

# 赤方偏移空間歪みを用いた

## $f(R)$ Gravityの制限

2012年度 天文天体物理若手 夏の学校 重力論・宇宙論19a

2012年8月1日

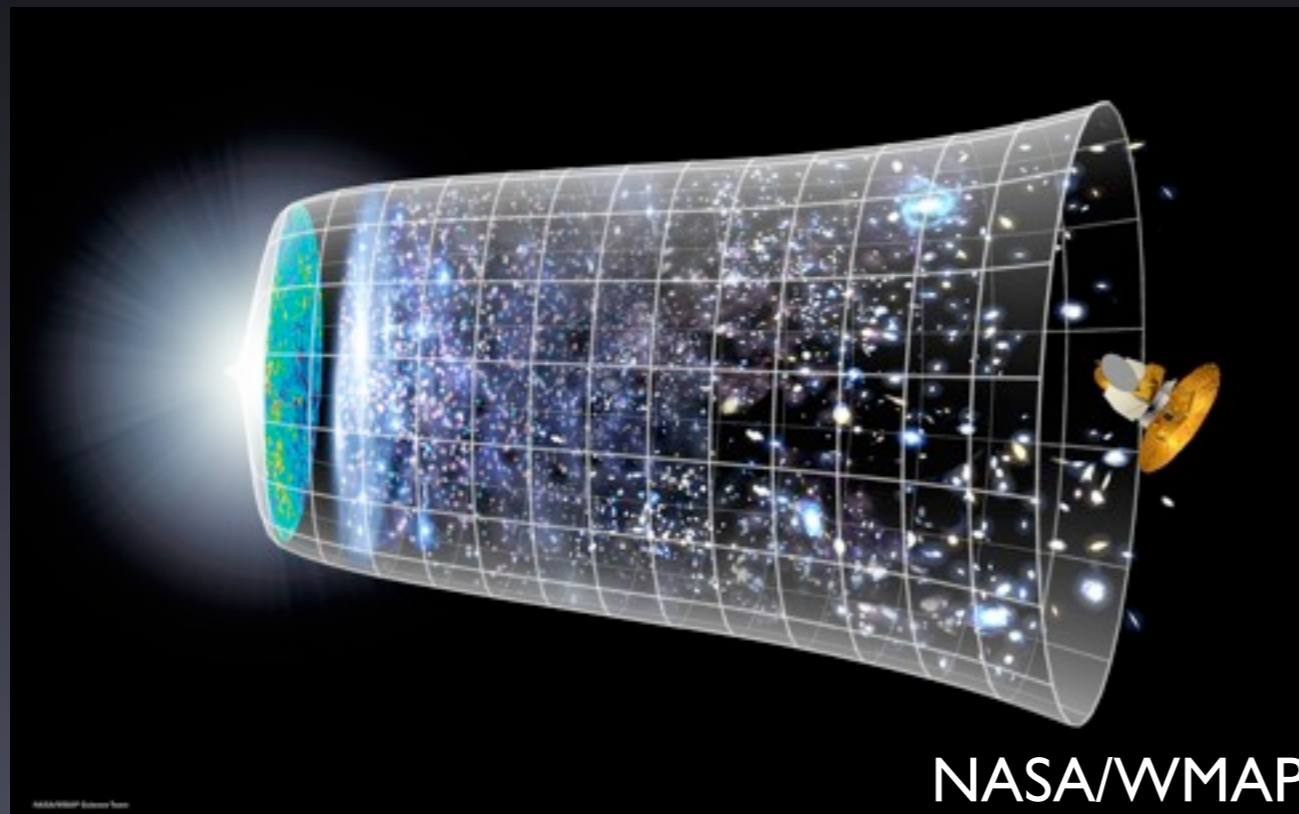
京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 MI

岡田 裕行

共同研究者： 戸谷友則 (FastSound Project, 京都大学 宇宙物理学教室)

辻川信二 (東京理科大学 理学研究科第二物理学科)

# 宇宙の加速膨張



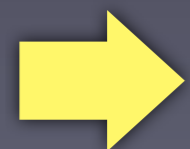
NASA/WMAP

<http://map.gsfc.nasa.gov>

加速膨張を説明するモデル

- $\Lambda$ CDM
- Dark Energy
- Modified Gravity

どのモデルが正しいか  
特定したい！



今回は、特にModified Gravityの中の **f(R) Gravity** に注目し、観測結果と比較して妥当性を検証する。

# 目次

- 観測
  - 銀河分布と密度揺らぎの進化
  - 赤方偏移空間歪みと密度揺らぎの成長率
  - これまでの観測結果
- 理論
  - $f(R)$  Gravityについて
  - 密度揺らぎの線形成長率のモデル計算
- 結論とまとめ
  - 線形成長率の観測と理論との比較
  - まとめ

