

## FastSound 計画：サーベイの進展状況

舎川 元成 (東京大学大学院理学系研究科天文学専攻)

### Abstract

FastSound 計画は、すばる望遠鏡の近赤外分光装置 FMOS を用いた宇宙論を目的とした大規模銀河サーベイである。本サーベイは天球上の合計約 30 平方度の領域で、赤方偏移  $z = 1.2\text{--}1.5$  の約 5,000 の星形成銀河を分光観測し、 $H\alpha$  輝線により赤方偏移を測定することで、銀河の三次元地図を作成する。この銀河三次元分布から赤方偏移空間歪み (RSD) 効果を検出し、大規模構造の形成のスピード  $f\sigma_8$  を測定することで、加速膨張の起源の可能性である修正重力理論を観測的に検証することが最大の科学目標である。本講演では、FastSound 計画の進展状況を報告する。本計画では、CFHTLS Wide の可視 5 バンドを用いた photometric redshift および  $H\alpha$  flux 推定を基にした分光ターゲット選択を行い、35 夜の観測を行った。観測は 2014 年 7 月をもって完了し、FIBRE-pac(Iwamuro et al. 2012), FIELD(Tonegawa et al., 2014) によるデータ処理を行った結果、 $S/N > 4.5$  の輝線天体を約 4,000、 $S/N > 3.0$  の輝線天体を約 6,000 得ることができた。起こりうる系統誤差の可能性を検討し、現在最終的な  $f\sigma_8$  測定結果に向けて精密な統計解析を行っている。

## 1 Introduction

遠方の Ia 型超新星の観測、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の温度揺らぎの解析は、現在の宇宙が加速膨張期にあることを明らかにした。一方で、一般相対論によれば、通常の物質のみでは宇宙の加速膨張を引き起こせないことが知られている。今日までに大きく分けて 2 つのアプローチ、すなわち、未知の形態のエネルギー (いわゆる「ダークエネルギー」) もしくは宇宙論的スケールにおける一般相対論の破れ (修正重力理論) によって宇宙の加速膨張を説明しようとする試みがなされてきた。これらの可能性を検証する観測も、様々なプローブを用いて行われてきた。中でも銀河を物質のトレーサーとして用いる、つまり宇宙の大規模構造を観測し、理論予測と比較する手法は、近年大きな注目を集めている。

赤方偏移空間歪み (Redshift Space Distortion; RSD) はその 1 つであり、観測される大規模構造の視線方向の歪みの大きさを測定することで、重力理論に制限を付けることができる。遠方銀河の距離測定は、輝線などから得られる赤方偏移によって行われるが、銀河は構造形成に伴う特異速度を持つため、その視線方向成分がドップラー効果を引き起こし、赤方偏移をわずかに変化させる。銀河の特異速度を  $v = 300\text{km/s}$ 、赤方偏移  $z = 1$  を仮定すると、もし

銀河の速度ベクトルが視線方向と平行である場合、 $\Delta z/z = v/c$  から、 $\Delta z = 0.001$  のずれが起こる。結果として、観測される大規模構造は、統計的に非等方性をもつようになる。非等方性の大きさは、銀河の特異速度場、すなわち構造形成率  $f$  に依存し、 $f$  は重力理論によって規定される量である。従って、RSD 効果から測定される  $f$  を理論予測と比較することで、重力理論の検証を行うことができる。 $f$  はダークエネルギーの性質よりも重力理論の性質により敏感であり、RSD は修正重力理論の検証により重点を置いた観測手法である。

FastSound 計画は、日本とイギリスが中心になって行っている、すばる望遠鏡の近赤外分光装置 FMOS (Fiber Multi-Object Spectrograph) を用いた宇宙論的銀河サーベイである。近赤外領域で一度に 400 天体の分光が可能であるという、世界的に見てもユニークな装置である FMOS の特徴を活かして、赤方偏移  $z = 1.2\text{--}1.5$  の  $H\alpha$  輝線銀河の三次元分布を観測、赤方偏移空間歪み (Redshift Space Distortion/RSD) 効果の検出、大規模構造の形成速度  $f\sigma_8$  の測定から一般相対性理論を宇宙論的スケールで検証する計画である。可視の観測では、銀河の明るい輝線である  $H\alpha$  輝線 (静止系で  $6563\mu\text{m}$ ) が観測波長帯の外側に赤方偏移するため、 $z < 1$  での観測に限られるが、近

赤外分光器 FMOS を用いることで、初めて  $z > 1$  に到達することができる。本計画は 2011 年 9 月から 2014 年 7 月に 40 夜の観測を行い、現在全ての観測を完了した所である。本稿では、FastSound 観測状況と、一部のデータを使った初期的な解析結果について報告する。

