

3次元分光サーベイ MaNGA で見た近傍銀河のアウトフロー

菅原 悠馬 (東京大学大学院 宇宙線研究所)

Abstract

本講演では近傍銀河の面分光サーベイ MaNGA (Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory) の紹介と、このデータを用いた銀河のアウトフローの研究について途中経過を報告する。MaNGA は第 4 期 Sloan Digital Sky Survey (SDSS-IV) に含まれる三つの計画のうちの一つであり、6 年かけて赤方偏移が 0.01 から 0.15 までの 1 万個の近傍銀河をファイバー面分光観測する予定である。面分光データは空間方向に 2 次元と波長 1 方向に 1 次元の 3 次元のデータであるので、銀河の非対称構造について詳しい研究が可能である。そこで本研究ではこのデータを用いて銀河のアウトフローの規模を表す mass loading factor を個々の銀河について求め、理論的研究などから得られている mass loading factor のハロー質量依存性に統計的に制限を与えることを目指す。また、アウトフローの速度プロファイルを求めて 3 次元の理論モデルと比較することにより、対称な球殻状のアウトフローモデルを仮定して導出される mass loading factor を検証する予定である。

1 導入

銀河形成史を理解する上でアウトフローは重要な要素である。銀河内部における星形成活動や活動銀河核 (AGN) によって銀河内物質が加熱されて星形成が阻害されたり、銀河の外へ放射や質量放出をしたりする。このように銀河の活動が銀河自体の進化や銀河間物質の進化へ影響を与えることを銀河のフィードバックと呼ぶ。本研究ではフィードバック機構の中でも特に銀河からの質量放出を伴うアウトフローに注目する。

宇宙論的な構造は Lambda Cold Dark Matter モデル (Λ CDM) による階層的構造形成モデルで再現されていると広く考えられている。これによれば、はじめにダークマターが集積して小さなダークハローが形成され、そこにバリオンが流入して星々が形成される。その後これらの小さな構造が衝突・合体を繰り返して銀河や銀河団などの大きな構造が形成されていく。しかし、 Λ CDM を仮定しフィードバックを無視した数値シミュレーションでは星が過剰に形成され、現在観測される銀河の質量関数を過大評価してしまうことがわかっている。特に小質量側と大質量側において観測結果とのズレが大きい。理論的には低質量側では超新星爆発 (SN)、大質量側では AGN によるフィードバックがズレの原因であると考

えられており、そのようなモデルでフィードバックを考慮した数値シミュレーションは観測結果をうまく説明できている (Read & Trentham 2005)。ところが観測によりこの理論モデルを確かめることは難しく、モデルを定量的に説明した観測結果はまだない。

アウトフローが銀河進化や銀河間物質に与える影響を見積もるための物理量として、銀河の質量放出率と星形成率の比をとった mass loading factor がある。mass loading factor を観測的に求めることで銀河進化の理論モデルに制限を与えることが可能となるが、その計算にはアウトフローの速度・形態・成分などを含めた詳細な情報が必要であり、全ての情報を観測データから導くことは非常に困難である。そのため、本来非対称な形状であるアウトフローを対称な球殻状であるとするなど多くの仮定を用いて計算しているのが現状である (Arribas et al. 2014)。

観測的に mass loading factor に制限を与え、そして銀河進化の理論モデルに制限を与えるためには、銀河の非対称な構造についての詳しく大規模なデータが必要である。そこで本研究ではファイバー束からなる Integrated Field Unit (IFU) を用いて近傍銀河の面分光サーベイを行う MaNGA (Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory) を用いる。面分光データは空間方向に 2 次元、波長方向に 1 次

元、合わせて3次元の情報を持つデータであり、銀河の非対称な構造の研究が可能である。本研究はこのデータからアウトフローの視線速度を求めてアウトフローの3次元理論モデルを検証するとともに、理論的に得られている mass loading factor のハロー質量依存性に制限を与えることを目指す。

2 データ: MaNGA

MaNGA は Sloan Digital Sky Survey 第四期 (SDSS-IV) に含まれる三つのプログラムのうちの一つであり、2014 年から 6 年かけて赤方偏移が 0.01 から 0.15 までの近傍銀河 1 万個を観測するファイバー面分光サーベイである (Bundy et al. 2015)。MaNGA の大きな特徴として以下の三つが挙げられる。

- 1 万個に及ぶ膨大なサンプル数
- 3600Å から 10300Å に及ぶ広い観測波長
- 個々の銀河の有効半径を基準とした観測領域

MaNGA の目的の一つとして、次世代望遠鏡の登場によりますます重要になるであろう高赤方偏移銀河の面分光観測を見据え、近傍銀河の面分光サーベイを行ってその統計的な傾向を明らかにするというものがある。これまでにも MaNGA と似た面分光サーベイはいくつかあるが、そのサンプル数は十分ではなく、SAMI では 3400 個、CALIFA では 600 個である。MaNGA のサンプル数は 1 万個であり、過去のサンプル数に比べてはるかに多く、サンプルとして含まれる銀河は円盤銀河、楕円銀河、AGN など多岐にわたる。銀河のセレクションは星質量 M_* に対して $M_* > 10^9 M_\odot$ で行い、i-band で十分な光度が得られるような赤方偏移の銀河を選んでいる。MaNGA の膨大なサンプル数により近傍銀河の運動構造や星のガスの組成などの解明がより一層進み、高赤方偏移銀河と照らし合わせる際の良い指標となると考えられる。

銀河の内部構造を観測する際には、広い波長域で観測することでより多くの情報を得ることができる。MaNGA の波長域は 3600Å から 10300Å と、可視光の全波長域をカバーしており、平均的な波長分解能は $R \sim 2000$ となっている。これにより星形成活動

