

## FastSound 計画: $H\alpha$ 輝線の同定方法について

岡田 裕行 (東京大学大学院 理学研究科)

### Abstract

FastSound 計画は、すばる望遠鏡 FMOS を用いた大規模銀河赤方偏移サーベイで、 $1.2 \lesssim z \lesssim 1.5$  における銀河の 3 次元分布を用いて構造形成の成長率を表す  $f(z)\sigma_8(z)$  を測定することで、重力理論に制限を与えることが最終目標である。

FastSound の分光候補天体は CFHTLS による測光カタログの photo- $z$ , color および輝線フラックスの推定値から適切な条件により選択される (Tonegawa *et al.* 2013). FMOS により分光観測された銀河から、自動輝線検出ソフト FIELD (Tonegawa *et al.* 2014) によって  $H\alpha$  輝線を検出し、約 3,200 天体の赤方偏移などの物理量の推定した。

FIELD による自動検出で得られた銀河カタログのなかでも複数の輝線が検出されている天体については輝線波長比から  $H\alpha$  輝線の確実な同定が可能であり、カタログの信頼度を検証することができる。上記の複数輝線天体の解析により全カタログ中の [OIII], [SIII] 輝線の混入率は合わせて  $4.0_{-0.8}^{+1.0}$  % 程度であることがわかった。 $f(z)\sigma_8(z)$  の測定にも非  $H\alpha$  の混入率と同じだけの系統誤差を生じることになるので、測定値に少なくとも  $4.0_{-0.8}^{+1.0}$  % の補正をする必要がある。

## 1 Introduction

宇宙はビッグバンから始まったとされ、現在では宇宙全体が加速度的に膨張しているということが、Ia 型超新星、宇宙マイクロ波背景放射、宇宙の大規模構造の観測により明らかになっている (Riess *et al.* (1998), Perlmutter *et al.* (1999), Spergel *et al.* (2003), Tegmark *et al.* (2004))。

この加速膨張の原因として、現在最も有力とされる  $\Lambda$ CDM モデルをはじめ、ダークエネルギー、修正重力理論などさまざまな仮説が考えられているが、いまだに立証には至っていない。なかでも修正重力理論は、宇宙論的なスケールで一般相対性理論が破れている可能性を考えるもので、実際に  $f(R)$ , Galileon, massive gravity などといったさまざまな修正重力理論に基づく加速膨張宇宙モデルが提唱されている (Clifton *et al.* (2012))。

FastSound 計画の最終目標は、赤方偏移銀河サーベイによって  $z \sim 1.3$  における銀河の 3 次元地図を作成し、それを用いて構造形成の成長率を表す  $f(z)\sigma_8(z)$  を測定することで、重力理論に制限を与えることである。

## 2 FastSound Redshift Survey

FastSound 計画では、すばる望遠鏡 FMOS を用いて、 $1.2 \lesssim z \lesssim 1.5$  における星形成銀河を分光観測し、 $H\alpha$  輝線を検出することで銀河の 3 次元地図を作成し、そのカタログにクラスタリング解析を行って  $f\sigma_8$  を測定する。 $f\sigma_8$  は銀河のクラスタリングの非等方性、Redshift Space Distortion (RSD) として統計量に現れる。表 1 に見られるようにこれまでの RSD を目的とした銀河サーベイは  $z < 1$  に限られており (Percival *et al.* (2004), Blake *et al.* (2011), Samushia *et al.* (2012), Reid *et al.* (2012), Beutler *et al.* (2012), de la Torre *et al.* (2013)), FastSound では  $z = 1$  を超える  $z \sim 1.3$  で初めて  $f\sigma_8$  への制限を得る。

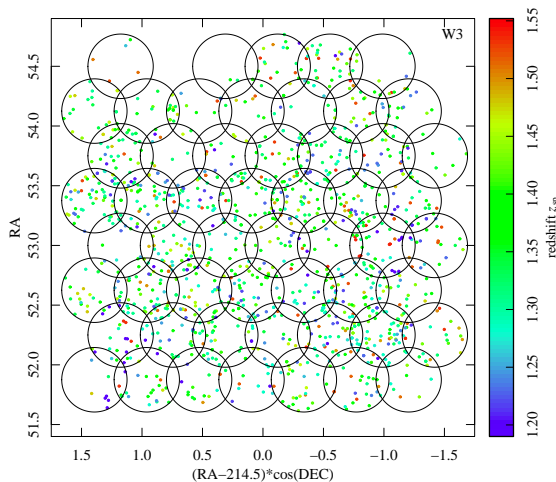
2014 年 7 月 21 日にすべての計画されていた観測が終了し、現在は最終カタログの作成作業に入っている。4 つの観測フィールドで合わせて約 3,200 の銀河サンプルが得られる見込みで、観測領域の一部を使った解析により銀河のクラスタリングの兆候がすでに見られている。

表 1: RSD によって測定された  $f\sigma_8$  の値 .

