

# VIPERS を用いた、 $0.5 < z < 1.3$ の銀河の質量、速度分散分布の解析

吉田 博哉 (名古屋大学大学院 理学研究科)

## Abstract

現在様々な大規模サーベイ観測、シミュレーションにより宇宙の構造、また宇宙を構成している天体の分布が明らかになろうとしている。N 体シミュレーションからは宇宙の構造を形成しているダークマターハローの分布の統計的性質が得られている。また宇宙の構造を形成している重要な構成要素としてバリオンから成る銀河が存在し、サーベイ観測によりその性質が追求されている。この銀河とダークマターハローの間の分布の比較を行うとダークマター、バリオンの分布の関係が得られるため銀河の統計的性質を求めることは大変重要である。今回、私は銀河に着目してその質量分布、また銀河団、銀河群に存在する銀河の速度分散分布を推定した。

銀河の速度分散関数を測定する研究は過去に行われていないために、観測から銀河の速度分散を正しく求めることができるか検証する必要がある。そのため本研究では観測データを用いた解析を行う前に、mock catalog を用いて解析が行えるかチェックを行った。これとともに解析的に速度分散関数を求めた。この際銀河団はビリアル平衡に達しているという仮定をおき、ハローの mass function を用いて質量分布を速度分散分布に変換した。

本研究では The VIMOS Public Extragalactic Redshift survey(VIPERS) を観測データとして想定して得られた mock catalog を用いて解析を行い  $z = 0.1 \sim 1.3$  の質量分布関数、 $z = 0 \sim 1$  の速度分散関数を求めた。速度分散関数については解析解と比較を行いその結果高速度分散側はよく一致することが分かり、観測で得られる速度分散の情報を用いて速度分散関数を正しく得られることが分かった。将来的には今回想定した VIPERS のデータを用いて同様の解析を行い、結果の比較をする。

## 1 Introduction

宇宙には星や星間物質、ダークマターの集合体である銀河が数多く存在している。銀河を特徴づける物理量として質量や光度、星形成率が存在しており、そのそれぞれについて分布関数が求められている。分布関数を求めることにより銀河の性質が得られており、またこれの赤方偏移ごとの変化をみることで銀河進化の歴史を追うことが可能となる。この銀河の分布関数を求めるときに欠かせないものが大規模サーベイ観測である。サーベイ観測は広範囲の観測領域を持つと同時に多くの銀河を観測しているため、銀河の分布関数を測定するためには最も適した観測である。現在では SDSS のような可視光観測サーベイ、AKARI のような赤外線観測サーベイ、GALEX のような紫外線観測サーベイなど様々な波長域で観測が行われている。本研究では質量、また銀河団などの重力でまとまった天体中に存在する銀河の速度

分散に着目して分布関数を測定する。特に速度分散関数については先行研究がほぼ行われておらず、観測データから測定することが可能か検証を行う必要性がある。

## 2 Data

本研究では、観測データとして The VIMOS Public Extragalactic Redshift survey(VIPERS) を想定する。VIPERS はチリ、パラナル天文台にある Very large telescope(VLT) を用いたサーベイであり、 $i_{ab} < 22.5$  mag,  $0.5 < z < 1.3$  の銀河の分光観測サンプルを作成し大規模構造、銀河進化の問題に取り組むことを目的としている。このサーベイでは CFHTL-wide 領域の w1,w4 フィールドの  $\sim 24$  deg<sup>2</sup> をカバーしており、その広大な観測範囲、サンプリングレート ( $\sim 40\%$ ) により局所宇宙のサーベイに匹敵する観測

が分光及び近赤外線から可視光の5バンドの測光観測で行われている。またこれに合わせた mock catalog を使用する。mock catalog とは  $N$  体シミュレーションで得られたデータをもとに銀河分布をシミュレーションしたものであり、この際実際の観測データと同じ条件でセレクションを行ったものである。本研究では mock catalog を使用して分布関数を測定し、実際の観測データでも用いることができるかチェックを行っていく。

