

# Non-Spherical Mass Models for Dwarf Satellites

東北大学大学院理学研究科天文学専攻 修士2年

林 航平

## ABSTRACT

我々は、ダークハローの形状に対して観測的な制限を得る為に、軸対称ジーンズ方程式に基づく軸対称密度分布モデルを構築した。これは、今まで球対称でしか行われてなかった矮小銀河の動力学解析に対して新たな研究手法である。この手法を用いて、6つの矮小銀河の視線速度分散分布の解析を行った。すると、ダークハローの形は球対称であることはなく、そしてそれは観測結果を再現するのに重要な物理量であることが分かった。したがって、これまで行われてきた球対称での解析では、ダークハローに対する正確な理解を与えるとは出来ないと言えるだろう。また、我々の行った軸対称モデルでの解析では、ダークハローの密度分布がコアである事を示唆した。

## Introduction

銀河系に付随する伴銀河としての矮小銀河は、恒星系の表面輝度が暗い一方、力学的に求められた質量-光度比が10から1000と他の銀河に比べて非常に大きい。これはダークマターが大いに支配的であることを示している。したがって、矮小銀河はダークマターハローの基本的な性質を研究する上で、理想的な天体である。しかし、暗い天体であるため観測は難しく、その詳細は謎のままである。これまで行われてきた、CDM理論に基づく階層的構造形成シミュレーションでは、すべてのダークマターハローとそれに付随するサブハローの密度分布の形状が、球対称ではなく3軸不等楕円体であることがわかっており(ハロー: Hayashi et al. 2007, Vera-Ciro et al. 2011, サブハロー: Kuhlen et al. 2007), この結果は、ダークマターの階層的進化の影響を良く反映している事も分かっている。したがって、ハローの形状がどのようになっているのかを明らかにする事は、銀河の形成や進化を知る上で、非常に重要な物理情報になるという事を示している。

一方で、矮小銀河を用いたダークマターハローの観測的制限には、星の視線方向の速度分散プロファイルを用いたものが一般的である。この解析は、ジーンズ

レンズ方程式を解くことによって得られるのだが、先行研究(Walker et al. 2009; Strigari et al. 2010)では、恒星系及びダークマターハローの密度分布が球対称である場合のみで解析が行われてきた。前述したように、理論に基づくハローの形状は球対称ではない。そのうえ、観測されている矮小銀河の天球面上での形を見ても球対称ではないことが明らかである。このことから、ダークマターハローの形状に対する議論については、観測からのアプローチは未開拓のままである。したがって、より現実的でより重要なハローの形状への制限を得るためには、非球対称な密度分布を仮定したモデルの構築が必須となる。そこで我々は、軸対称密度分布モデルを構築し、このモデルに基づいた解析を行う。

## Model

恒星系は力学的平衡状態であり、その重力はダークマターが支配的であると仮定する。また分布関数を $f(E, L_z)$ とし、動径方向と接線方向の速度分散が等しいと仮定し( $\overline{v_R^2} = \overline{v_z^2}$ )、軸対称ジーンズ方程式を用いる。

恒星系の密度分布とダークハローの密度分布を以下のように仮定する。

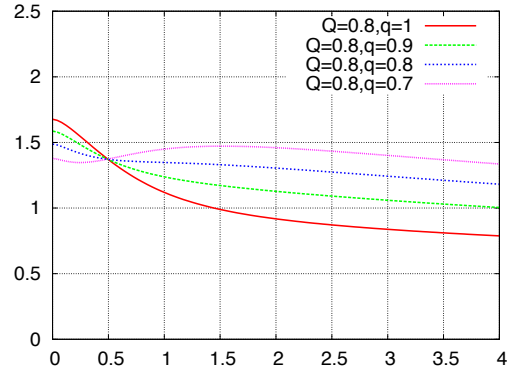
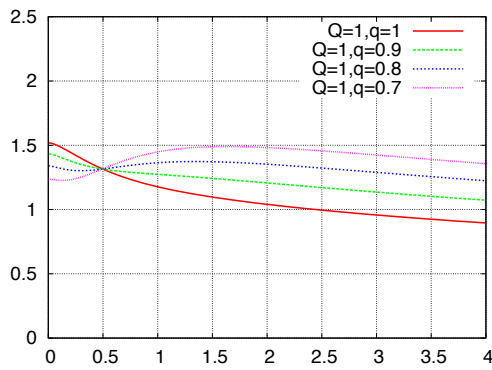
$$v(R, z) = \frac{3L}{4\pi b_*} \left[ 1 + \frac{m_*^2}{b_*^2} \right]^{\frac{5}{2}} \quad m_*^2 = R^2 + \frac{z^2}{q^2}$$

$$\rho(R, z) = \rho_0 \left( \frac{m}{b_{halo}} \right)^\alpha \left[ 1 + \left( \frac{m}{b_{halo}} \right)^2 \right]^\delta \quad m^2 = R^2 + \frac{z^2}{Q^2}$$

