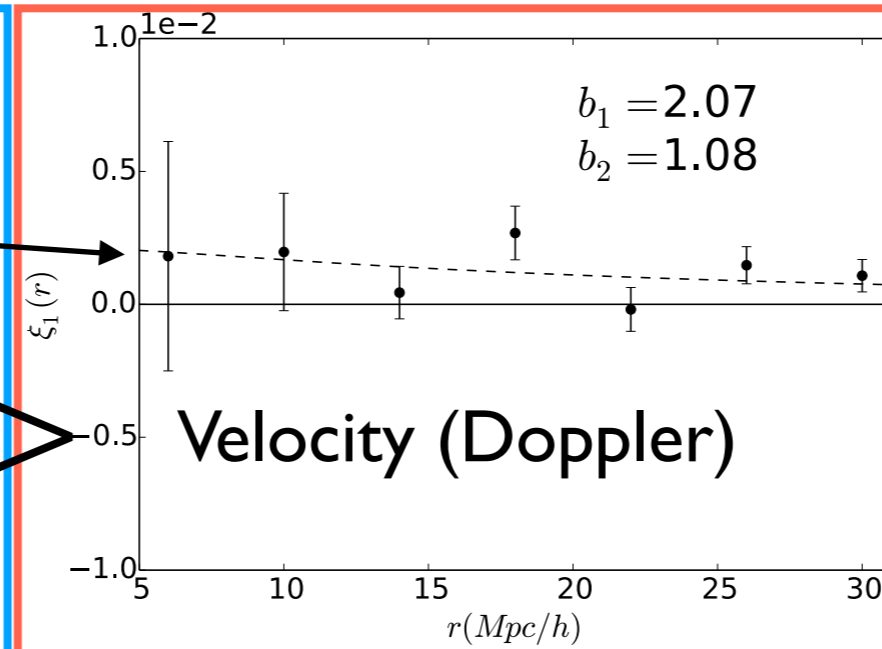
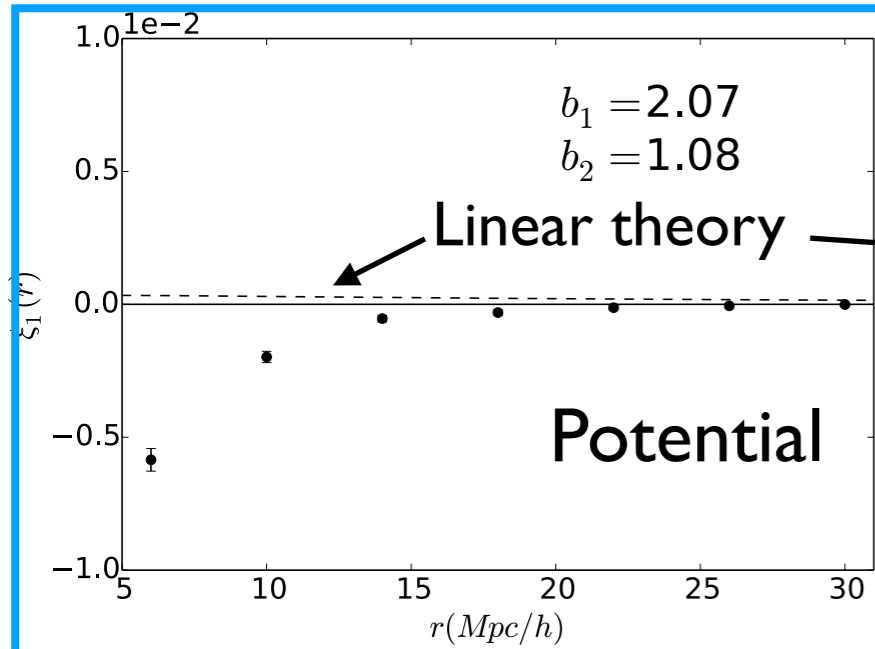




