

The Subaru FMOS redshift survey at $z \sim 1.4$: the survey report and scientific results

舎川元成、戸谷友則（東大・天文）、奥村哲平、
矢部清人（Kavli IPMU）、他FastSoundチーム

2015/11/18
観測的宇宙論WS

Contents

■ Introduction

- FastSoundプロジェクト
- ダークエネルギー問題・赤方偏移空間歪み (RSD)

■ FastSoundサーベイの観測

- Strategy and observation
- Data Reduction

■ Scientific Analysis

- RSDによる $f\sigma_8$ 測定・一般相対論テスト
- Fundamental Metallicity Relation
- Galaxy – Intrinsic Alignment Correlation

■ データリリース

FastSound project

■ FastSound: すばる望遠鏡/FMOSによる赤方偏移サーベイ

- H α 輝線銀河 ($z=1.2-1.5$) の三次元地図を作成
- Redshift Space Distortion (RSD) の検出 @ $z>1$
- 構造形成スピード $f\sigma_8$ 測定 → 修正重力理論への制限

■ Current Status

- FMOS commission in 2010
- 2011年9月, 10月 FastSound 試験観測
- 2012—2014年 の35晩で本観測完了
- RSD解析ほぼ完了

Dark Energy

■ 宇宙は現在加速膨張している

■ 加速膨張の原因

➢ 未知のエネルギー形態？

➢ 修正重力理論？

■ 大規模構造の形成速度 f

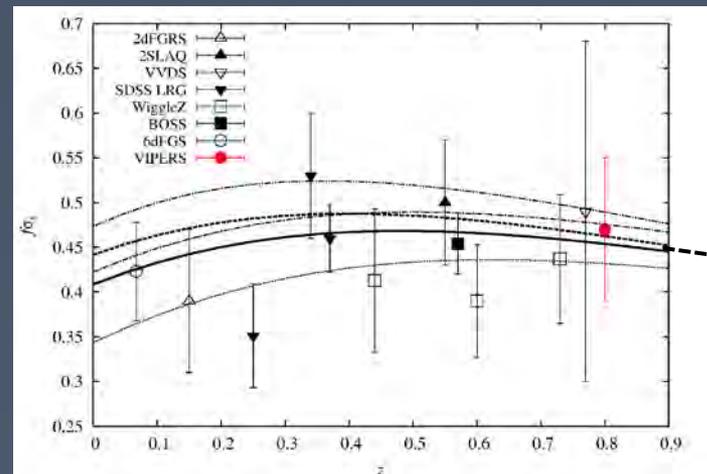
➢ 重力理論の検証・識別

➢ RSDによって測定可能

■ FastSound: $z=1$ を超える世界初のRSDサーベイ

➢ f の時間進化を観測、 Λ CDMモデルの検証

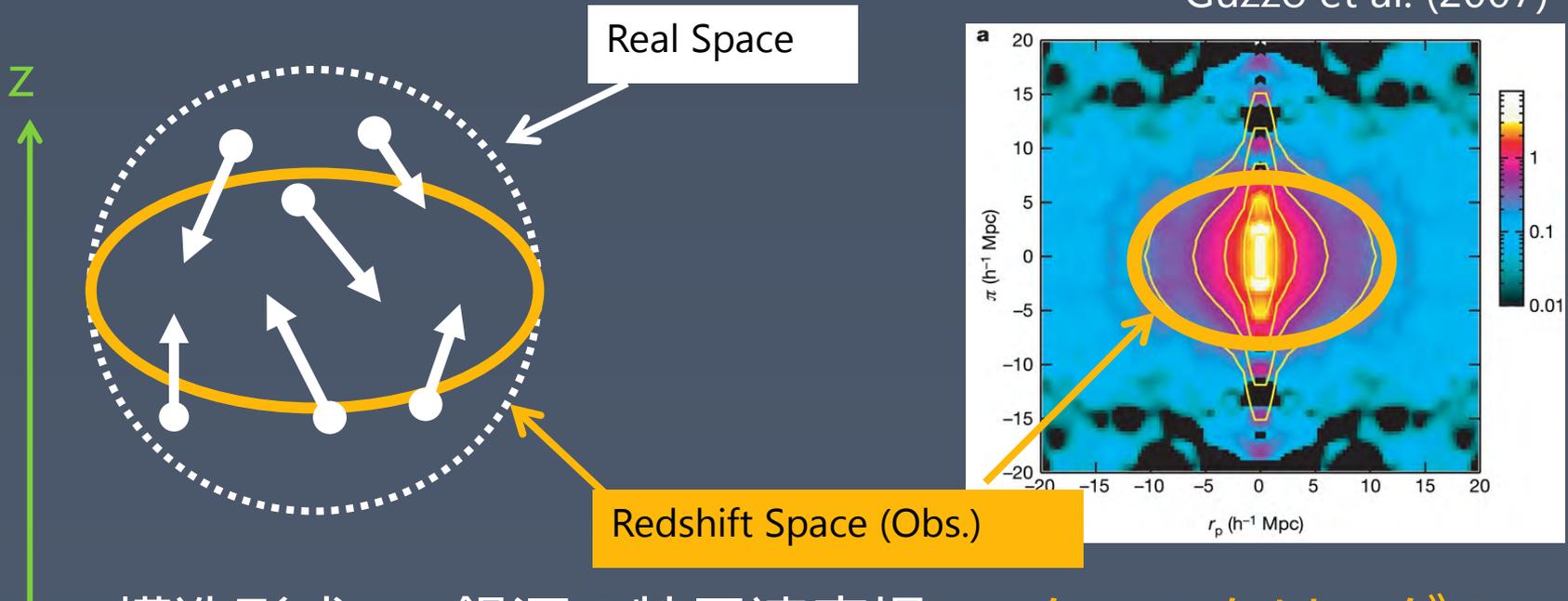
de la Torre et al. 2013



FastSound Target

Redshift Space Distortion (RSD)

Guzzo et al. (2007)



■ 構造形成 -> 銀河の特異速度場 -> クラスターリングの非等方性

■ 線形領域で $P^{obs}(k, \mu) = \left(1 + \frac{f\mu^2}{b}\right)^2 P^{real}(k)$

- $\mu = \cos\theta$ (θ : 観測者の視線方向と波数ベクトルを作る角度)
- b : バイアスパラメータ

Redshift Space Distortion (RSD)

$$\blacksquare P^{obs}(k, \mu) = \left(1 + \frac{f\mu^2}{b}\right)^2 P^{real}(k)$$

観測的には“大規模構造の歪みの度合い”

理論的には“構造形成スピード(growth rate)”