## 2 ターゲット選択

赤方偏移サーベイにおいては、分光のターゲットとなる天体を選択する必要がある。FastSound 計画の波長帯は  $1.44\mu\text{m}$ – $1.66\mu\text{m}$  ( $\text{H}\alpha$  輝線で  $z = 1.19$ – $1.53$ ) であるので、この赤方偏移で明るい  $\text{H}\alpha$  銀河を、測光カタログから選ばなければならない。我々は CFHTLS Wide の可視 5 バンドの等級から求めた赤方偏移と  $\text{H}\alpha$  flux の推定値をもとにターゲット選択を行った。これは 2011 年秋の 5 夜の試験観測で幾つかのターゲット選択法を試した結果 (Tonogawa et. al 2014) をもとに、近赤外データ UKIDSS の入手可能性を考慮して最終的に決定したものである。

## 3 観測と解析

本計画の観測は、2012 年 4 月から 2014 年 7 月の 35 夜行われた。FMOS の波長分解能は 2 種類から選択でき、高分散 (HR) モード、低分散 (LR) モードがある。LR モードは  $0.9$ – $1.8\mu\text{m}$  をカバーし、波長分解能は  $R \sim 500$ 、HR モードは LR モードの波長幅の 4 分の 1 をカバーし、波長分解能は  $R \sim 2000$  である。FastSound 計画では、ファイバー配置の効率を考慮し、HR モードを選択した。波長帯は、輝線の受かりやすさと科学的インパクトを考慮し、 $\text{H short}+(1.44\mu\text{m}$ – $1.66\mu\text{m})$  を選択した。積分時間は 1 視野あたり 30 分で、感度は  $1.0 \times 10^{-16}[\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}]$  ( $S/N = 5$ ) である。

FMOS ファイバーのターゲット配置への方法も 2 通りあり、normal beam switch(NBS) モード、cross beam switch(CBS) モードがある。NBS モードは 400 本のファイバー全てがまずターゲットを観測し、続いてスカイ引きのためのスカイ観測を行う。CBS モードは 400 本のファイバーを 200 本ずつに分け、まず

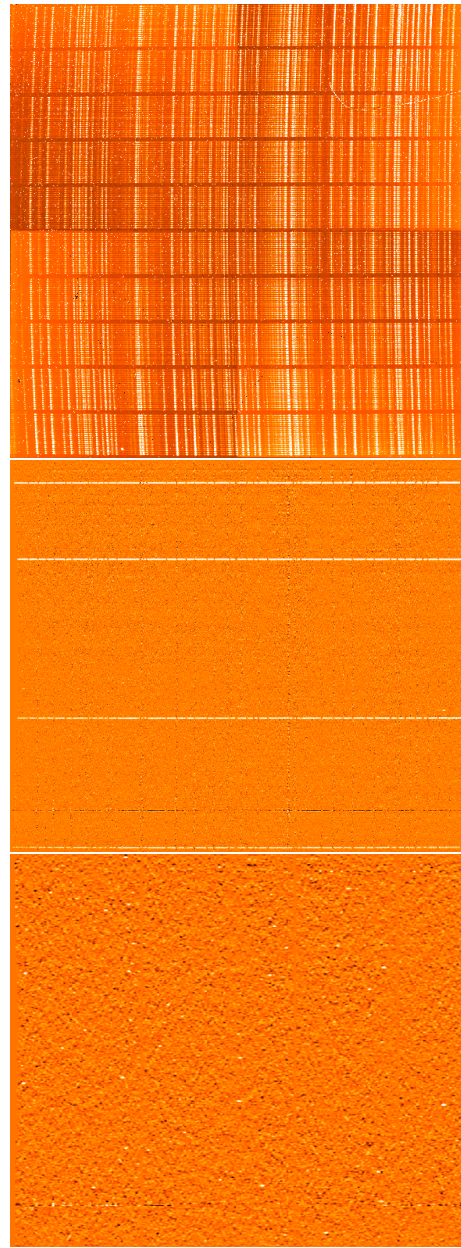


図 1: 画像処理のいくつかのプロセス。水平方向は波長の変化 (右が長波長)、垂直方向は異なる天体を表す。(上) 生画像。縦の白線は、OH mask から漏れている OH 夜光である。(中) 画像処理パイプライン FIBRE-pac による解析後の画像。(下) 輝線検出ソフト FIELD により計算された、各ピクセルの effective  $S/N$ 。

片方の 200 本がターゲット、残りの 200 本がスカイ観測を行い、その後ターゲットとスカイを交代して観測する。この場合常に最低 1 本のファイバーがターゲットに向くという利点が存在するが、ファイバー配