# 双極子非等方性:

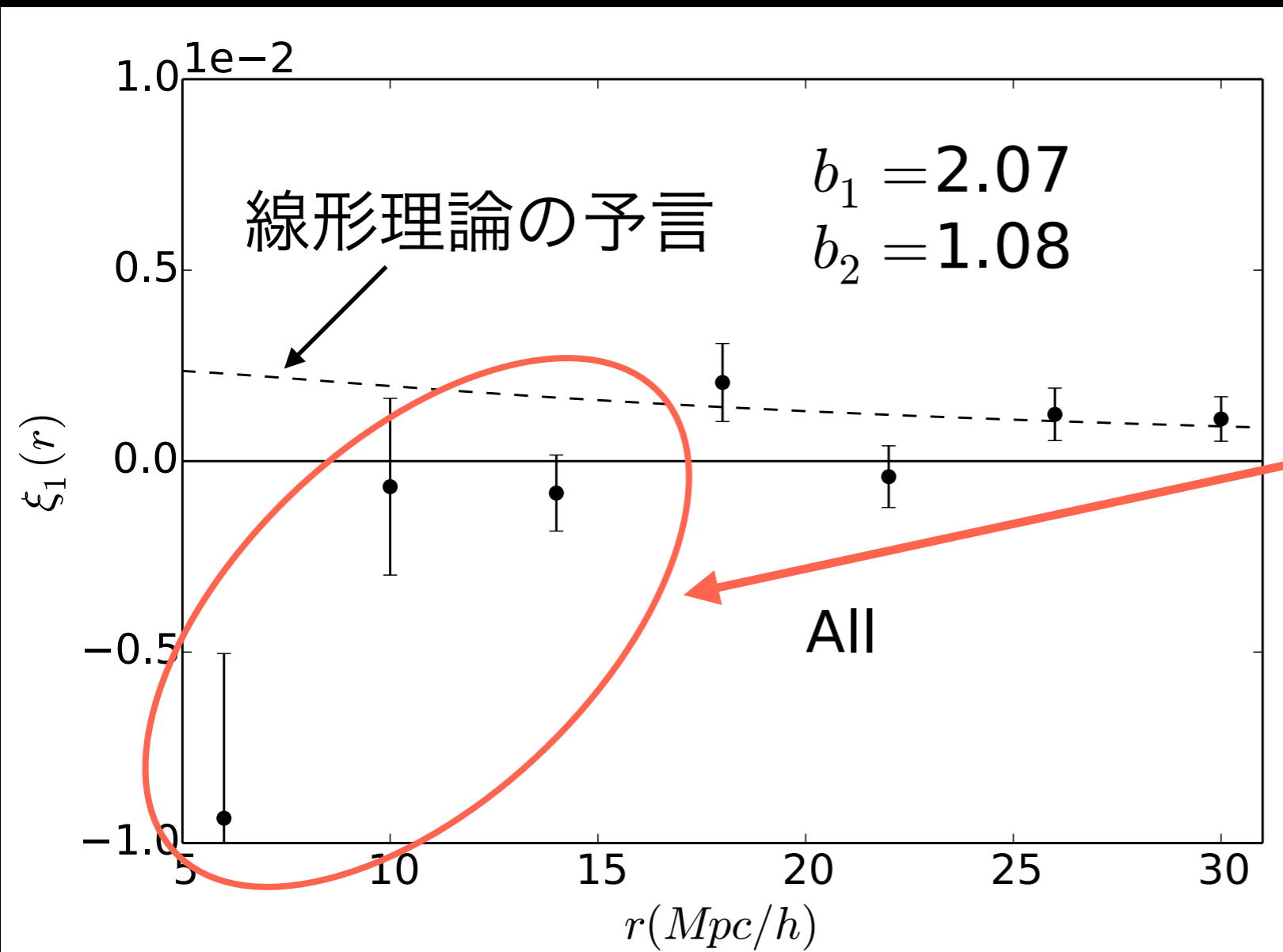
## 詳細 (2)