# 銀河分布と密度揺らぎの進化

銀河の天球面上の位置と赤方偏移 $z$ を決めることで、3次元的な銀河の地図を作る。

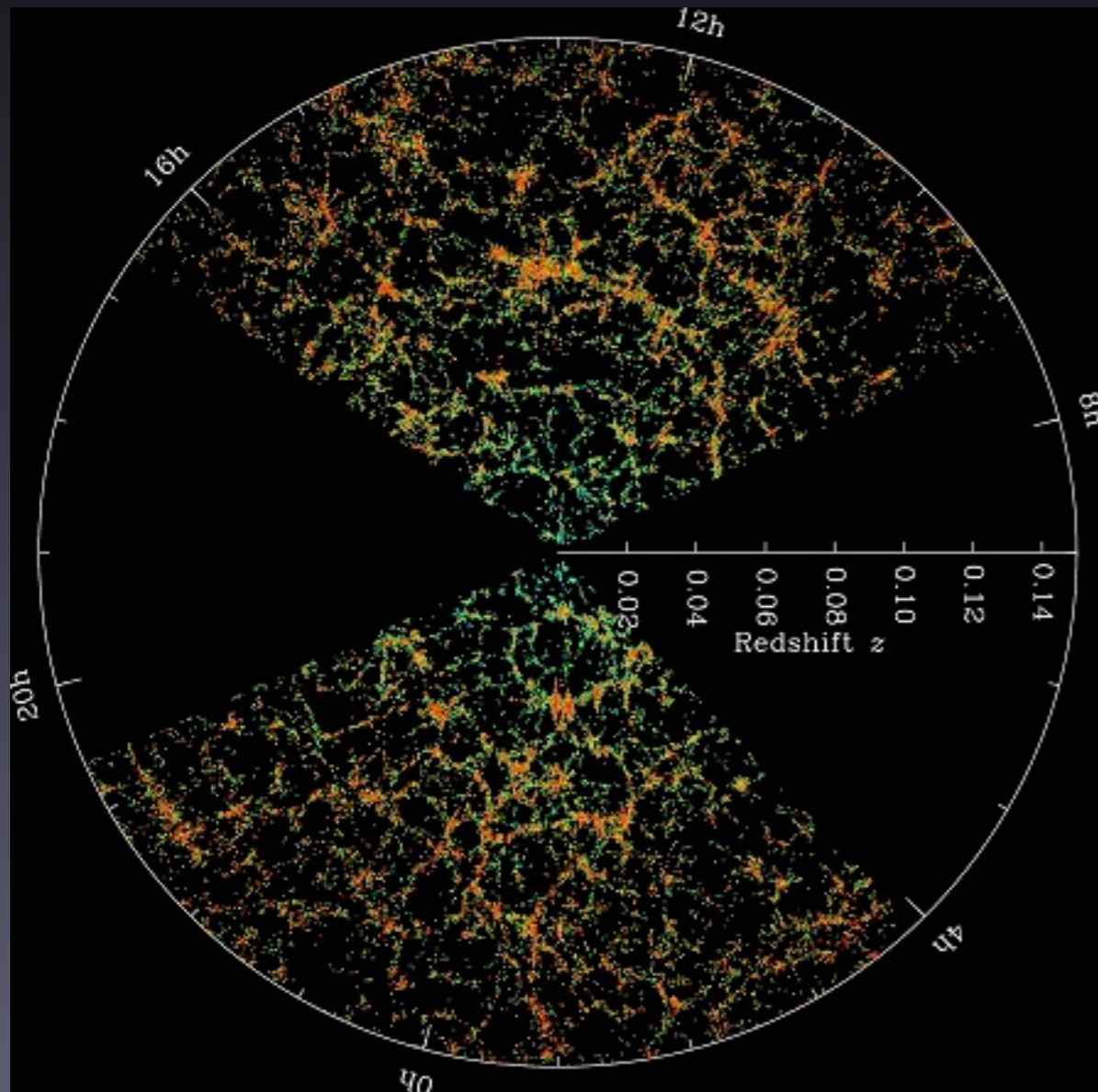


銀河の分布から宇宙の密度揺らぎの進化のようすがわかる。

赤方偏移空間歪みを使う！



観測から得られた密度揺らぎの進化とモデルの予言を比較することで、最適なモデルを探る。



SDSS Galaxy map  
<http://www.sdss.org>

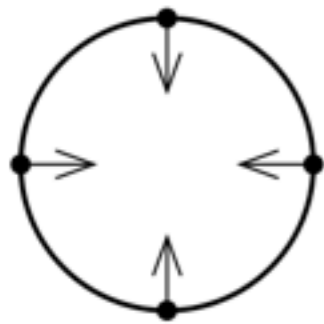
# 赤方偏移空間歪み(RSD)

実際の分布

観測される分布

Real space:

Redshift space:



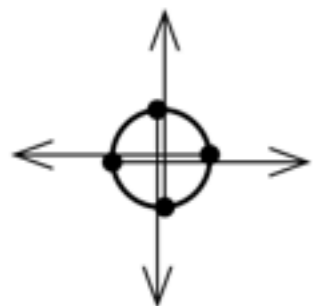
Squashing effect

Linear regime



Collapsed

Turnaround



Finger-of-god

Collapsing

observer

Hamilton '98

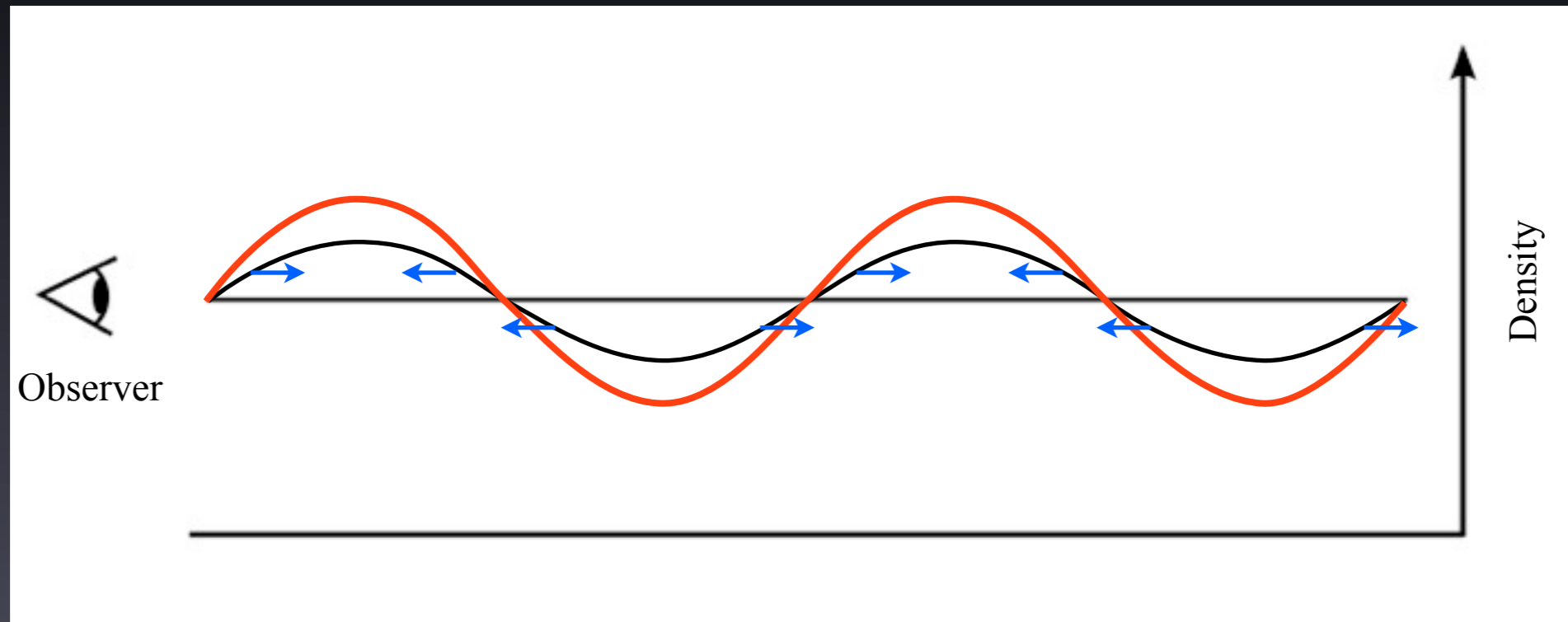
遠方銀河を観測する際, 視線方向の距離として赤方偏移 $z$ を用いた赤方偏移空間での銀河の分布が見える.

銀河はそれぞれ固有速度を持つ.  
→視線方向にDoppler効果.

⇒ 実空間での銀河分布に比べて赤方偏移空間では視線方向の分布が歪んで見える.

= 赤方偏移空間歪み (RSD)