ここで、 $q$  と  $Q$  はそれぞれの軸比、 $b_*$  と  $b_{halo}$  はそれぞれのスケール長さである。

このモデルでの振る舞いを以下に示す。

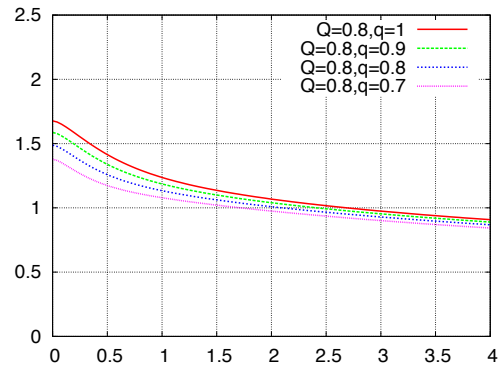
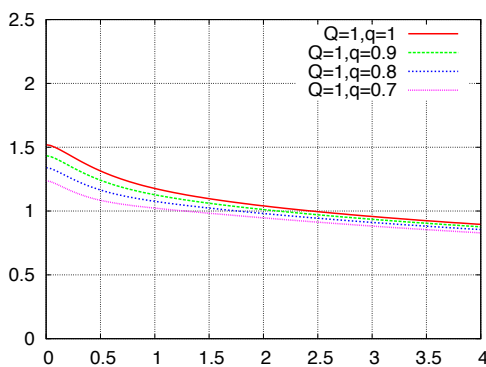
視線速度分散



Major axis

上の2つの図は横軸に major axis (恒星系のスケール長さで規格化したもの)、縦軸に視線速度分散を(無次元化したもの)である。まず左図のみに注目する。これはダークハローの軸比  $Q$  を一定にして、恒星系の軸比  $q$  を小さくした結果である。すると、 $q$  が小さくなること(形が潰れる)で、球対称分布では見られない特徴的なプロファイルをしている事がわかる。これは、方位角方向の速度分散の寄与が効いている事を示している。次に2つの図を見比べてみる。この場合、ダークハローの軸比  $Q$  が小さくなっていることがわかる。するとプロファイルを中心部で勾配が強くなっていることが明らかである。したがって、恒星系の軸比  $q$  はプロファイルの形を、ダークハローの軸比  $Q$  は中心部での勾配を決定している事がわかった。

視線速度分散



Minor axis

Minor axis については、方位角方向の速度分散はないので、特徴的なプロファイルは現れない。上の2つの図を見ると、中心部での勾配を決定していること

がわかる.