### 小スケール



# 相関関数の双極子非等方性・2

異なる質量同士のハローの相関関数  
(質量： $4.5 \times 10^{13}$  &  $2.6 \times 10^{12} M_{\text{sun}}/h$ )



$r < 20 \text{ Mpc}/h$  で重力赤方  
偏移の効果が卓越

全ての相対論効果を考慮

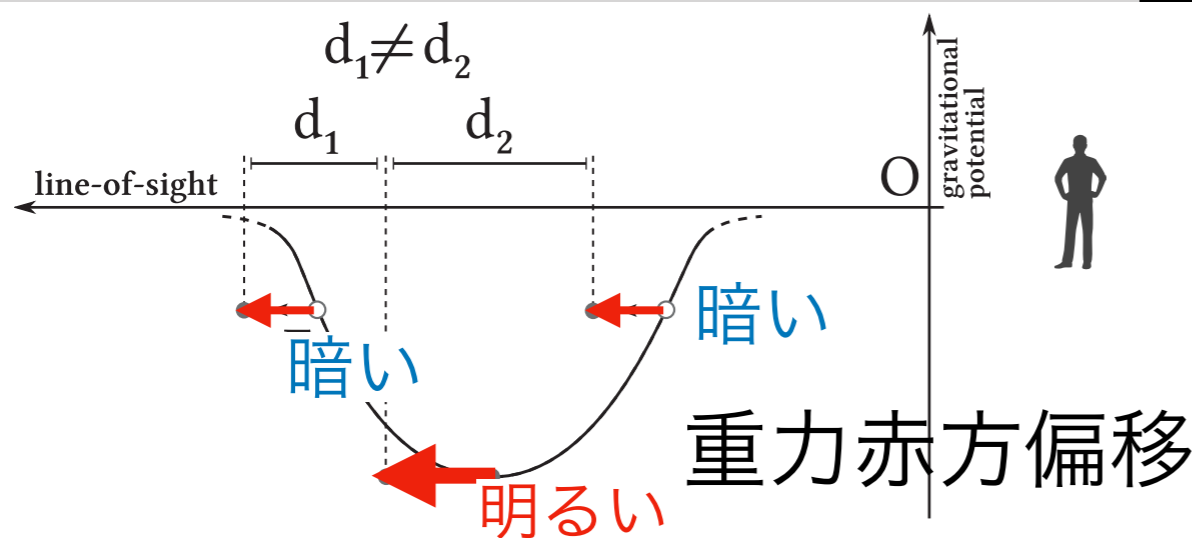


# 重力赤方偏移の検出？

シェル推定量

Croft ('13)

$$z_g^{\text{shell}}(r') = \frac{\int_{r'}^{r'+\Delta r'} H r_{\parallel} [1 + \xi(r_{\perp}, r_{\parallel})] r^2 dr}{\int_{r'}^{r'+\Delta r'} [1 + \xi(r_{\perp}, r_{\parallel})] r^2 dr}$$