(重力理論によって異なる関数形)

$$f = \frac{d \ln \delta}{d \ln a}$$

$$P(k) = \langle |\delta(k)|^2 \rangle$$

$$\delta(k) = \frac{1}{V} \int \delta(x) e^{-ikx} d^3x$$

$$\delta(x) = \frac{\rho(x) - \bar{\rho}}{\bar{\rho}}$$

b: galaxy bias

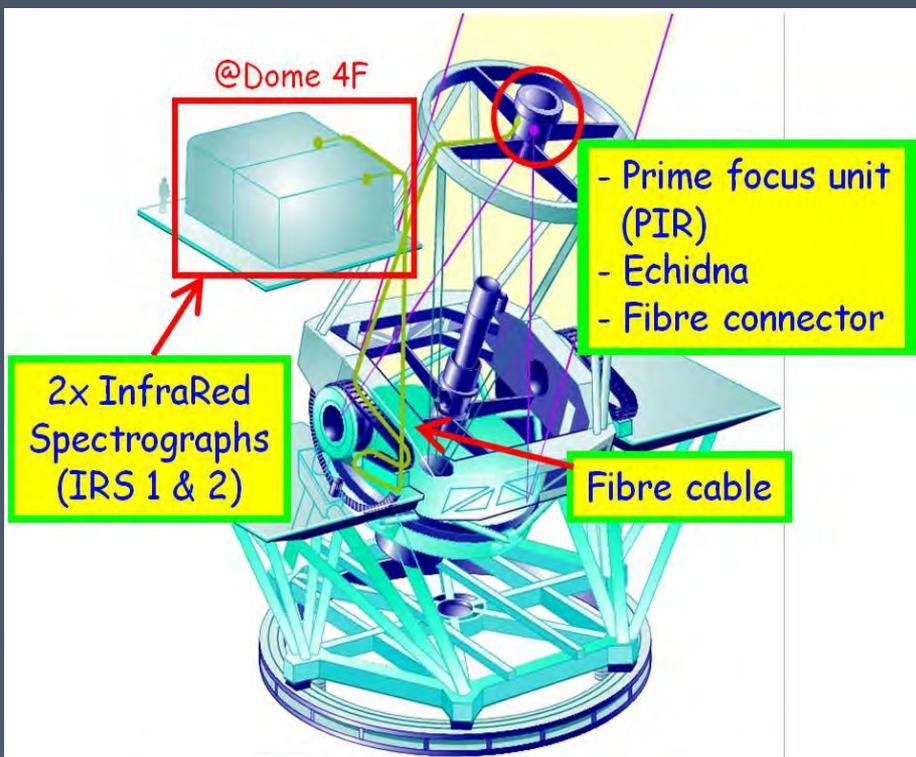
a: scale factor

D: growth factor

$\mu = k_{\parallel} / |k|$

■ f の測定 → 重力理論の検証！

FMOS / Fiber Multi-Object Spectrograph



■ FMOS: すばる望遠鏡の近赤外分光器 (主焦点)

- 0.9 μm – 1.8 μm
- 視野直径30' (0.2deg², 満月1つ分)
- 一度に400天体を分光
- H α λ 6563 @ $z \sim 1.4$

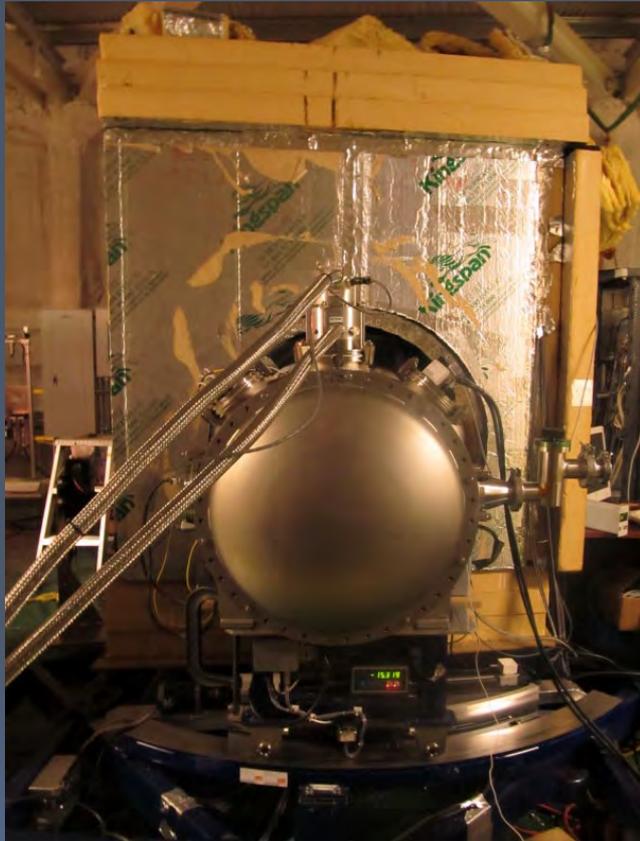
■ 明るい H α 輝線 = より遠方のサーベイが可能!