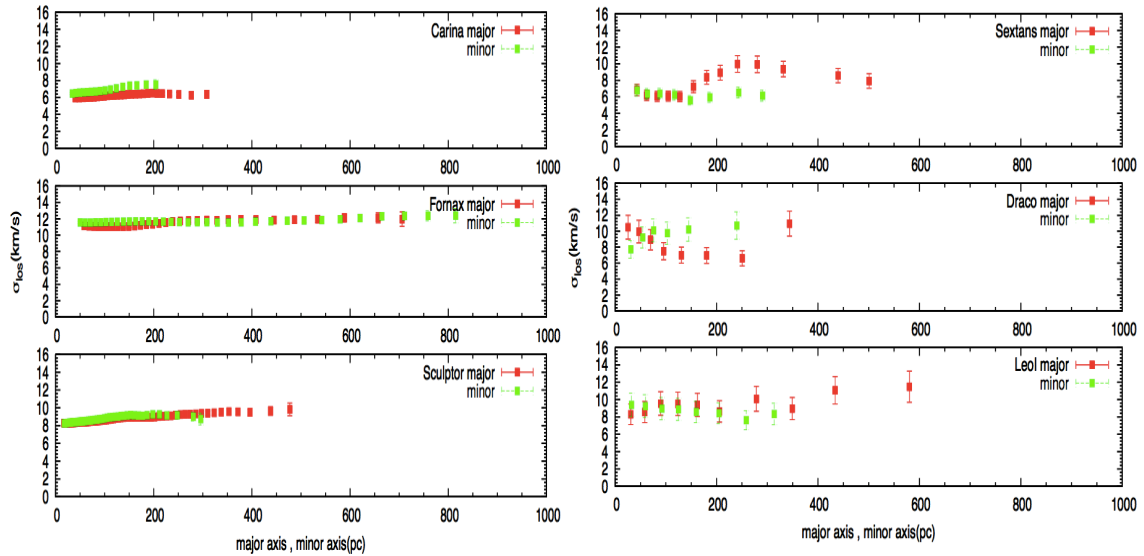
## Data

今回用いる天体データは以下の6天体である.

Object	$\alpha$ (h:m:s)	$\delta$ (d:m:s)	P.A.(deg)	distance (kpc)	$r_{\text{half}}$ (pc)	$e$ (ellipticity)	$q$ (axis ratio)
Carina	06h41m36.7s	$-50^{\circ}57'58.3''$	$65 \pm 5$	103	$241 \pm 23$	$0.33 \pm 0.05^1$	$0.67 \pm 0.05$
Fornax	02h39m59.3s	$-34^{\circ}26'57.1''$	$41 \pm 1$	138	$668 \pm 34$	$0.30 \pm 0.01^1$	$0.70 \pm 0.01$
Sculptor	01h00m09.4s	$-33^{\circ}42'32.5''$	$99 \pm 1$	87	$260 \pm 39$	$0.32 \pm 0.03^1$	$0.68 \pm 0.03$
Sextans	10h13m02.9s	$-01^{\circ}36'53''$	$56 \pm 5$	88	$682 \pm 117$	$0.35 \pm 0.05^1$	$0.65 \pm 0.05$
Draco	17h20m12.4s	$+57^{\circ}54'55''$	$82 \pm 1$	84	$196 \pm 12$	$0.33 \pm 0.05^1$	$0.67 \pm 0.05$
LeoI	10h08m27s	$+12^{\circ}18'30''$	$79 \pm 3$	247	$246 \pm 19$	$0.21 \pm 0.03^1$	$0.79 \pm 0.03$

Table 1: dSph Structural Parameters [1]:Irwin & Hatzidimitrion(1995)

$r_{\text{half}}$ は銀河の half-light-radius を示しており, これは Model で示した  $b_{\text{halo}}$  に対応しているとする.  $q$  は天球面上での銀河の軸比を表している. これらの視線速度から Major axis と Minor axis に沿った分散を計算し, それをプロットしたのが以下の図になる.



左上から反時計周りに Carina, Fornax, Sculptor, LeoI, Draco, Sextans である. 赤のデータ点が Major axis、緑のデータ点が Minor axis である.

## Result

このデータと我々が構築したモデルを定量的に比較する為に、 $\chi^2$ 検定を行った。以下にその結果を載せるが、Fornax の天体についての結果のみをここでは載せる。

Fornax	Major + Minor	
	NFW	CORE
reduced- $\chi^2$	9.53	1.65
Q	$0.829^{+0.003}_{-0.013}$	$0.55^{+0.003}_{-0.006}$
$b_{\text{halo}}$	$1297^{+10}_{-4}$	$852^{+9}_{-3}$
$\rho_0$	$0.0172 \pm 0.0001$	$0.0531 \pm 0.0004$

この結果から、Q の値をみると、ダークハローは球対称であることはないことがわかる。また、ダークハローはNFW よりも CORE の方が良く合うこともわかった。従って、ダークハローは球ではなく、その密度分布は中心部でコア状であることが分かった。

## Conclusion

以上の結果から、ハローの形状は球対称ではない事がわかり、そしてその形状は、観測結果を再現するのに重要な物理量であることがわかった。従って、これまで行われてきた球対称モデルでの矮小銀河における解析は、ダークハローに対する正確な理解を与えていないという事を主張する。また、今回我々が構築した軸対称モデルでは、ダークハローの密度分布が中心部でコア状であることを示唆した。今後は、これらの結果がどのような物理量と相関があるのか、あるとしたら何故そうなるのかを議論して行く予定である。それによって、CDM 理論と銀河の形成や階層的進化に対して重要な制限を与える事が出来るだろう。