# RSDと密度揺らぎの成長率



周囲よりも密度の高い部分に向かって物質が動くため、図のような速度場が生じる。

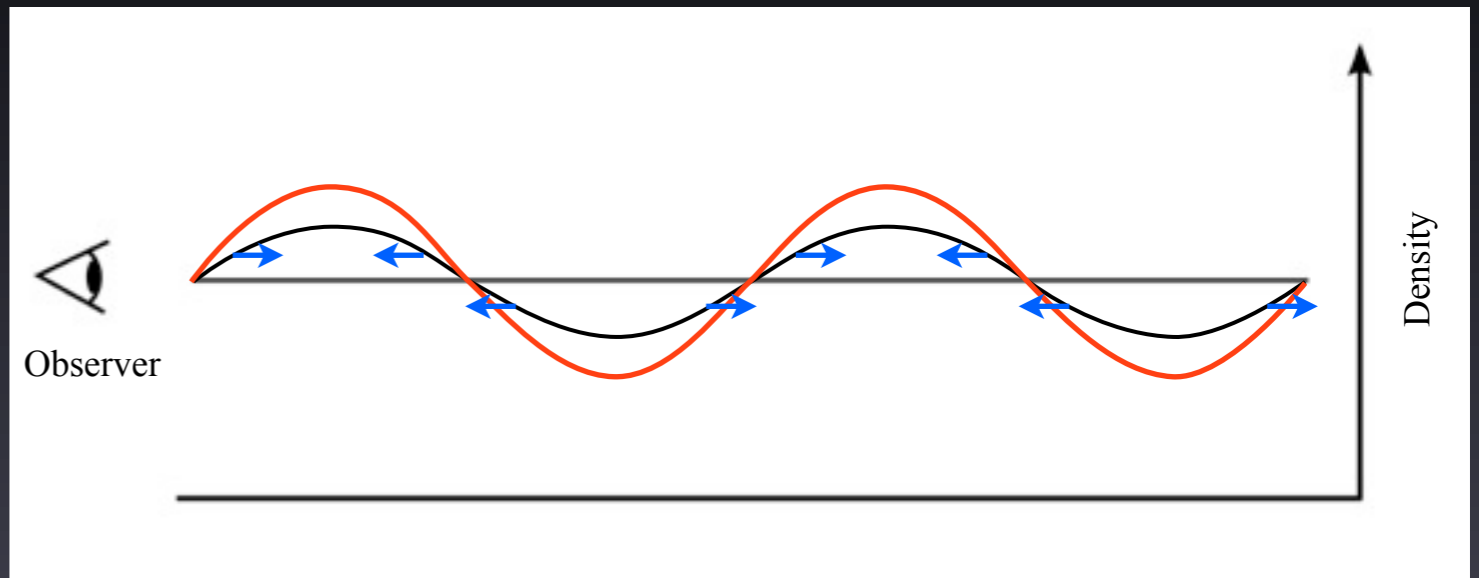
**密度揺らぎの成長率**と関係！

その結果、赤方偏移空間では実空間よりも視線方向の密度揺らぎが強調されて見える。

どのくらい強調されているかを測ることで、密度揺らぎの成長率を決められる。

# RSDと密度揺らぎの成長率

実空間および赤方偏移空間における銀河分布のパワースペクトル\* $P(k)$ の関係式:



$$P^s(k) = \left(1 + \frac{f_g}{b} \mu^2\right)^2 P(k)$$

↑  
観測
↑  
解析的に求める

$f_g$  : 密度揺らぎの線形成長率  
 $\mu = \cos \theta$   
 (  $\theta$  は波数  $k$  と視線方向のなす角 )  
 $b$  : bias parameter