■ OH mask による夜光除去

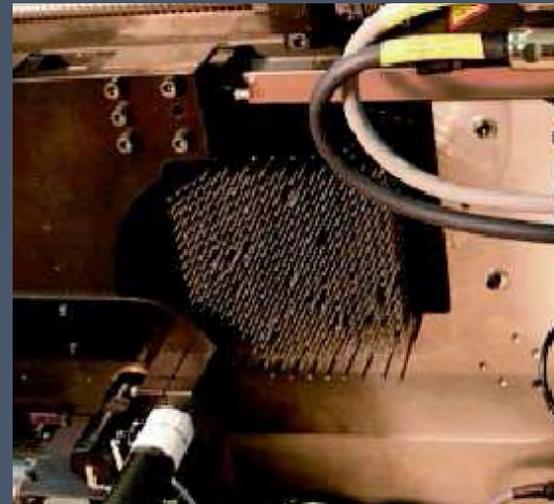
- 近赤外分光のノイズ源を大幅に遮断



IRS2 spectrograph



echidna



+



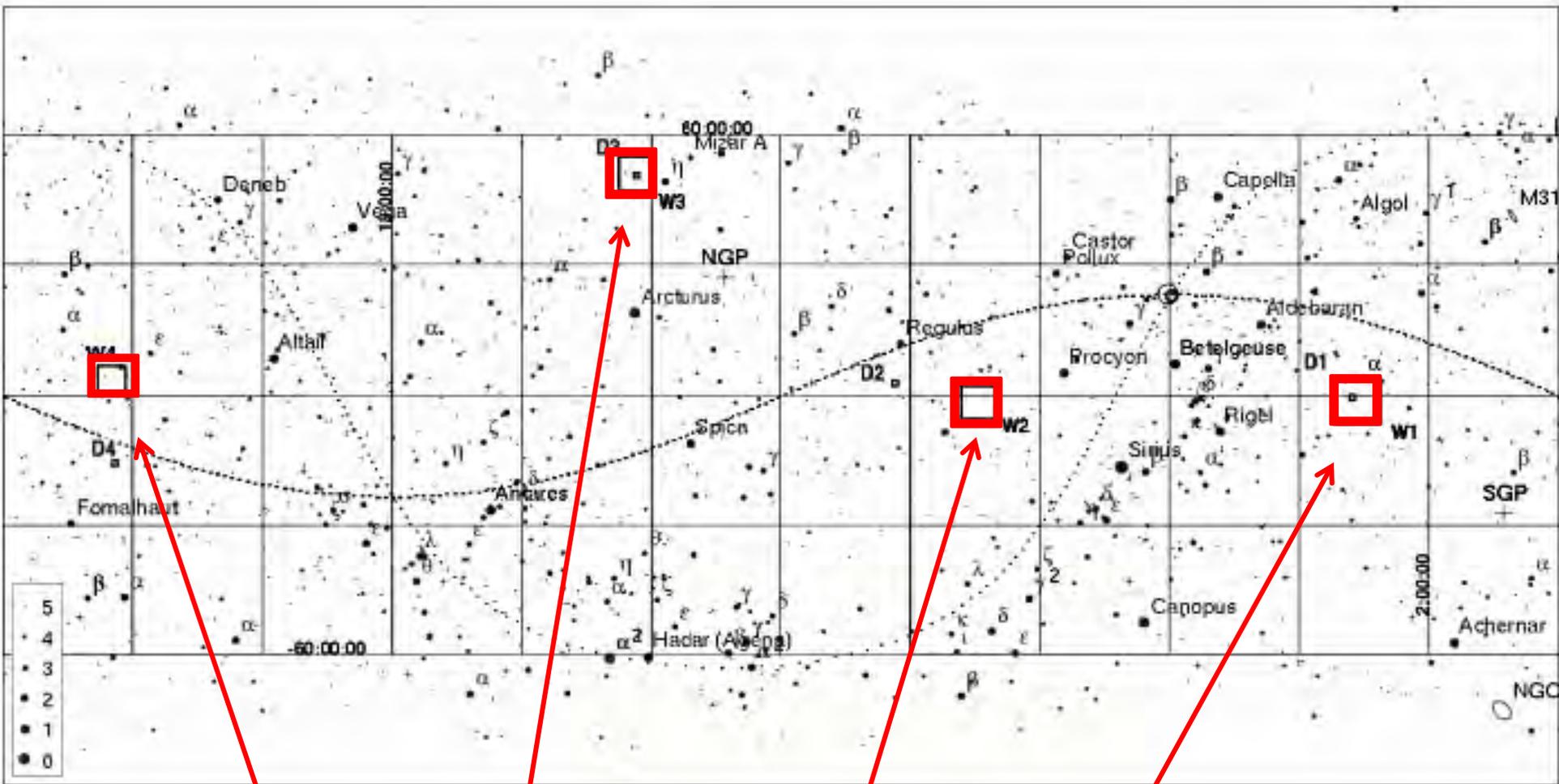
FastSound Survey overview

■ サーベイ領域

- CFHTLS W1 – W4
- 他のサーベイとなるべく overlapするように視野選択

■ 分光ターゲット選択

- CFHTLS 可視5バンド $u^*g'r'i'z$ による photo-z selection
- 近赤外データ (UKIDSS) の導入も検討(Tonegawa et al. 2014)
 - Success Rate の向上はわずか
 - FastSound 領域をカバーしていないため、系統誤差の恐れあり
 - 最終的には使用せず