### 3 Methods

速度分散を求める際には、各銀河の速度情報が必要となるが実際の観測では直接速度情報は得られない。このため今回赤方偏移の情報を用いて銀河の固有速度を求める。測定される赤方偏移の情報には宇宙膨張によるものと銀河の視線方向成分の固有速度によるものが含まれている。このため、銀河団中の銀河の平均赤方偏移を  $z_{\text{ave}}$  とすると  $i$  番目の銀河の固有速度  $v_{\text{los}}$  は、

$$v_{\text{los},i} = (z_{\text{ave}} - z_i)c \quad (1)$$

以上のようにして表すことができる。固有速度を用いることで速度分散は、

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{v}_{\text{los}} - v_{\text{los},i})^2 \quad (2)$$

このように表すことができる。

ここで、上の方法では赤方偏移を用いて視線方向の固有速度を求めたが、この方法で速度分散を正しく求めることができるか検証する必要がある。mock catalog では赤方偏移情報の他に銀河の視線方向の速度、3方向それぞれの速度が得られている。そこでそれぞれのデータで各個に速度分散を求め、赤方偏移から求めた速度分散分布との比較を行う。また mock catalog では銀河団が属しているダークハローの速度分散のデータが存在する。このデータから分布を同様に求めることにより、銀河団とハローの速度分散分布の比較も行っていく。

また分布関数を求める際には、観測による selection effect の影響を補正する必要がある。本研究では質量

分布関数、速度分散関数を測定するがそのそれぞれで異なる方法を用いて selection effect を補正する。

まず、質量分布関数では  $1/V_{\text{max}}$  法を用いる。銀河の検出限界はフラックス密度 (VIPERS の場合、 $i_{ab} < 22.5$  mag) で決定している。そこである赤方銀河  $z$  の銀河を遠ざけて、検出限界の明るさになる場所を  $z_{\text{max}}$  とする。このようにして各銀河について  $z_{\text{max}}$  を求めた後、各銀河が寄与できる体積  $V_{\text{max}}$  を求める。 $V_{\text{max}}$  はサーベイ観測範囲  $\Omega(\text{deg}^2)$ 、光度距離  $d_L$  を用いて

$$V_{\text{max}} = \frac{\Omega}{3} d_L^3(z_{\text{max}}) \quad (3)$$

として求めることができ、これを用いて質量分布関数は、

$$\int_{M_{\text{min}}}^{M_{\text{max}}} \phi(M) dM = \sum_{i=1}^N \frac{1}{V_{\text{max}}} \quad (4)$$

として表される。この方法を用いると  $z_{\text{max}}$  が小さい暗い銀河ほど分布関数に対する寄与が大きくなり、selection effect を補正することができる。

速度分散関数を求める際には、selection function を用いる。これは光度関数  $\phi(L)$  を用いて以下のように表すことができる。

$$\Phi(z) = \frac{\int_{L_{\text{min}}}^{\infty} \phi(L) dL}{\int_0^{\infty} \phi(L) dL} \quad (5)$$

ここで、 $L_{\text{lim}}$  は各赤方偏移での観測可能な光度下限である。分母はある赤方偏移に存在するすべての銀河の数密度を表しており、分子は観測限界以上の光度を持つ銀河の数密度を表している。よって selection function は観測可能な銀河の割合を示している。これを用いることで速度分散関数は、観測で得られた分布関数を  $dn'(z)/d\sigma^2$  とすると

$$\frac{dn(z)}{d\sigma^2} = \frac{dn'(z)}{d\sigma^2} \frac{1}{\Phi(z)} \quad (6)$$

として表すことができる。本研究では光度関数に Fritz et al. (2014)(7) の VIPERS の観測データを用いた光度関数を用いた。

また、速度分散関数については解析的な解も求める。ここで2つの仮定を置く。まず1つ目に銀河団

はビリアル平衡に達しているとする。このとき銀河団の質量と速度分散の間には、

$$\sigma^2 = \frac{GM}{2R} \quad (7)$$

の関係がある。2つ目の仮定は銀河団の速度分散と、その銀河団が属するハローの速度分散が等しいとすることである。この2つの仮定のもとで銀河団の速度分散関数は、すでに広く知られているハローの質量分布関数を用いて、