$z$	$f(z)\sigma_8(z)$	Survey Name (year)
0.067	$0.423 \pm 0.055$	6dFGRS (2012)
0.17	$0.51 \pm 0.06$	2dFGRS (2004)
0.22	$0.42 \pm 0.07$	WiggleZ (2011)
0.25	$0.3512 \pm 0.0583$	SDSS LRG (2011)
0.37	$0.4602 \pm 0.0378$	SDSS LRG (2011)
0.41	$0.45 \pm 0.04$	WiggleZ (2011)
0.57	$0.415 \pm 0.034$	BOSS CMASS (2012)
0.6	$0.43 \pm 0.04$	WiggleZ (2011)
0.78	$0.38 \pm 0.04$	WiggleZ (2011)
0.8	$0.47 \pm 0.08$	VIPERS (1st DR) (2013)

表 2: X 個の high-S/N 輝線 ( $S/N \geq 4.5$ ) と Y 個の low-S/N 輝線 ( $3.0 \leq S/N < 4.5$ ) が検出された天体数のリスト.

X \ Y	0	1	2	$\geq 3$	total
0	-	4896	502	63	5461
1	2335	595	121	28	3079
2	71	24	6	5	106
$\geq 3$	7	2	1	2	12
total	2413	5517	630	98	8658

図 1: 観測領域のひとつ, “W3” の銀河地図 . 各円が観測領域を表している . 複数の輝線が検出された場合は  $S/N \geq 4.5$  かつ最も  $S/N$  の高いものが  $H\alpha$  輝線であると仮定して redshift に換算してある .

### 3 Emission Line Catalog

観測によって得られた分光データは, FastSound チームによって開発された自動輝線検出ソフト FIELD (Tonegawa *et al.* 2014) により, 輝線候補とそのパラメータ (中心波長, 輝線幅, 輝線フラックス,  $S/N$  など) がカタログ化される . 波長を redshift に換算することで 図 1 のような銀河カタログが得られる .

FastSound の分光ターゲットは CFHTLS Wide の photometric redshift (photo- $z$ ) によって選んでいるが, photo- $z$  が大きく間違っていれば  $H\alpha$  ではない輝線, 例えば [OIII] などが観測波長域に紛れ込む可能性がある . FastSound の分光観測では, ほとんど輝線のみが検出され, continuum まで見ることはできないため, 個別の天体に対して検出された輝線を同定することは非常に困難である . そのため統計的にどの程度の割合で非  $H\alpha$  輝線が混入するか評価することで, 銀河カタログの信頼度を検証することが必要不可欠である .

自動検出における問題として, 検出器自体のノイズや宇宙線のような “偽輝線” も候補として選んでしまうことがある . こちらも個別の輝線に対して “本物” と “偽” を区別することは難しいため, 統計的に “偽輝線” がどの程度混ざるかを考える .

通常の観測では object-sky (normal frame) をデータとして用いるが, sky-object (inverted frame) についても自動検出を行う . object, sky とともにランダムなノイズは等確率に現れるはずなのでこの方法で偽輝線を個数を見積もることができる .

以下で述べる結果はすべて 2014 年 1 月までの観測データを解析した結果である .

図 2 のように,  $S/N < 4.5$  では急激に inverted frame の輝線候補が増え, カタログに含まれる偽輝線も多いので,  $S/N \geq 4.5$  のものを本物の輝線と見なすことにする . この条件で輝線天体は 3,197 個となる . なお,  $S/N \geq 4.5$  の中でも 5% 程度の偽輝線が含まれるが, こちらは別に補正する .