Kaiser 1987

この関係式から、密度揺らぎの線形成長率  $f_g$  を求めることができる。

\* パワースペクトルは、密度揺らぎのフーリエ変換を2乗したような量で、スケールごとの揺らぎの強さを表す指標になる。

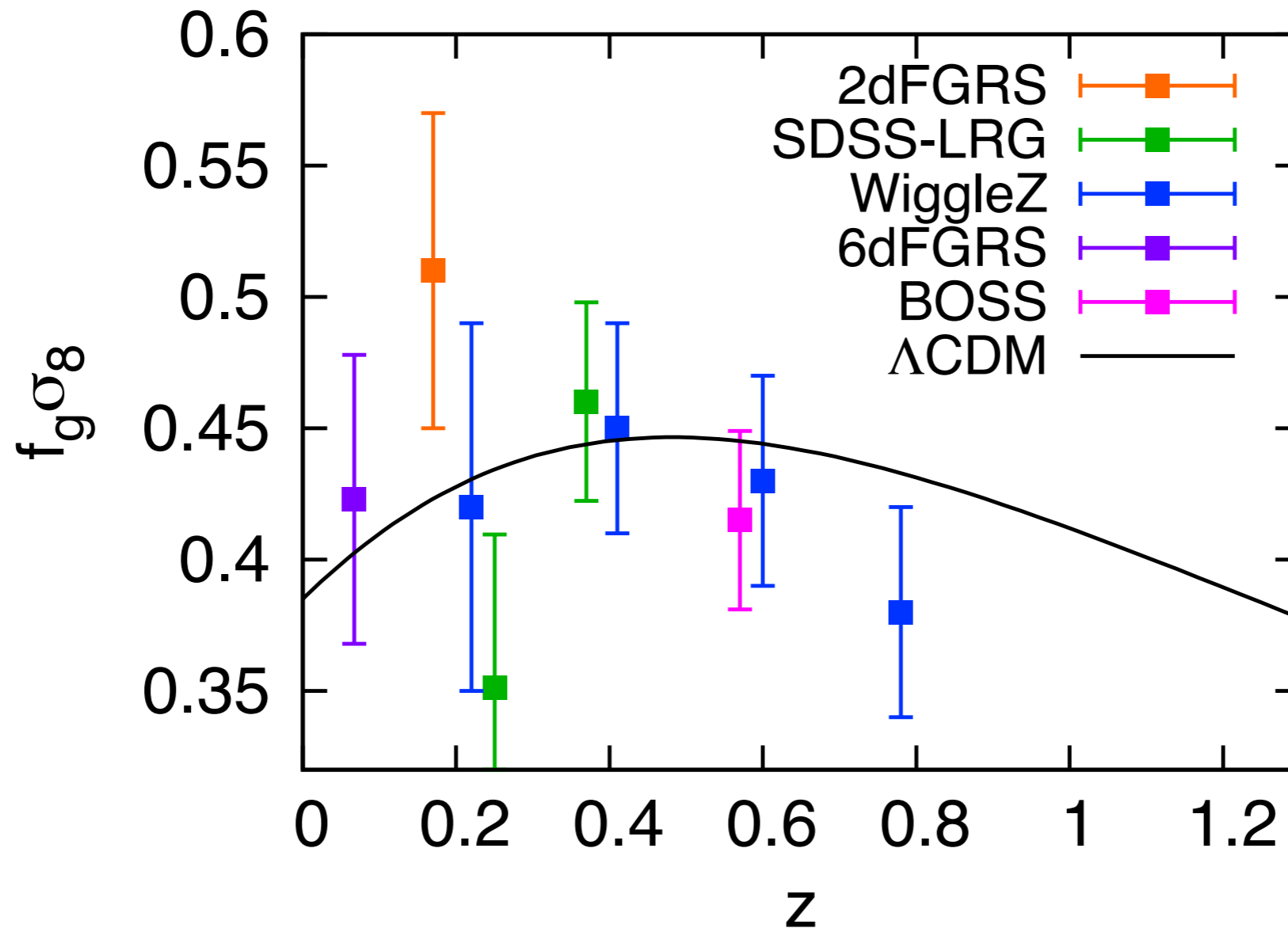
# これまでの観測

サーベイ名	$z_{\text{eff}}$	銀河数	サーベイ領域 [deg <sup>2</sup> ]	Reference
2dFGRS	0.17	~143,000	~1,100	Percival et al 2004
WiggleZ	0.22	~20,000	~1,000	Blake et al 2011a
	0.41	~39,000		
	0.60	~60,000		
	0.78	~33,000		
6dFGRS	0.067	~82,000	~17,000	Beutler et al 2012
SDSS-LRG	0.25	~50,000	~10,000	Samushia et al 2012
	0.37	~50,000		
BOSS	0.57	~264,000	~3,300	Reid et al 2012

これらの観測結果と理論曲線を比較して検討する。



# これまでの観測



これらの観測結果と理論曲線を比較して検討する。

# f(R) Gravity

- Einstein-Hilbert 作用

$$\Lambda\text{CDM} : S = \frac{M_{\text{Pl}}^2}{2} \int d^4x \sqrt{-g} (R - 2\Lambda) + S_{\text{m}}(g_{\mu\nu}, \Psi)$$

LagrangianをRicci Scalar Rの  
より一般の関数に拡張

$$\text{f(R) Gravity} : S = \frac{M_{\text{Pl}}^2}{2} \int d^4x \sqrt{-g} f(R) + S_{\text{m}}(g_{\mu\nu}, \Psi)$$

今回はf(R)の代表として, 次のHu & Sawicki model を検証する.

$$f(R) = R - \lambda R_c \frac{(R/R_c)^{2n}}{(R/R_c)^{2n} + 1}$$

(Hu & Sawicki, Phys. Rev. D 76, 064004 (2007))

# 線形成長率のモデル計算

Hu & Sawicki model:

$$f(R) = R - \lambda R_c \frac{(R/R_c)^{2n}}{(R/R_c)^{2n} + 1}$$

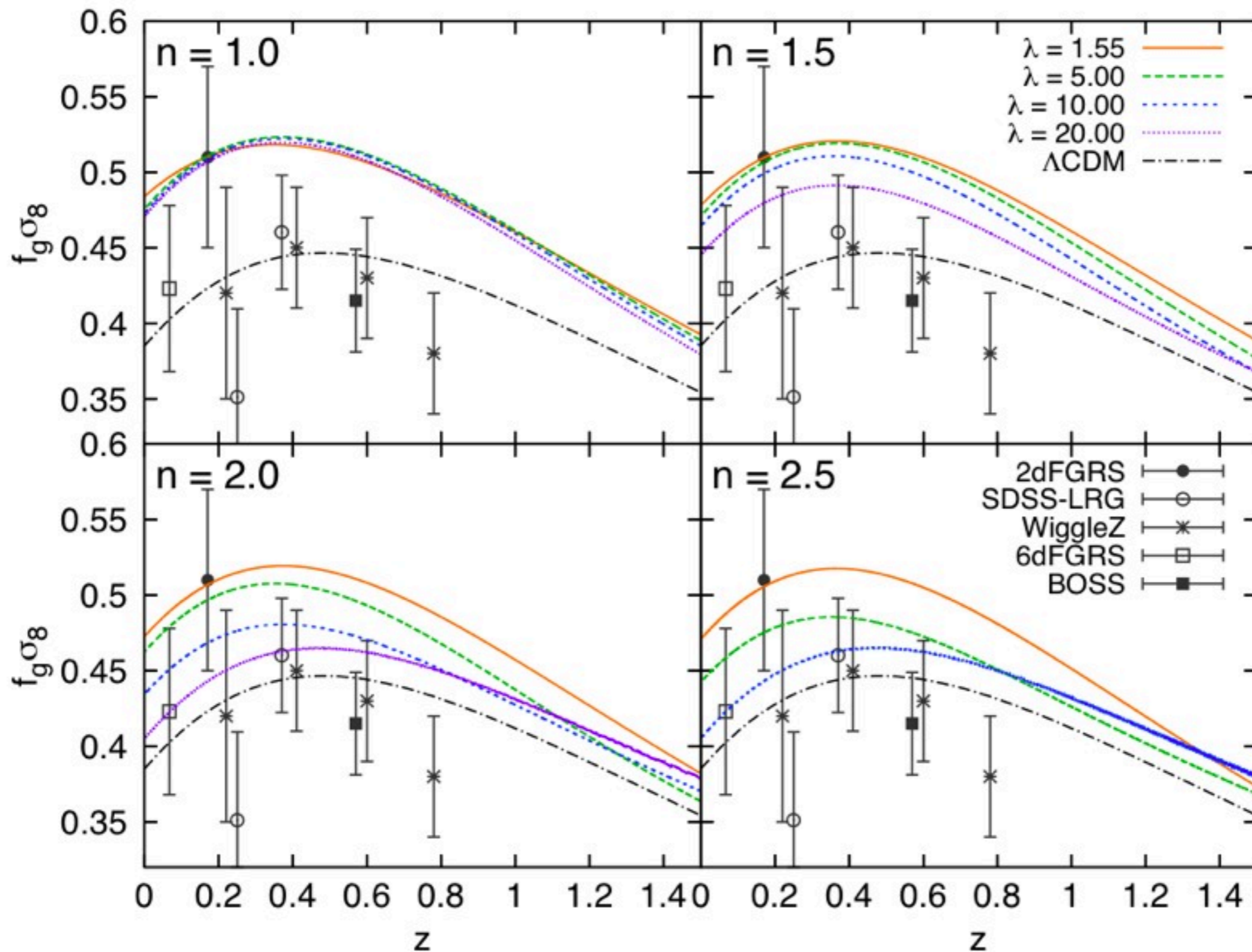
このLagrangianから導かれるEinstein方程式を解く。

- ・ 初期条件: 十分大きい $z$ で  $f(R) \approx R - 2\Lambda, R/R_c \gg 1$
- ・  $z=0$ での条件:  $\Omega_m = 0.28, \sigma_8 = 0.811, h = 0.71$

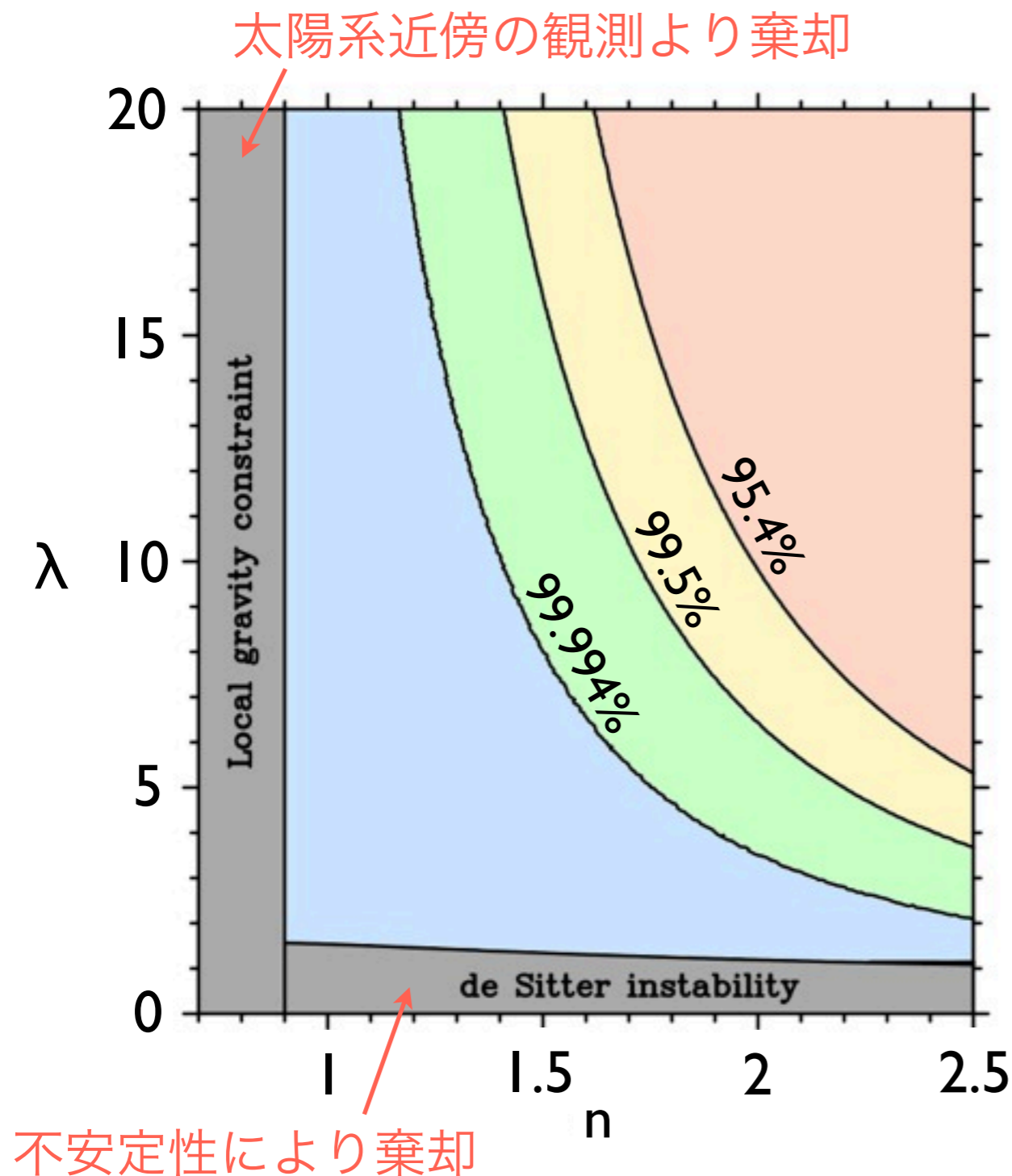
これらの条件のもと, いろいろなパラメータ( $n, \lambda$ )に対して時間発展方程式を解き, 線形成長率 ( $f_g \sigma_8$ ) の時間進化を数値計算で求める。