$$\frac{dn}{d\sigma^2} = \frac{dn(M)dM}{dM d\sigma^2} \quad (8)$$

として表すことができる。ここで、ハローの mass function には、Tinker et al. (2008)(5) の形を用いる。

## 4 Results

まず、質量分布関数の結果を示す。mock catalog で得られたデータを用いて、 $z = 0.1 \sim 1.3$  の範囲で図1のように分布関数を求めた。どの質量レンジを見ても低赤方偏移の方が高赤方偏移の分布より高い値をとっていることが分かる。また観測限界から各赤方偏移において観測できる光度の限界値が決まっており、光度と質量の間には  $M_{\odot} \sim L_{\odot}$  の関係がある。そのため各赤方偏移にて光度下限に対応する質量  $M_{\text{lim}}$  以下では、分布関数が低下している。これは  $M_{\text{lim}}$  以下では多くの銀河が観測できないためである。よって質量分布関数は  $M_{\text{lim}}$  以上の値で有意な値を持っていると言える。

速度分散関数についても質量分布と同様に mock catalog を用いて測定を行った。まずはじめに赤方偏移を用いた測定方法で正しく速度分散関数を求めることができるかチェックを行った。図2がその結果であり、 $0 < z < 1$  の全データを用いて測定を行った。赤点が視線方向の速度、緑点が3次元の速度、ピンク点が赤方偏移を用いて速度分散分布を求めたものであり、青点が各銀河団が属しているハローの速度分散を用いて分布を求めたものである。各種方法をとっても分布関数は一致することが分かった。これにより3次元の速度から求めた速度分散が視線方向の速度分散と一致していること、赤方偏移を用いて

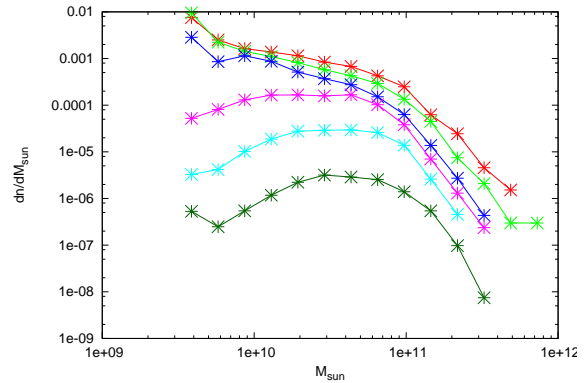


図 1:  $z = 0.1 \sim 1.3$  での質量分布関数 赤: $0.1 < z < 0.3, M_{\text{lim}} = 1.7 \times 10^9 [M_{\odot}/h]$ , 黄緑: $0.3 < z < 0.5, M_{\text{lim}} = 7.4 \times 10^9 [M_{\odot}/h]$ , 青: $0.5 < z < 0.7, M_{\text{lim}} = 1.7 \times 10^{10} [M_{\odot}/h]$ , ピンク: $0.7 < z < 0.9, M_{\text{lim}} = 3.0 \times 10^{10} [M_{\odot}/h]$ , 水色: $0.9 < z < 1.1, M_{\text{lim}} = 4.8 \times 10^{10} [M_{\odot}/h]$ , 緑: $1.1 < z < 1.3, M_{\text{lim}} = 6.9 \times 10^{10} [M_{\odot}/h]$ .

測定した固有速度から正しく速度分散分布を測定できることが分かった。これにより赤方偏移を用いた速度分散分布の測定は、実際の観測データを用いても使用できることが分かった。また銀河団の速度分散分布とハローの速度分散分布が一致していることも分かった。これにより銀河団の速度分散はハローをトレースしていること、ハローの速度分散分布と銀河団の速度分散分布はおおよそ等しいことが判明した。これにより解析解を求める際に置いた仮定の1つが正しいと分かった。

また、この結果を解析的な解と比較を行った。その結果  $\sigma^2 \sim 7 \times 10^4 [(\text{km/s})^2]$ , ビリアル平衡を仮定すると  $M \sim 5 \times 10^{13} [M_{\odot}/h]$  以上の高速度分散、高質量側でよく一致した。本研究では銀河が複数個ある銀河群以上のスケールの天体の速度分散を測定しているため、これ以下の質量スケールでは解析解と一致しないことは自然だと考えられる。高速度分散側の関数の一致により銀河団の速度分散関数とハローの速度分散関数が一致しており、銀河団がビリアル平衡に達しているという仮定が正しいことが再び確認できた。