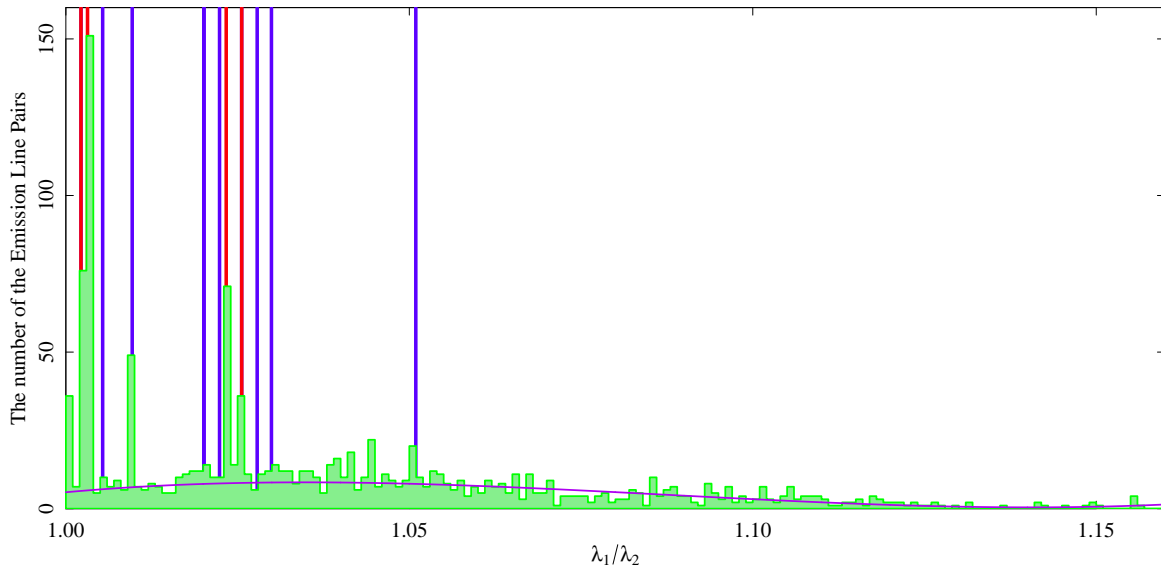


図 3: 複数輝線天体の波長比分布．赤の縦線の位置は  $H\alpha + [NII]$ ,  $H\alpha + [SII]$  の波長比に相当し，青の縦線は  $H\alpha$  を含まない輝線ペア（ $[OIII]$  doublet,  $[SIII]$  doublet, など）の波長比に相当する．また，紫色の曲線はノイズによる偽ペアの個数の期待値を表す．

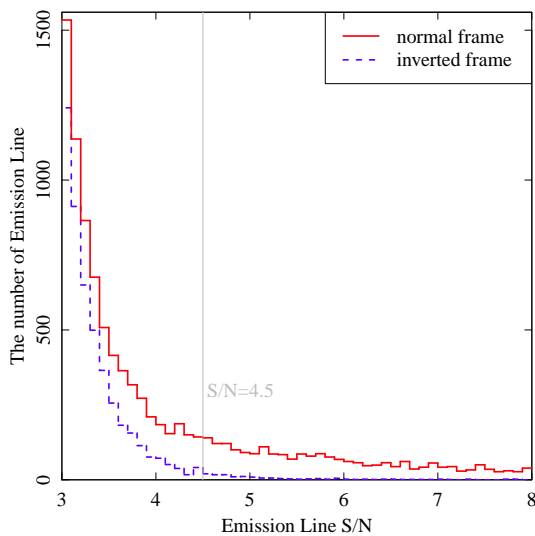


図 2: 輝線カタログの  $S/N$  分布．normal frame と inverted frame (= 偽輝線のみ) における輝線の個数を表す． $S/N \geq 4.5$  では偽輝線は少なく 5% 程度である．

のような天体を“複数輝線天体”と呼ぶ．

$S/N \geq 4.5$  の輝線に限ると，複数輝線天体は銀河カタログ全体の 4% と少ないため，2 本目の輝線の条件を  $S/N \geq 3.0$  まで緩め，こちらの複数輝線天体カタログを用いることにする．この条件では 862 個，全天体の 27% が複数輝線天体となる．なお，2 本目の輝線は偽輝線である可能性が高くなるが，ノイズとして後から引くことにする．

図 3 は検出された輝線ペアの波長比分布である．波長測定の誤差は典型的に  $< 4 \times 10^{-4} \mu m$  程度であるため，波長比にして 0.05% の誤差を許して波長比の理論値と比較し，輝線の組を特定する．表 3 にその結果をまとめる．ともに real な輝線であるペアは 509.7 組ある中， $H\alpha + X$  が 60% を占める一方，他の  $H\alpha$  以外の輝線ペアに同定されたものは  $[OIII]$  をはじめ 13% あった．

## 4 Emission Line Identification

1 天体に 2 本以上の輝線が検出されていれば，その波長比から輝線の組を同定することができる．そ

表 3: 輝線ペアの同定結果 (preliminary) . 割合は, ノイズを差し引いた輝線ペアの総数の推定値 509.7 に対するものである .