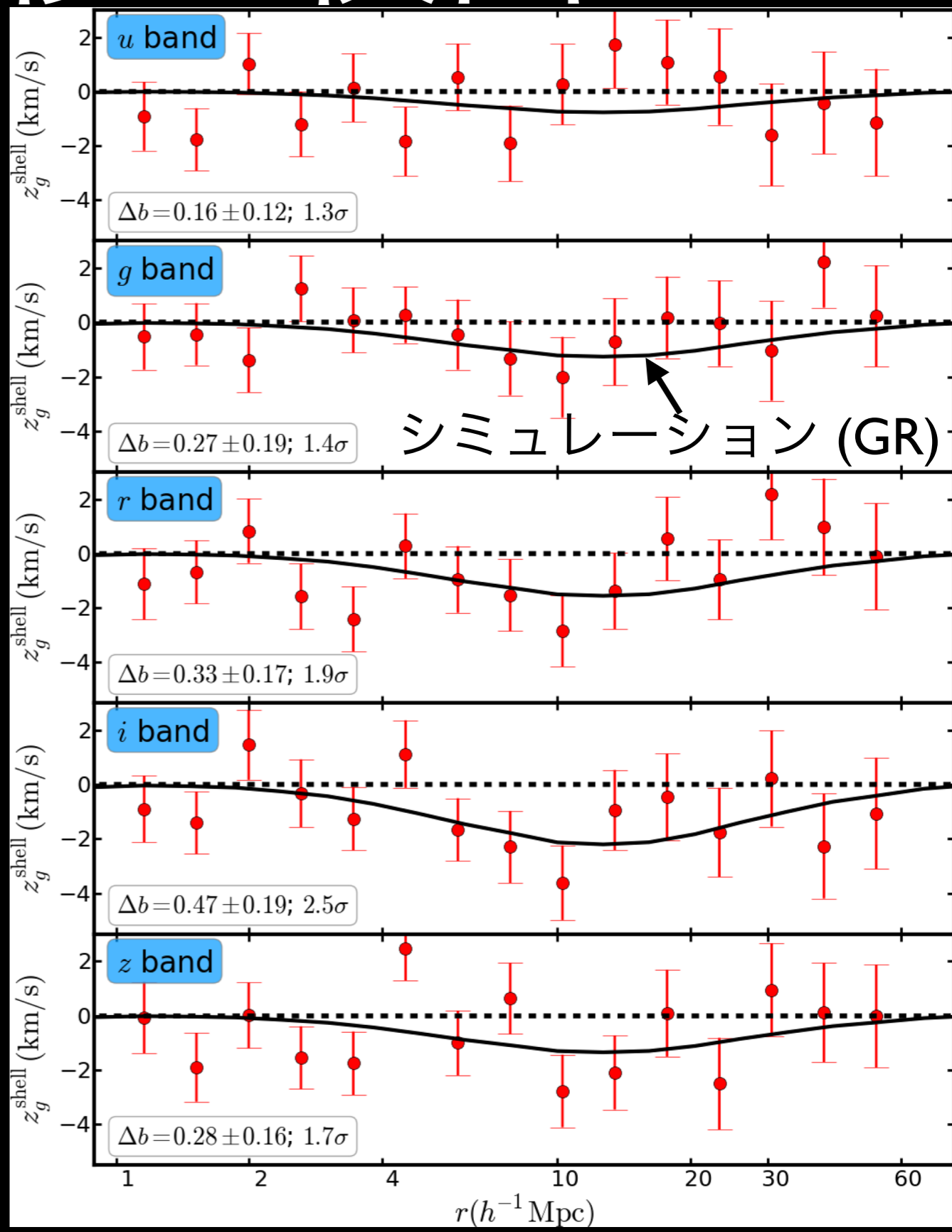
SDSS-III BOSS CMASS銀河

(76.5万個 @  $0.4 < z < 0.7$ )

明るい・暗いの2サンプルで相関

全てを組み合わせると2.7 $\sigma$ レベルでの検出 (Alam et al. '17)

(銀河団を用いた検出例は Wojtak et al. '11)



# まとめ

宇宙の大規模構造観測に現れる「ゆがみ」を使った宇宙論の進展と新たな様相：相対論的ゆがみ

赤方偏移空間ゆがみ：銀河の特異速度場によって生じる銀河のクラスタリングの非等方性 → ゆらぎの重力的成長のプローブ

- 一般相対論の整合性の検証
- 修正重力理論に対する制限

相対論的ゆがみ：相対論的效果による新たな効果 → 新しい宇宙論のプローブ

- 相対論的観測効果を入れたシミュレーション
- 相関関数に現れる非対称性（双極子成分）