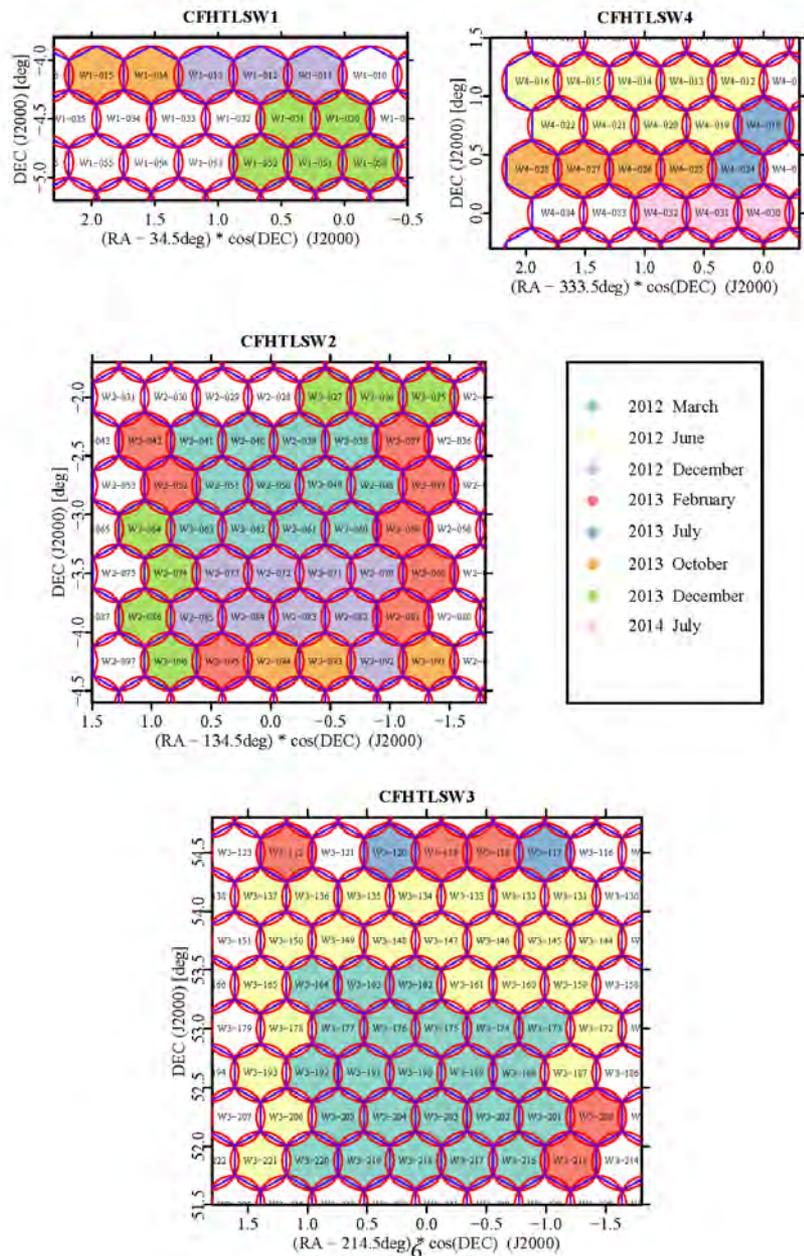


Wide 4

Wide 3

Wide 2

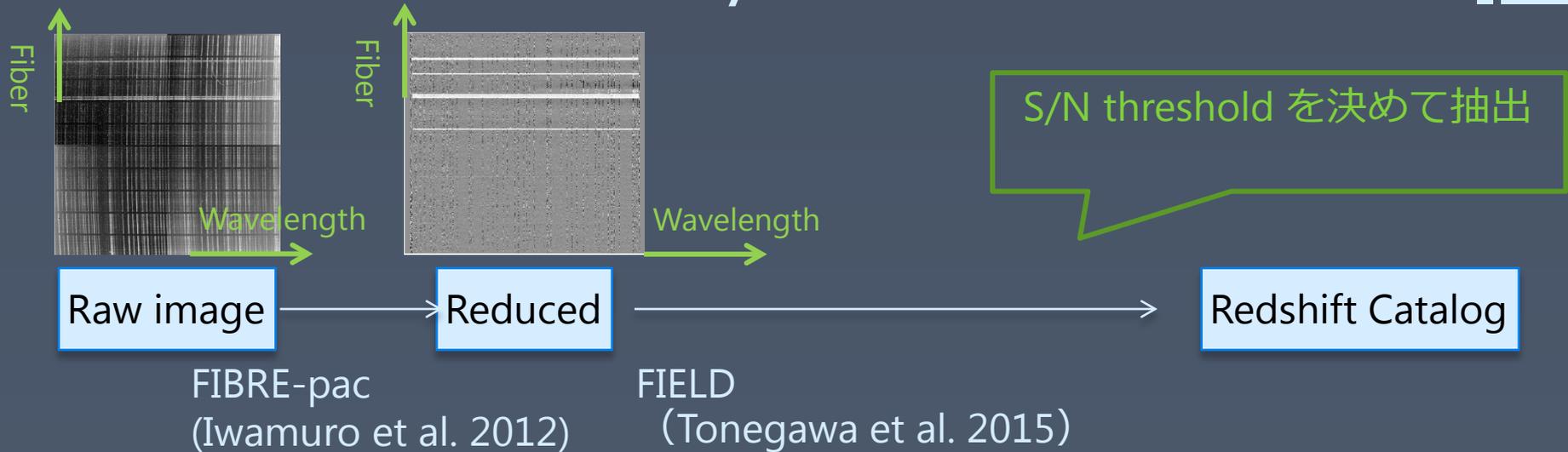
CFHTLS Wide 1



■ 観測した視野

- W1: 10 FoVs (2deg²)
 - overlap with HiZELS, SXDS, UKIDSS, VVDS, VIPERS
- W2: 39 FoVs (8deg²)
- W3: 54 FoVs (11deg²)
 - overlap with DEEP3
- W4: 18 FoVs (4deg²)
 - overlap with UKIDSS, VVDS

Data Reduction / Line detection



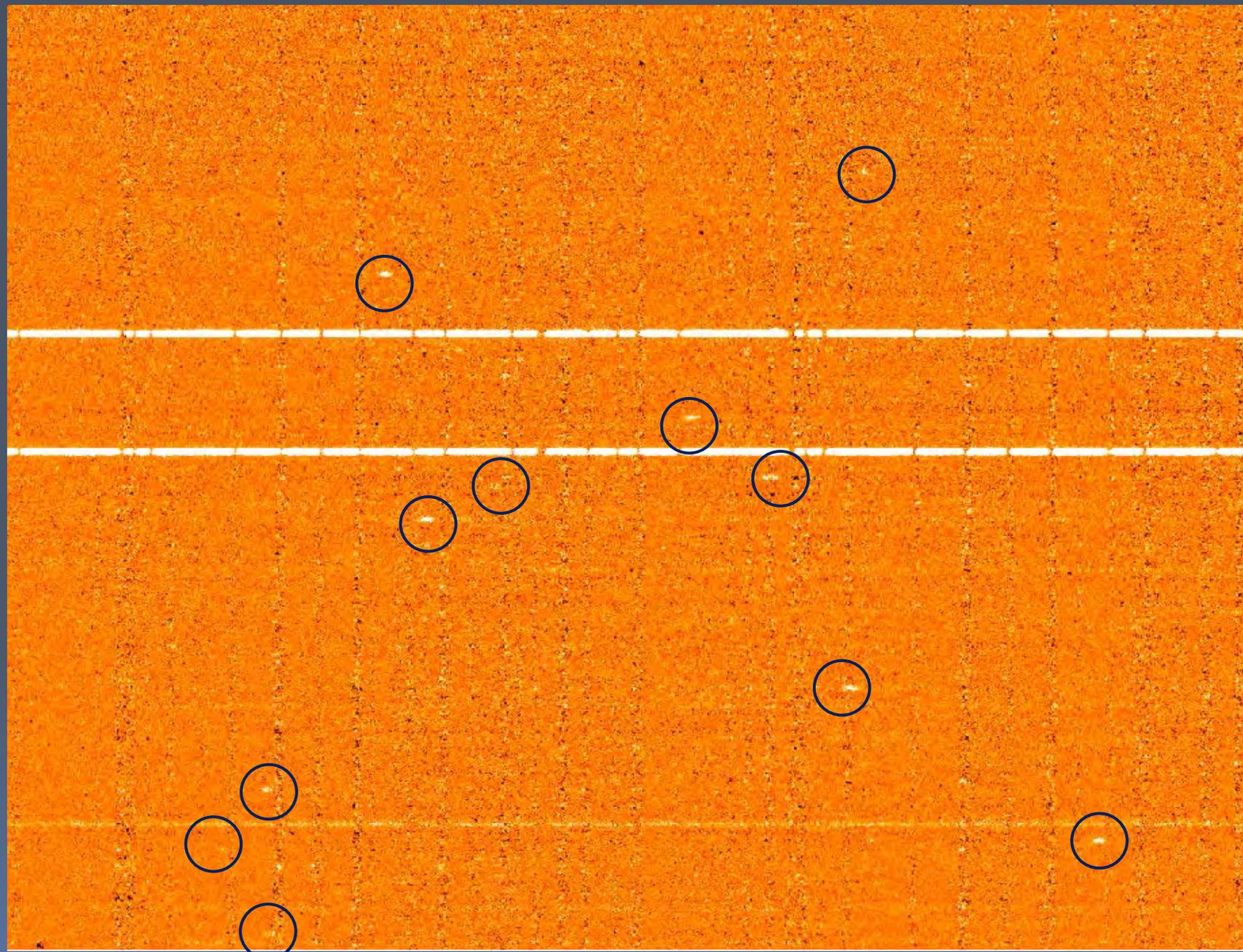
■ Image reduction

- FMOS標準パイプライン(FIBRE-pac)を使用

■ Line search

- 輝線検出ソフトを開発 (Tonegawa et al. 2015a)
- 輝線カーネルと二次元イメージの畳み込みによるS/N計算
- ノイズレベルの精密な評価による誤検出減少
- 一様かつ信頼できる輝線検出が可能に

↑ 空間方向



→ 波長方向

輝線数

- 輝線検出数：~3,800 (S/N>4.5)、~4,800 (S/N>4.0)
- $f\sigma_8$ 測定への系統誤差の要因（後述）
 - 輝線でないものの誤検出（5%~10%）
 - H α 輝線以外の輝線の混入（<10%）

Emission lines	S/N > 4.5	S/N > 4.0
W1	239 (14)	318 (27)
W2	1535 (75)	1950 (185)
W3	1528 (98)	1929 (224)
W4	436 (26)	557 (75)
Total	3769 (170)	4797 (441)