輝線ペア	ペア数	割合
H $\alpha$ + [NII] $\lambda$ 6583	190.1 $^{+15.0}_{-14.0}$	37.3 $^{+2.9}_{-2.7}$ %
H $\alpha$ + [NII] $\lambda$ 6548	25.3 $^{+6.6}_{-5.5}$	5.0 $^{+1.3}_{-1.1}$ %
H $\alpha$ + [SII] $\lambda$ 6716	57.7 $^{+9.2}_{-8.1}$	11.3 $^{+1.8}_{-1.6}$ %
H $\alpha$ + [SII] $\lambda$ 6731	29.6 $^{+7.2}_{-6.1}$	5.8 $^{+1.4}_{-1.2}$ %
[OIII] doublet	43.1 $^{+8.1}_{-7.0}$	8.5 $^{+1.6}_{-1.4}$ %
[SIII] doublet	3.7 $^{+4.6}_{-3.4}$	0.7 $^{+0.9}_{-0.7}$ %
H $\beta$ + [OIII] $\lambda$ 5007	9.9 $^{+5.3}_{-4.2}$	1.9 $^{+1.0}_{-0.8}$ %
H $\beta$ + [OIII] $\lambda$ 4861	8.4 $^{+5.2}_{-4.1}$	1.6 $^{+1.0}_{-0.8}$ %

## 5 Contamination from non-H $\alpha$ Emisison Lines

輝線フラックス比の解析から doublet については“単輝線天体”についても非 H $\alpha$  輝線の個数を見積もることができる . [OIII] doublet, [SIII] doublet については輝線強度比が原子物理によりそれぞれ, 正確に 3:1, 2:1 であるため, 輝線のフラックス分布を解析することで単輝線天体について検出率を推定することができる . この結果を考慮すると, [OIII], [SIII] はそれぞれ S/N  $\geq$  4.5 の銀河カタログに 3.9 $^{+0.7}_{-0.6}$  %, 0.17 $^{+0.21}_{-0.16}$  % 含まれることが示される . 非 H $\alpha$  輝線の混入率はそのまま  $f\sigma_8$  の系統誤差となるので, すなわち, 4.0 $^{+1.0}_{-0.8}$  % の補正をする必要があることを示唆する .

## 6 Conclusion & Future Work

2014 年 1 月までに得られた FastSound 輝線カタログについて非 H $\alpha$  輝線の混入率を推定したところ, S/N  $\geq$  4.5 のカタログ中 4.0 $^{+1.0}_{-0.8}$  % が [OIII] あるいは [SIII] であることがわかった .  $f\sigma_8$  の測定にも 4.0 $^{+1.0}_{-0.8}$  % の系統誤差を生じることになるので, 測定結果を少なくとも 4.0 $^{+1.0}_{-0.8}$  % の補正する必要がある .

ただし, [OIII], [SIII] 以外の輝線が検出されている可能性は棄却できないので, 今後, より詳細に解析を進めてそのような輝線の混入率の上限を求める .

## Reference

- Tonegawa, M., Totani, T., Akiyama, M., *et al.*, arXiv:1308.5129.
- Tonegawa, M., Totani, T., Iwamuro, F., *et al.*, arXiv:1405.6198.
- Riess, A. G. *et al.* [Supernova Search Team Collaboration], *Astron. J.* 116, 1009 (1998).
- Perlmutter, S. *et al.* [Supernova Cosmology Project Collaboration], *Astrophys. J.* 517, 565 (1999).
- Spergel, D. N. *et al.* [WMAP Collaboration], *Astrophys. J. Suppl.* 148, 175 (2003).
- Tegmark, M. *et al.* [SDSS Collaboration], *Phys. Rev. D* 69, 103501 (2004).
- Clifton, T., Ferreira, P. G., Padilla, A., & Skordis, C. *Physical Reports* 513, 1 (2012).
- Percival, W. J. *et al.* [The 2dFGRS Collaboration], *MNRAS* 353, 1201 (2004).
- Blake, C. *et al.*, *MNRAS* 415, 2876 (2011).
- Samushia, L., Percival, W. J. and Raccanelli, A., *MNRAS* 420, 2102 (2012).
- Reid, B. A., *et al.*, *MNRAS* 426, 2719 (2012).
- Beutler, F., *et al.*, *MNRAS* 423, 3430 (2012).
- de la Torre, S. *et al.*, arXiv:1303.2622.