 これまでの観測結果と比較し, ( $n, \lambda$ ) に制限をつける。

# 線形成長率の進化



# 各パラメータへの制限



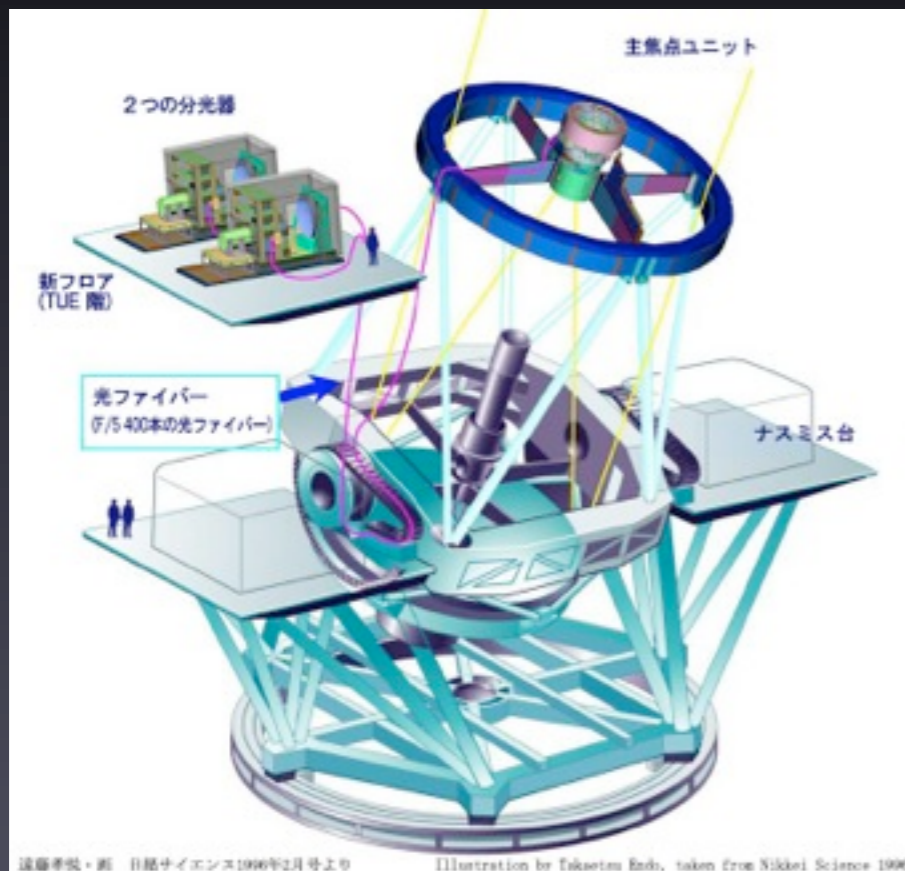
$n, \lambda$ のparameter spaceで confidence levelをplotした.

- 小さい $n, \lambda$ については最新の観測結果からも大きくずれており、ほぼ完全に棄却できる.
- $\Lambda$ CDMと完全に区別するにはまだ統計誤差が大きすぎる. 更なる観測によってより強い制限を得られるだろう.