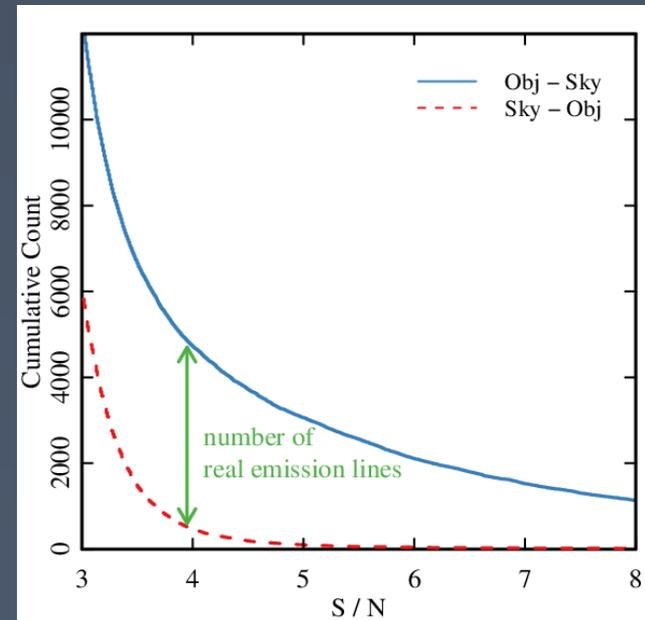
Systematics

■ False Detection rate

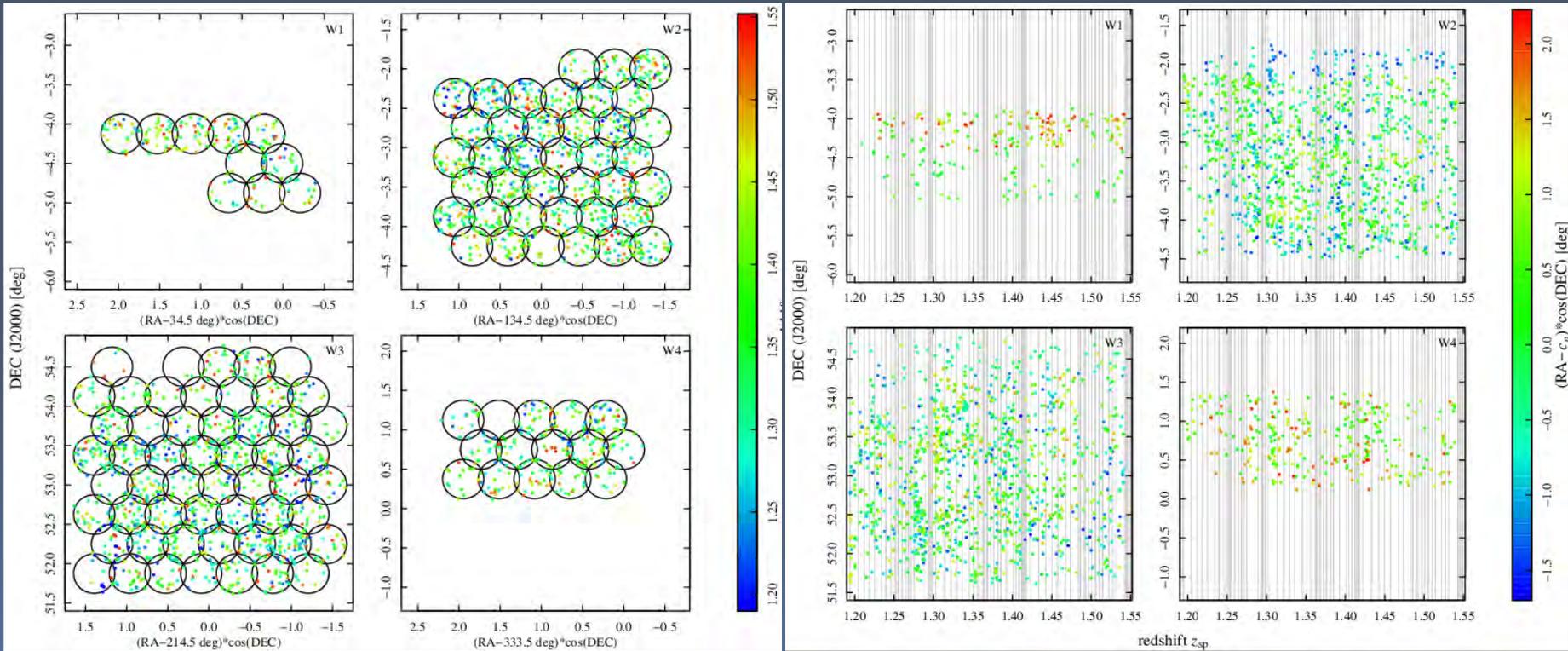
- 正負反転画像に対して輝線サーチ
- False detection rate estimates:
4.5% ($S/N > 4.5$), 9.2% ($S/N > 4.0$)

■ Line confusion

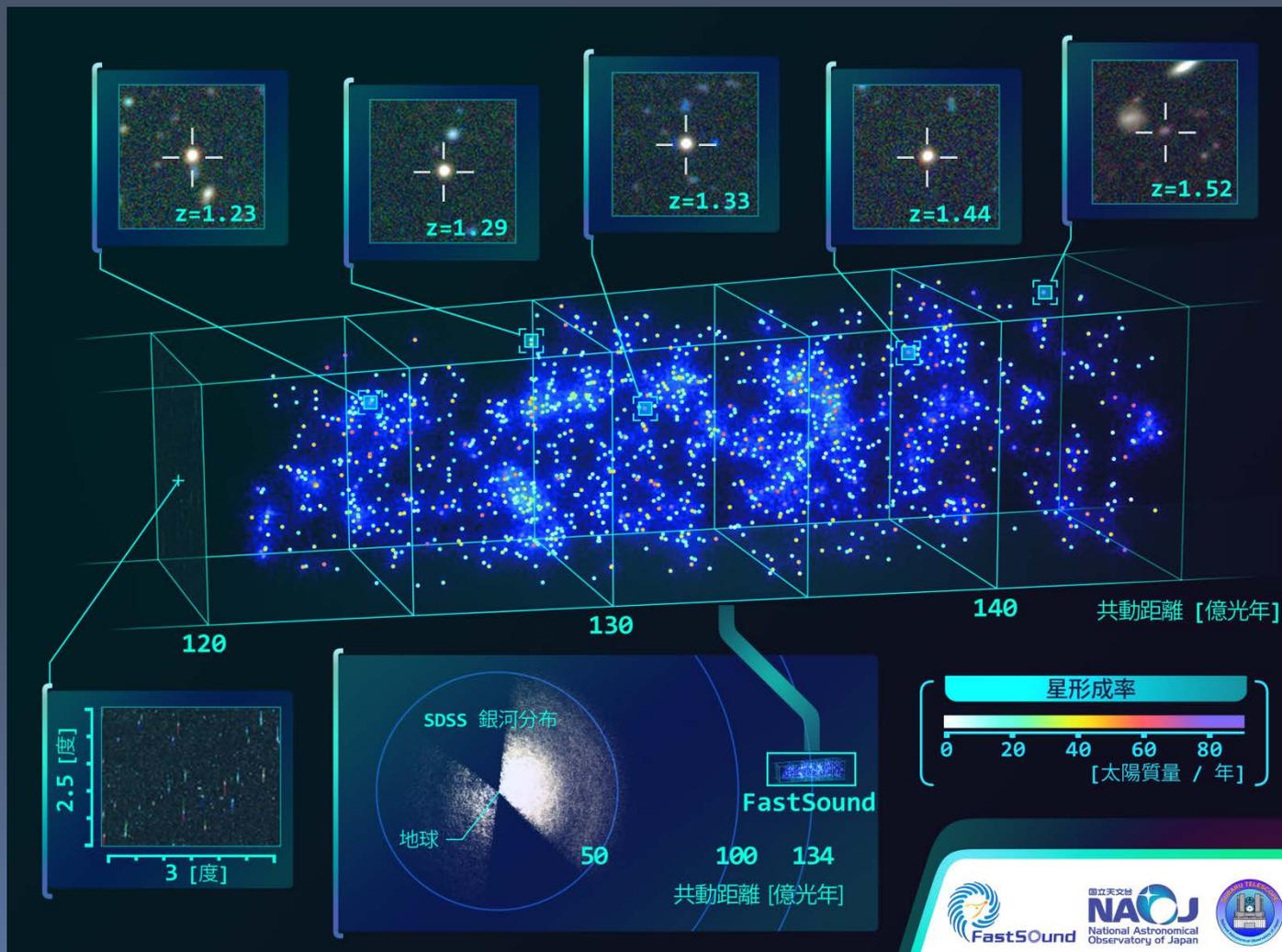
- 基本的に受かる輝線は1本（観測波長が広くないため）：
本当にH α 輝線か？
- 輝線毎の判別は不可能：別輝線混入の影響を $f\sigma_8$ 測定時に補正
- [OIII] $\lambda 5007$ @ $z \sim 2$ の混入がもっとも大きく、約4.4%混入
 - 2本以上輝線が受かっている銀河を利用して推定 (Okada+15)