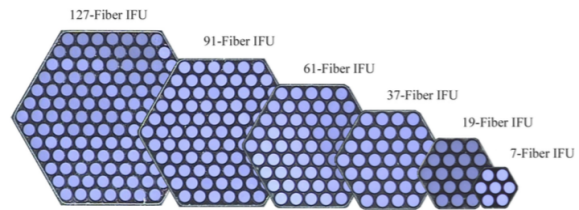


図 1: MaNGA で使用する 6 個の IFU。それぞれの IFU はファイバーを六角形の形に並べて束にしてある。空間分解能はファイバーの大ききで決まっており、約 2 秒角である。ファイバーが 7 個の “mini-bundle” はフラックス補正に使われ、その他の 5 個は天体の観測に使われる (Bundy et al. 2015)。

やガスの運動を調べる際に必要となる輝線や吸収線 ($H\alpha$ $\lambda 6563$, Na I $\lambda \lambda 5980, 5896$ など) を観測できる。また、Belfiore et al. (2015) は MaNGA のプロトタイプである P-MaNGA データの広い波長域を活かして full spectral fitting を行うことにより、銀河を構成している stellar population を導出したほか、年齢-金属量-ダスト関係を解いて銀河のダスト分布を導出した。

同じファイバー IFU を用いたサーベイである SAMI との大きな違いとして銀河の観測範囲が挙げられる。SAMI では IFU の大ききが立体角で固定されており、大小様々な銀河に対する視野大ききが一定であったのに対し、MaNGA では個々の銀河の有効半径 R_e を基準として視野の半径を $1.5R_e$ もしくは $2.5R_e$ としている。有効半径とはその中に銀河の全光度の半分が含まれる半径である。これにより、physical scale ではなく有効半径を基準とした銀河の統計的な性質を議論することが可能である。これを実現するために MaNGA では大ききの異なる 5 種類の IFU を用意しており、銀河の有効半径に合わせて観測に使用する IFU を選んでいる (図 1)。

3 研究方法

3.1 速度マップ

本研究ではアウトフローの速度をデータから導出するために Na I 吸収線を用いた。アウトフローの観

測には輝線・吸収線・連続光など、様々なスペクトルが使用されている。輝線ではアウトフローが銀河から 2 方向へ出ている場合に両方の成分がスペクトルに現れる。一方吸収線は背景光として銀河の光が必要であるため、銀河に対して手前側のアウトフローがスペクトルとして現れる。

銀河の各 spaxel において Na I のフィッティングを行い、銀河全体の速度から導かれる Na I の波長とのズレからアウトフローの視線速度を求めた。spaxel とは面分光データにおける空間方向のピクセルを差す用語である。これを用いてアウトフローの視線速度マップを描くとともに、銀河中心からのあらゆる方向に対して視線速度 vs 半径となる視線速度プロファイルを描いた。

3.2 mass loading factor

mass loading factor η は銀河の質量放出率と星形成率の比で定義される。しかし質量放出率を観測から求めることは難しく、多くの研究ではアウトフローが対称な球殻状であることを仮定している。Weiner et al. (2009) は質量放出率 \dot{M} を

$$\dot{M} \cong 22M_{\odot} \text{ yr}^{-1} C_f \frac{N(\text{H})}{10^{20} \text{ cm}^{-2}} \frac{R}{5 \text{ km}} \frac{v}{300 \text{ km}^{-1}}$$

で与えている。ここで R 、 v はそれぞれ球殻状のアウトフローの半径と速度、 C_f は covering factor、 $N(\text{H})$ は水素の柱密度である。

この式をから質量放出率を求め、星形成率との比をとることにより mass loading factor を求める。十分なサンプル数で統計的に扱うことにより、mass loading factor vs ハロー質量のグラフを描き、理論モデルから得られた依存性を検証する。

3.3 アウトフローの 3 次元理論モデル

mass loading factor を求める際にアウトフローが球殻状であるとの仮定を用いたが、一方で視線速度プロファイルからアウトフローの 3 次元理論モデルを検証する。アウトフローは biconical な形態が多いというのが定説であるが、実際に得られた視線速度プロファイルを説明するような 3 次元理論モデルを

得ることで統計的にアウトフローの形態を調べることができると期待される。また、アウトフローの 3 次元理論モデルを用いて mass loading factor を再度導出することで球殻状の仮定の妥当性を検証する。

4 途中結果

一つの銀河に対して 8 方向に半径をとって速度プロファイルを求め、球殻状の速度プロファイルを描いて比較した。アウトフローが球殻状であれば全てのプロファイルがその曲線状にのるはずであるが、そうはならず球殻状の形態では説明が難しいことが示唆された。

現在はフィッティングの精度を上げ、他のデータに使用するために準備中である。具体的な課題として Na I の doublet をうまく処理することと、星からの成分とアウトフローの成分をうまく分離することが挙げられる。

Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

Reference

- Arribas, S., Colona, L., Bellocchi, E., et al. 2014, *A&A*, 568, A14.
- Belfiore, F., Maiolino, R., Bundy, K., et al. 2015, *MNRAS*, 449, 867.
- Bundy, K., Bershad, M. A., Law, D. R. et al. 2015, *ApJ*, 798, 7.
- Muratov, A. L., Keres, D., Faucher-Giguere, C. et al. 2015, arXiv: 1501.03155.
- Murray, N., Quataert, E., & Thompson, T. A. 2005, *ApJ*, 618, 569.
- Read, I. J., & Trentham, N. 2005, *PSPTA*, 363, 2693.
- Weiner, B. J., Coil, A. L., Prochaska, J. X, et al. 2009, *ApJ*, 692, 187.