置が複雑化しターゲット数がやや減少するため、本計画では NBS モードを用いた。

得られた画像データの解析は、FMOS 標準のパイプライン (FIBER-pac: Iwamuro et. al 2012) を用いた。解析された画像データから客観的かつ一様に輝線を探し出すために、FastSound 計画では、FMOS 画像専用の輝線検出ソフト (FIELD: Tonegawa et. al 2014) を開発した。このソフトは 2 次元の画像データと、輝線を模した 2 次元プロファイルをたたみ込み、effective な  $S/N$  値を計算し、ある  $S/N$  以上のものを輝線候補として選び出すものである。OH マスク付近の夜光漏れ、検出器の欠陥、宇宙線の影響に対しては、フラット画像、ノイズレベルマップ、バッドピクセルマップなどの情報を駆使して、このような偽検出を自動的に抑える特徴がある。さらに、通常の object-sky フレーム (正画像) に加えて、それを反転させた sky-object フレーム (反転画像) についても輝線検出ソフトを適用することで、偽検出の割合を見積もった。

図??に、2014 年 1 月までに観測を行った 118 視野に対する輝線検出の結果を示す。正画像には本物の輝線と偽輝線が含まれている一方で、反転画像から検出される候補は全て偽である。正画像と反転画像に含まれる偽輝線の数が同数であると仮定すれば、(正画像での検出数)-(反転画像での検出数)が、輝線の総数であると見積もることができる。表??は、いくつかの  $S/N$  閾値に対する、正画像と反転画像の検出数である。 $S/N > 4.5$  では本物の輝線数は  $4656 - 501 \sim 4000$  である。輝線数は最大で  $12421 - 6163 \sim 6000$  であるが、 $S/N > 3.0$  では偽検出も多い ( $6163/12421 \sim 50\%$ ) ため、RSD 解析に使うと系統誤差が大きすぎる (偽検出がランダムに現れるとすると、非等方性をならしてしまう) と思われる。

#### 4 予想される $f\sigma_8$ 測定精度

2013 年春までに得られたデータを用いて、Kaiser の公式を用いたフィットを行った所、 $f\sigma_8$  の fractional error は約 40% であった。統計誤差が天体数の平方根に反比例すると仮定すれば、最終的な統計誤差は 20-25% になると予想される。系統誤差については、前

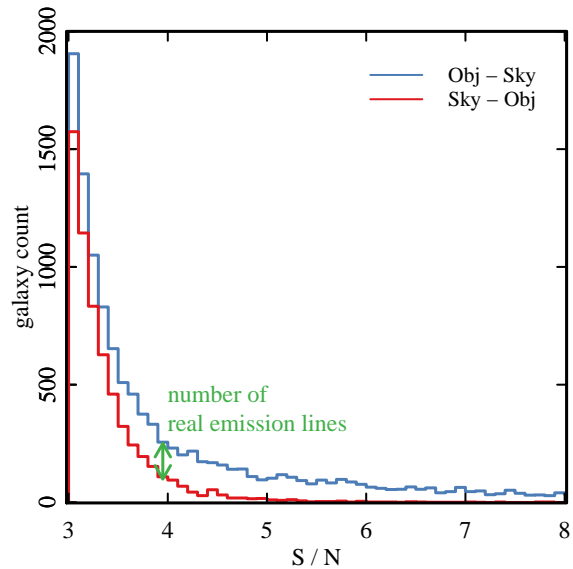


図 2: 輝線検出ソフト FIELD で検出された輝線の  $S/N$  比のヒストグラム。通常の FMOS 二次元データと同時に、その正負を反転させたものに対しても輝線検出を行った。 $S/N > 4.5$  ではほとんど誤検出がないことが分かる。

表 1: いくつかの  $S/N$  閾値に対する輝線検出数。誤検出数の大まかな見積もりとして、画像の正負を反転させた Sky-Obj 画像に対する検出結果も示した。

	Obj.-Sky (1)	Sky-Obj. (2)
$S/N > 5.0$	3,105	107
$S/N > 4.5$	4,656	501
$S/N > 3.0$	12,421	6,163

章で説明した通り、輝線の誤検出によるものが  $\sim 5\%$  あり、その他に、検出は正しくても、それが  $H\alpha$  輝線ではない (=赤方偏移測定を誤る) ことによる系統誤差も考えられる。HiZELS ( $z = 1.47$  の狭帯域サーベイ) のデータを使った見積もりでは、 $H\alpha$  以外の輝線混入は  $\sim 10\%$  と計算され (Tonegawa et. al 2014)、FastSound の実データを用いた推定も現在行われている (重・宇 c24 講演参照)。最終的にはこれらの系統誤差は補正した上で、最終的な  $f\sigma_8$  計算が行われる。

#### Reference

Tonegawa, M., Totani, T., Akiyama, M., et. al 2014, PASJ, 66, 43  
 Tonegawa, M et. al 2014, arxiv:1405.6198