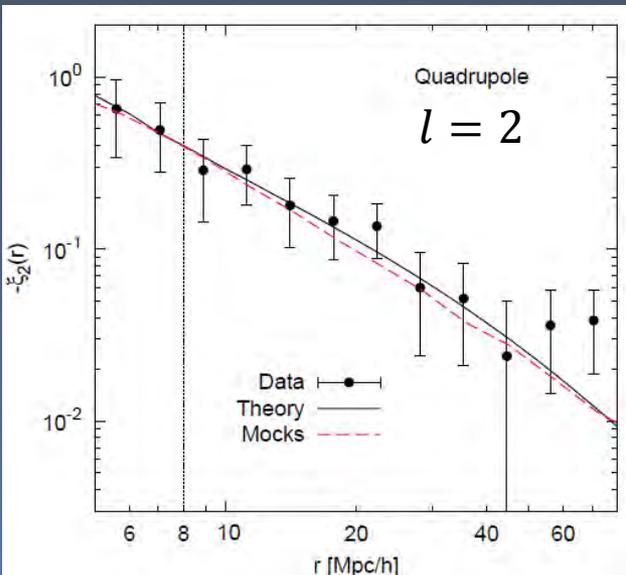
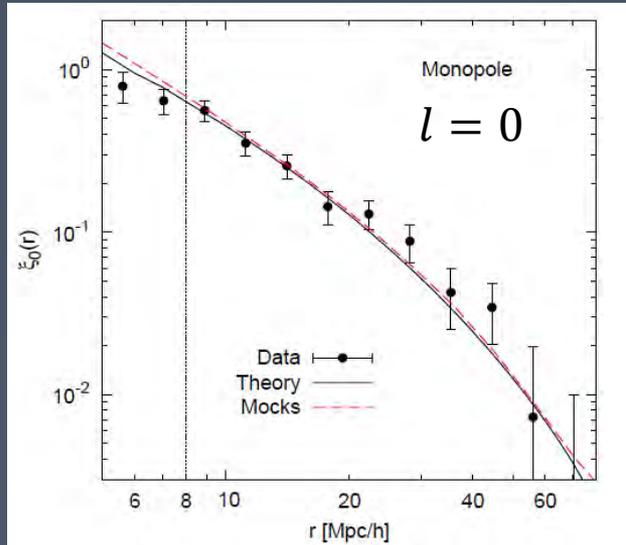
Galaxy 3D distribution



Press-Released 3D map (W3)



クラスターリング解析



■ 相関関数測定

- Landy-Szalay estimator

$$\xi(r, \mu) = (DD - 2DR + RR)/RR$$

$$\xi_l = \frac{2l+1}{2} \int_{-1}^1 \xi(r, \mu) L_l(\mu) d\mu$$

$L_l(\mu)$: Legendre polynomials

- $l = 0$: monopole、 $l = 2$: quadrupole (RSD)
- Error bars from 640 mock catalogs

■ モデルフィッティング

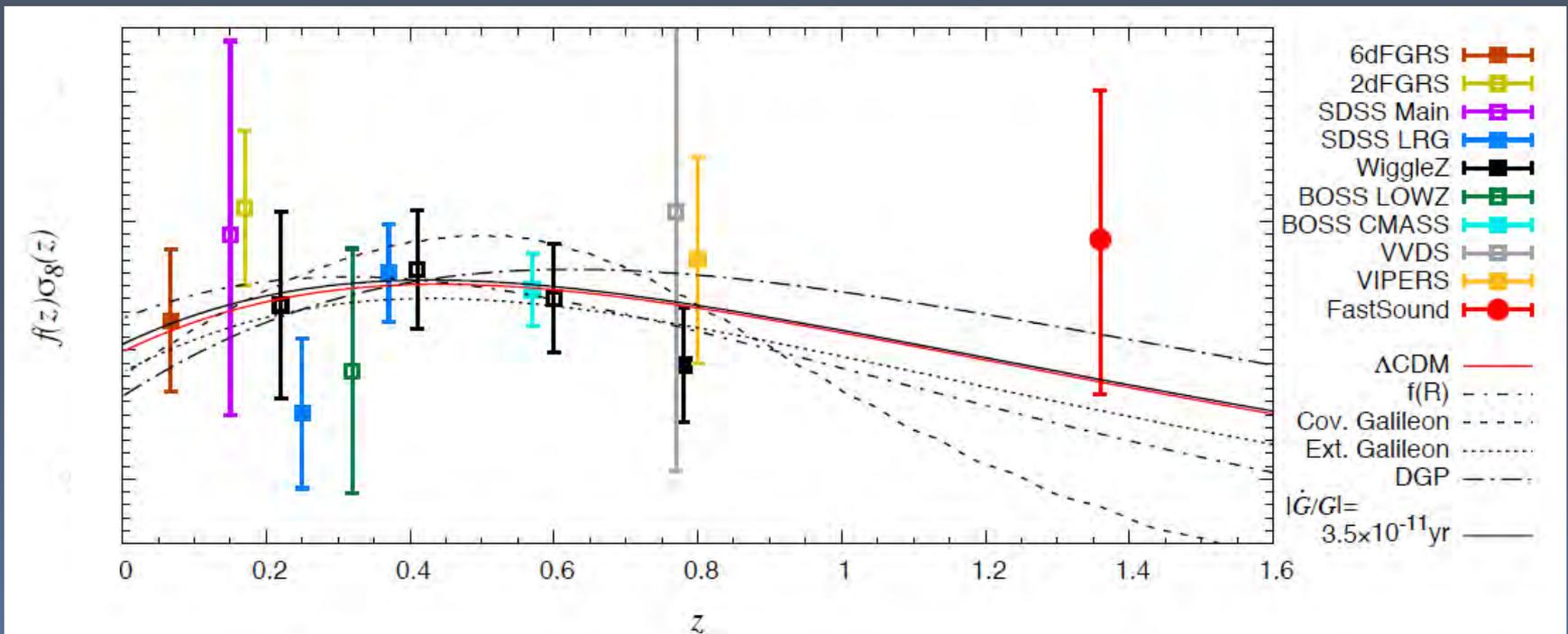
- $8 < r < 80 h^{-1} \text{Mpc}$
- Kaiser model + nonlinear P_m