# FastSound Project

すばるのFMOS（ファイバー多天体分光器）を用いて遠方銀河の近赤外領域のスペクトルから赤方偏移 $z$ を求める。

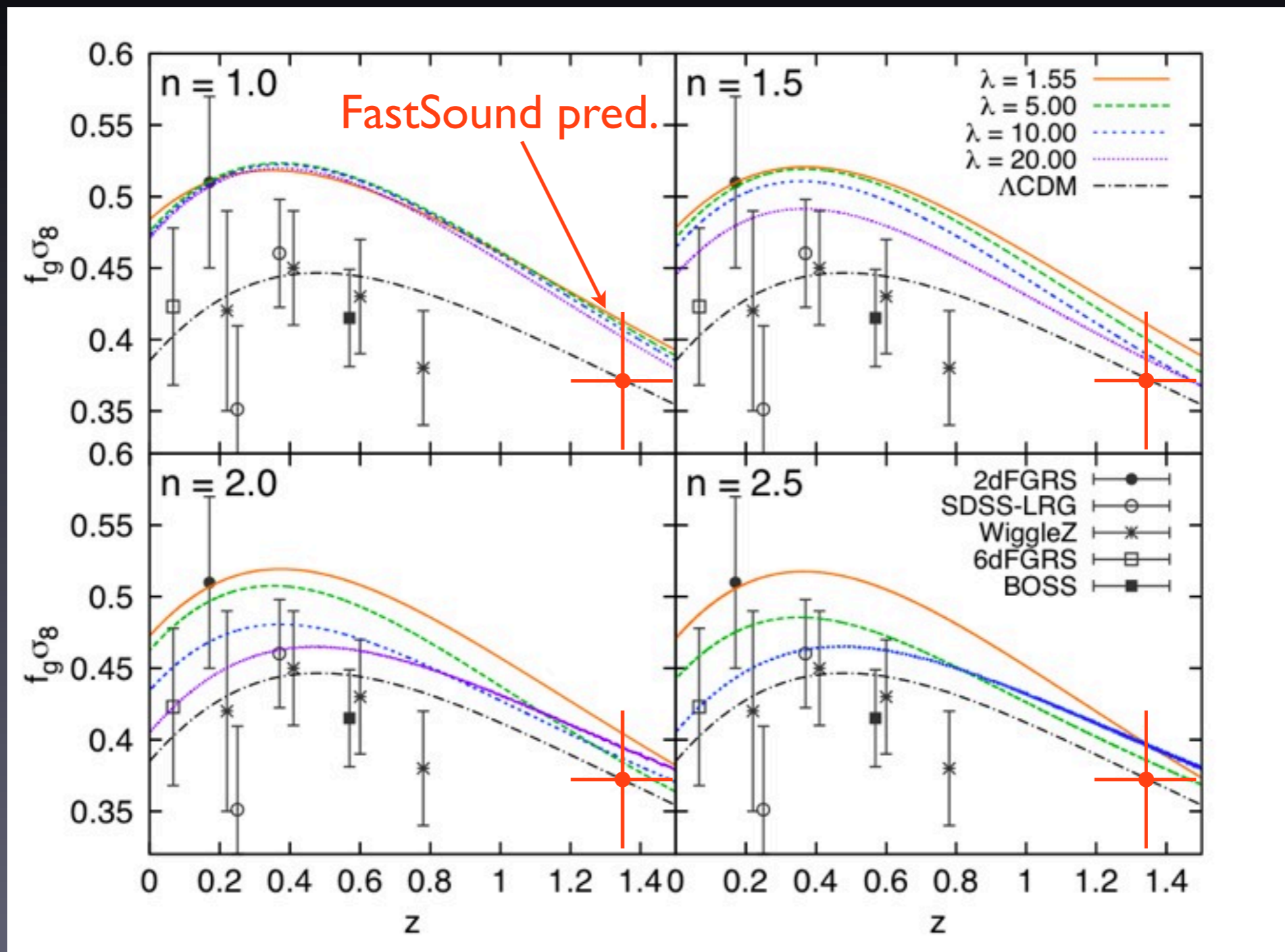
- 期間：2012(稼働中) - 2014春
- 銀河数  $\sim 20,000$
- 赤方偏移  $z \sim 1.2 - 1.5$
- 統計誤差  $\sim 15\%$



<http://subarutelescope.org>

これまででは $z > 1$ の大規模サーベイは行われていなかった。  
FastSoundの観測データから $z \sim 1.35$ に新たなデータ点を打てる！

# FastSoundによる制限



FastSoundによって新たなデータ点が打てるので、制限は強くなる。  
ただし、 $\Lambda$ CDMモデルと $f(R)$  Gravityを区別するには至らないだろう。

# まとめ

- $f(R)$  Gravity のうち Hu & Sawicki model について Einstein 方程式を解いて密度揺らぎの線形成長率を計算した.
- WiggleZ等の観測結果と比較して, Hu & Sawicki model のパラメータとして  $n < 2$ ,  $\lambda < 10$  は完全に棄却される.
- より強い制限を得るにはさらに統計誤差の少ない surveyが必要である.
- 今後の研究として, 他の修正重力理論についても同様の計算をして制限をつける.



# 補足

$$\underbrace{P^s(\mathbf{k})}_{\substack{\text{赤方偏移空間} \\ \uparrow \\ \text{観測}}} = \left(1 + \frac{f_g}{b} \mu^2\right)^2 \underbrace{P(k)}_{\substack{\text{実空間} \\ \uparrow \\ \text{解析的に求める}}}$$

実際に直接測れるのは、 $\frac{f_g}{b}$  と  $b\sigma_8$  であり、  
これから  $f_g\sigma_8$  が求められる。

ここで、 $\sigma_8$  は密度揺らぎの大きさの  
 $8h^{-1}\text{Mpc}$  のスケールでの平均値。

観測・理論ともに  $f_g$  ではなく  $f_g\sigma_8$   
を使うことでerrorを小さくできる。

# Future Observations