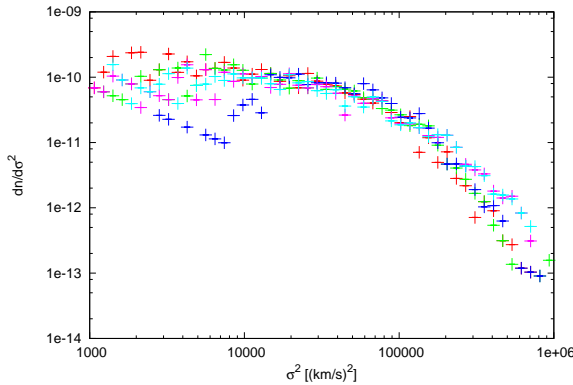


図 2: 各種方法で測定した速度分散分布 ( $0 < z < 1$ ) 赤: 視線方向速度, 緑: 3次元の速度, 青: ハローの速度分散, ピンク: 赤方偏移.

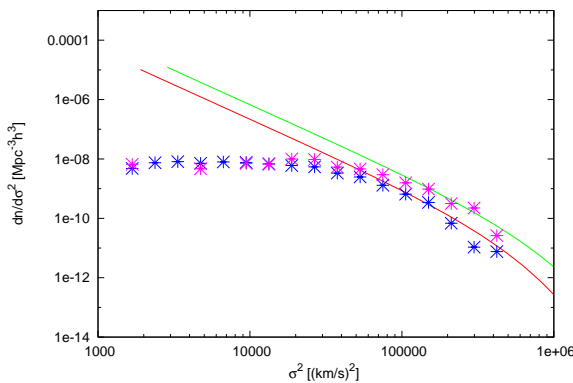


図 3: mock catalog から測定した速度分散関数と解析解の比較 赤, 青:  $0 < z < 0.5$  緑, 紫:  $0.5 < z < 1.0$ .

## 5 Conclusion and Future work

本研究では、VIPERS を想定した mock catalog を用いて銀河の質量分布関数、速度分散分布関数を求めた。この際速度分散が正しく測定できているか、またハローの速度分散が銀河団の速度分散とどう相関を持っているかチェックを行った。その結果各種方法で求めた速度分散関数は一致し、実際の観測データを用いても速度分散関数を測定することができると分かった。また銀河団の速度分散関数はハローの速度分散関数と一致していることが分かった。更にこれを銀河団がビリアル平衡に達しており、また銀河

団とハローの速度分散関数が等しいという仮定のもと求めた解析解と比較を行い、高速度分散側では一致することが分かった。

今後は、mock catalog で得られた結果をもとに実際の観測データを用いて解析を行っていきたい。また、本研究では速度分散関数の解析解を求める際にビリアル平衡という仮定をおいたが、実際には完全に一致していないという結果が得られている。そのためビリアル平衡からの変位を求め、解析解にその影響を組み込むことを行いたい。これと平行して速度分散関数の各赤方偏移での振る舞いについて考察していく。本研究の結果、速度分散関数は質量分布関数と異なり高赤方偏移の方が低赤方偏移より分布が大きいことが判明している。なぜ質量分布関数や光度関数と異なる振る舞いをするかは不明であるので、ビリアル平衡に関する問題とともに取り組んでいきたい。

## Reference

- [1] Davidzon, I. et al. 2013, AA, 558, A23
- [2] Garilli, B. et al. 2013, AA, 562, A23
- [3] Springel, V. et al. 2005, Nature, 435, 629
- [4] De Lucia, G. and Blaizot, J. 2007, MNRAS, 375, 2
- [5] Tinker, J. et al. 2008, ApJ, 688, 709
- [6] Press, W. H. and Schechter, P. 1974, ApJ, 187, 425
- [7] Fritz, A. et al. 2014, AA 563, A92
- [8] Montero-Dorta, A. D. and Prada, F. 2009, MNRAS, 339, 1106