■ 系統誤差の詳細な検討

- OH mask付近の検出効率低下補正
- ファイバーの構造的制約によるターゲット損失の補正
- 輝線の誤検出 / H α 輝線以外の混入

$f\sigma_8$ measurement at $z \sim 1.4$

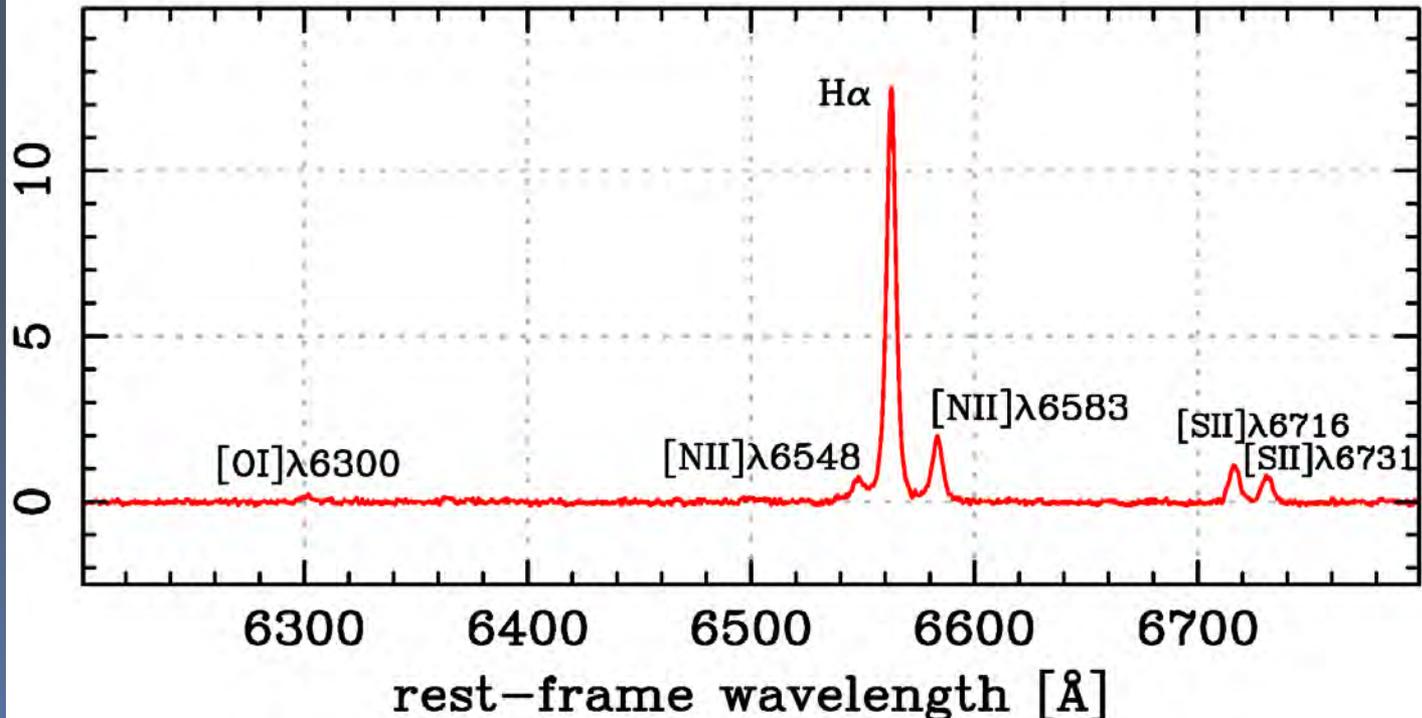
- 4.2σ detection of RSD
- consistent with Λ CDM within 1σ



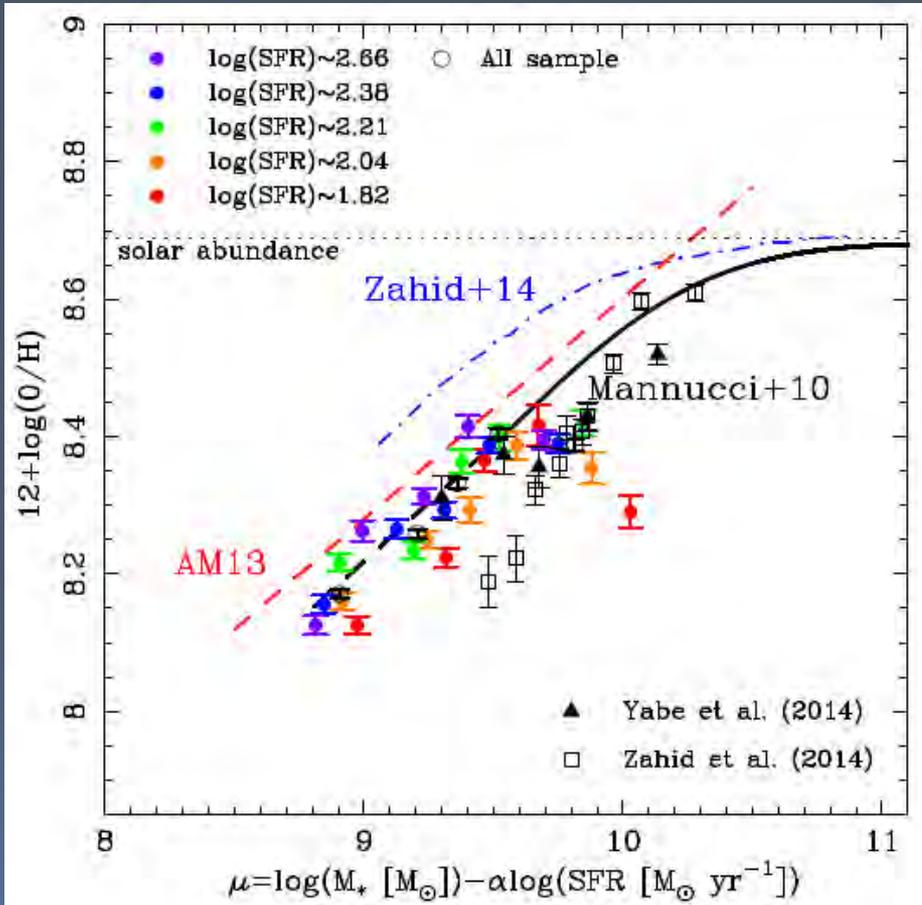
Stacked spectrum

- $H\alpha$: Indicator of star-formation rate
- $[NII]/H\alpha$: Indicator of metallicity

