

論文の内容の要旨

論文題目： The FastSound Spectroscopic Redshift Survey at $z \sim 1.4$: Survey Design, Development of Data Analysis Method, and Production of Redshift Catalog (赤方偏移 1.4 の宇宙論的分光サーベイ FastSound におけるサーベイデザインの検討、データ解析手法の開発および赤方偏移カタログの構築)

氏 名： 舎 川 元 成

本論文は、すばる望遠鏡の近赤外分光装置 Fiber Multi-Object Spectrograph (FMOS) を用いた、銀河赤方偏移サーベイである FastSound プロジェクトに関する著者の基礎的研究である。

近年、銀河の三次元分布に見られる特徴的な構造（バリオン音響振動や赤方偏移空間歪み）を観測することで宇宙の加速膨張の起源であるダークエネルギーの性質を探ったり、重力理論の検証を行う計画が世界中で進行している。FastSound プロジェクトは、世界で初めて赤方偏移 $z = 1$ よりも遠方の領域（宇宙誕生後 60 億年以前）で銀河分光サーベイを行い、赤方偏移空間歪み効果（Redshift Space Distortion; RSD）の検出によって重力理論の検証を行う計画である。RSD 効果は、銀河の三次元分布に見られる非等方性であり、この大きさは大規模構造の形成スピードに依存し、重力理論の変更に対して敏感である。従って非等方性から測定される構造形成スピードを一般相対性理論や修正重力理論の予想する値と比較することで、宇宙論的スケールで重力理論を検証し、宇宙加速膨張の起源に迫ることができる。このプロジェクトは、2012 年の 4 月に観測を開始し、2014 年の 7 月までに 35 晩の観測を行った。著者は本論文で、「(1) FastSound 観測ターゲットの選択方法についての研究」「(2) 観測データ解析用のソフトウェアの開発とデータ解析」「(3) 観測データの赤方偏移カタログ化」について述べている。

(1) FastSound 観測ターゲットの選択方法についての研究

第 2 章で著者は、分光サーベイにおいて必要となる、ターゲット銀河の選択方法について CFHTLS Wide という可視光での撮像データを用いて比較・検討した。具体的なターゲット銀河の選び方としては、[1] Photometric Redshift 法、[2] 二色図法、の 2 通りを検討した。[1] は可視 5 バンドでの銀河の明るさ（等級）を銀河の理論的スペクトルテンプレートと比較して $H\alpha$ 輝線の強さと赤方偏移を推定し、その値を基に銀河を選び出す方法、[2] は既に $H\alpha$ 輝線の強さと赤方偏移が分かっている銀河が二次元の色平面上でどの領域に分布しやすいかを調べ、その結果を用いて銀河を選び出す方法である。この時、CFHTLS の可視カタログに加え、UKIDSS DXS という近赤外カタログも選定条件に加えることがどの程度有効かについても検証した。

観測の結果、全体として輝線検出率は 15% 程度であり、[2] よりも [1] の方法が、また、可視のみよりは近赤外データを加えた方が H α 輝線の検出率が高くなる傾向が見られた。しかし、近赤外データはまだ FastSound プロジェクトの全域で一様な深さのデータが得られていないリスクもあり、検出効率の向上もそれほど劇的ではないことから、最終的に FastSound プロジェクトの銀河選択は、可視のみの photometric redshift 法で行うのがよいと結論した。

また、HiZELS と呼ばれる、赤方偏移 1.47 の狭帯域撮像サーベイのデータを用いて、輝線検出率が低下する要因について調べた。その結果、FMOS の検出感度を超える H α 輝線銀河の数は FMOS のファイバー数密度 (400/0.2 平方度) とほぼ同じであるが、可視バンドに基づく photometric redshift と H α 輝線強度の推定値の決定精度が、主に輝線検出率の低下に寄与していて、結果として 15% 程度の輝線検出率となることが分かった。

(2) 観測データ解析用のソフトウェアの開発とデータ解析

FastSound プロジェクトは、35 晩の FMOS 観測で、118 の視野の分光データを得た。著者は第 3 章で、この観測について詳細にまとめた。観測したターゲットはおよそ 40,000 であり、この中から正確に輝線を検出し、赤方偏移の測定を行う必要がある。著者はこの目的のために、FMOS の 2D 画像上で動作する輝線検出ソフトウェア (FIELD) を開発し、その概要を第 4 章で示した。近赤外の観測においては、地球大気の OH 夜光と呼ばれる非常に明るい輝線や宇宙線がノイズ源として存在し、これらの誤検出は、クラスタリング解析において RSD の効果を打ち消してしまう可能性がある。著者は、フラットイメージを用いて OH 夜光付近でのノイズ増大を再評価し、さらにバッドピクセル (検出器の欠陥や宇宙線) の情報や、2D 画像上の輝線の形状パラメータの情報も活用することで、誤検出を抑える工夫を行った。このような検出における性能を表す量として重要なのは、completeness (正しいものを正しく検出する確率) と false detection rate (誤ったものを検出してしまふ確率) である。著者は人工的に作った様々な明るさの輝線プロファイルを FMOS 画像に置き、FIELD を適用することで completeness を見積もった。また、false detection rate については、FMOS 画像の正負を逆転した状態で FIELD を適用し、この状態における検出を false detection と考えることで、その割合を見積もった。 S/N 比が 4.5(5.0) 以上では false detection は 5%(3%) 以下であり、このソフトウェアが十分信頼できる性能を持つことが分かった。このソフトウェアの開発によって、FastSound プロジェクトの客観的で一様な銀河カタログの生成が可能になった。

(3) 観測データの赤方偏移カタログ化

著者は、第 4 章までの解析に基づき、約 5,000 の輝線銀河を検出した。著者は、このサンプルについての統計的な性質を第 5 章にまとめた。また、FastSound の様々な解析に用いるために、これらの銀河をカタログとしてまとめた。作成されたカタログは CFHTLS W1-W4 のそれぞれについて 4 つずつのファイルから構成されており、[1] 視野情報ファイル、[2] 観測ターゲットの情報、[3] 輝線リスト、[4] 反転画像上の偽輝線リストからなっている。このカタログを用いた実際の RSD 解析では、 $z \sim 1.4$ における大規模構造の成長率が $f\sigma_8 = 0.482^{+0.116}_{-0.116}$ と測定された。これは $z = 1$ を初めて超える結果であり、 $z < 1$ の結果と組み合わせることで、RSD が修正重力理論を観測的に識別できる可能性を持つことも分かった (5.3 節)。今後 PFS や DESI, HETDEX といったより大規模なサーベイが行われていく。これらのサーベイも遠方宇宙の輝線銀河をターゲットとしており、本論文で述べた解析手法は、これらのサーベイにも応用することが可能である。