F_λ [10^{-14} erg s^{-1} cm^{-2} \AA^{-1}]



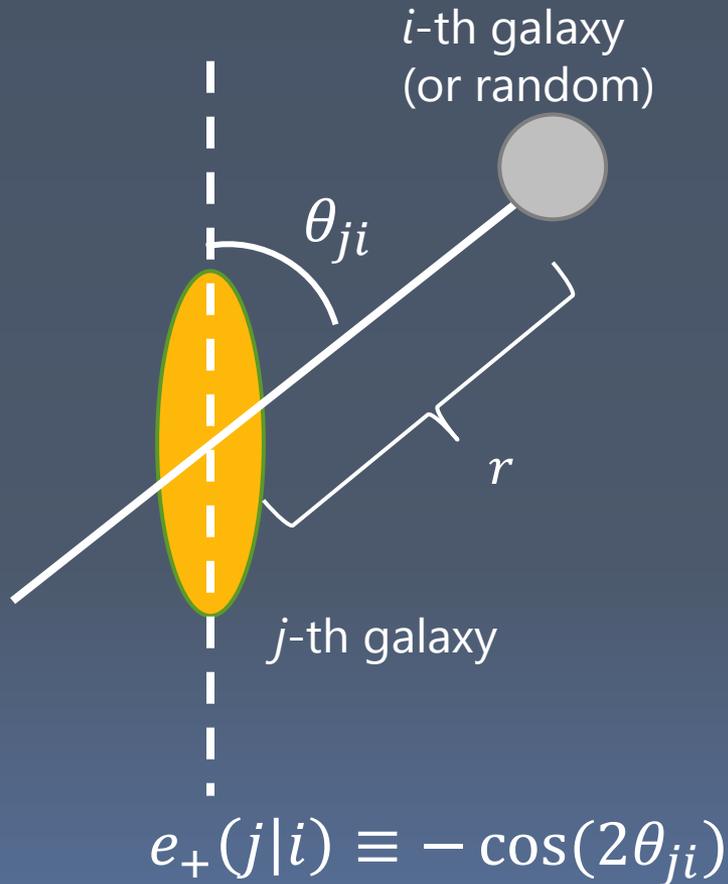
Fundamental Metallicity Relation



Paper III; Yabe et al. 2015

- local galaxies の M_* , SFR, metallicity (Z) は、3次元空間上の2次元平面上に乗る (FMR; Mannucci+10)
 - 銀河形成・進化への示唆
 - FMRの時間進化はあるか？
- FastSound銀河 ($z \sim 1.4$) の metallicity $Z(M, SFR)$ は、localよりも若干低い
 - FMRの時間進化を示唆

GI correlations



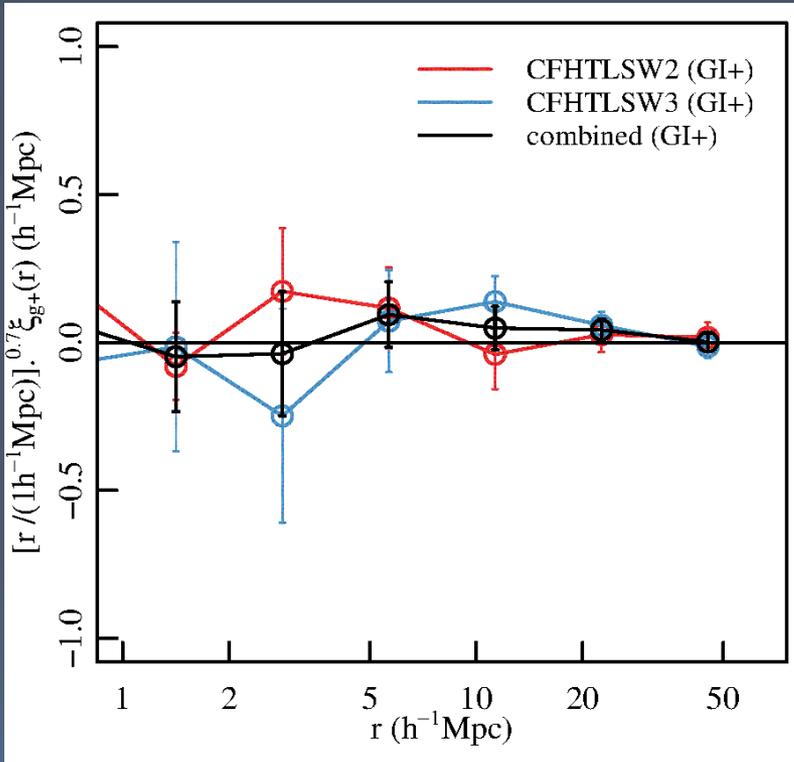
■ Galaxy-Intrinsic alignment correlation

- 大規模構造内の銀河形状の指向性
- 弱重力レンズサーベイの系統誤差になりうる量
- 銀河形成・進化にも関係

■ $\xi_+(r) = \frac{S_{+D} - S_{+R}}{RR}$

- $S_{+D} = \sum_r e_+(j|i)$ (i: galaxy, j: galaxy)
- $S_{+R} = \sum_r e_+(j|i)$ (i: random, j: galaxy)
- $RR = \sum_r 1$ (i: random, j: random)

GI correlation



- FastSound+CFHTLenSでクロスマッチが取れた天体について、GI相関を計算
- GIシグナルはゼロコンシステント

	Early-type	Late-type
$z < 1$	SDSS LRG ($z \sim 0.5$) GIシグナルあり	WiggleZ ($z \sim 0.7$) GIシグナルなし
$z > 1$	観測例なし	観測例なし FastSound?

Catalog Production / Release

■ 2016年1月頃データ公開予定

➤ (1) FoV-information list

- Selection Function 等の構築に必要なFoVの情報
- FoV ID, 観測日, ターゲット数, 輝線数, シーイング, フラックス透過率...

➤ (2) Galaxy Catalog

- Target Selection に該当した銀河の情報
- RA, DEC, photo-z, H α flux 推定値, 観測回数, ...

➤ (3) Emission Line Catalog (Normal/Inverted Frame)

- 全ての輝線候補 (S/N>3.0) の情報
- RA, DEC, 波長, 輝線幅, フラックス, ...

Summary

■ FastSound project

- すばる望遠鏡/FMOSによるRSD目的の赤方偏移サーベイ
- $z \sim 1.4$ で約4,000の赤方偏移を取得 ($S/N > 4.5$)

■ Status

- 観測、赤方偏移カタログ化は完了
- RSDをはじめ、いくつかの結果を出版済/出版予定

■ 2016年1月頃データ公開予定