

# Sagittarius Stream structure 方向の halo stars による Milky Way oblate halo structure の示唆

鈴木 雄太 (東北大学大学院 理学研究科)

## Abstract

私は銀河系の形状・構造を主としてキネマティックな情報から探求していくことを始めたところである。今回は Newby et al. 2013 が解析に用いた、Sagittarius Stream 構造方向に見える星のうち実際にはその構造に属しておらず銀河系のハロー (恒星ハロー) に属していると判断されるものの空間分布のデータを、疑似的に再現し、彼らがこの分布を得るために用いた Hernquist halo (stellar halo) model とは異なる 2 つの halo model にフィッティングのし直しを行った (NFW model, Einasto model)。その結果、信頼性の点において多少の解析結果の不確定性があるにせよ、halo model の関数形を一意に決定するフリーパラメータを物理的に意味のあるものとしてそれぞれのモデルで得ることができた。とくに、ハローの力学的な形状を表すと解釈される軸比  $q$  の値に関しては、どちらのモデルに対しても  $q=0.5$  がベストフィットし、Newby et al. 2013 が解析の結果見積もった  $q=0.53$  と consistent であると判断されると考える。今後はこの結果を他の研究、より具体的には rotation curve を説明するベストフィットハロー/ディスクモデルを見積もる研究といったものに生かしていく予定である。

## 1 Introduction

私は銀河系の構造を様々な情報をもとにして調査し解明していくことを始めたところである。構造への制限をかけるものとして最も単純明快で、解析方法も確立されているものの 1 つが、銀河系を構成する天体・物質のキネマティックな情報を解析する方法である。その方法は多々あり、これだけでもバラエティに富んでいると言える。

その中、銀河系の構造を特徴づけるものとして軸比の  $q$  ( $q_{disk}$ ,  $q_{halo}$ ) というものがある。詳しいことを除けば銀河系ディスクやダークマター (DM) ハローの形状が oblate ( $q < 1$ ) なのか spherical ( $q = 1$ ) なのか、prolate ( $q > 1$ ) なのかを決定する。DM ハローに関しては、最近になって、従来のような球対称な密度分布を仮定するよりも、 $q$  が 1 でないような軸対称な分布を仮定する方がもっともらしいという結果が得られてきている (Loebman et al. 2012; Newby et al. 2013)。

もしこの示唆が正しいものだとするならば、DM ハローの形状と相互依存関係にあるディスクの厚みにも多かれ少なかれ確実に影響が及んでくることに

なる (Olling 1995)。Olling 1995 は、何がきっかけになるかは明らかではなくとも、結果として DM ハローの形に引き寄せられてディスクの厚みが増加したとするならば、質量 fix の条件下で重力分散が起こり (密度が減少し)、rotation curve が下がる (同一の radius  $r$  で見たときの  $V_{rot}$  が下がる) センスを明示している。つまり  $q$  の増加は rotation curve の減少を意味している。これには質量 fix の条件が付いていたことを考慮すると、1: $q$  と 2:rotation curve と 3:質量・広義の DM ハローの質量のあいだには切っても切り離せない関係があることが理解できると思う。観測量である rotation curve を説明するために  $q$  を何らかの方法で決定することは、そのまま質量・広義の DM ハローの質量の推定値の決定を意味するわけである。また、決定がされてきているディスクのガス密度 (Knapp 1987) と、 $q$  と質量の関係もやはり同様である。

以上で見てきたように、例として rotation curve はほとんど唯一銀河系の質量 (バルジ成分を無視すれば、ディスクの質量と DM ハローの質量) のみで決まっていたところを、それだけでなく  $q$  にもまた依存して変化することが予想されるので、つまりは銀

河系全体の形状・構造を正しく決めるために  $q$  を決定することは重要だと言えるわけである。また、ここまででお気づきの方もいらっしゃるかと思うが、この  $q$  の決定に関しては当然“disk-halo conspiracy”の議論も活性化させる。

本研究は基本的には Newby et al. 2013 の上に成立するものとして議論を進めている。具体的には、彼らのいう、ハロー (恒星ハロー) モデルへのデータのフィッティング精度はあまり良くなかったという見解を受けて、ハローに属している分離されたあとに残った星を、彼らが用いたのとは異なるハローモデルを仮定してそれにフィッティングした。フィッティングして得られた結果は以下の章で述べていくことにする。

## 2 Methods

解析に用いたデータはほとんど全て Newby et al. 2013 (の Table 1., 2., 3., and 4.) をもとにしている。まず Sagittarius Stream 構造のところに設定する stripes 18 本 (それぞれの stripe には stripe 番号がふつてある; Newby et al. 2013 の Table 1. 参照) の中にあり、かつ Sagittarius Stream に実際に所属しているのではなく銀河系ハロー (恒星ハロー) に所属している星の数を計算した。stripe とは Sagittarius Stream 構造がある空間を、stream がのびる方向のある長さで区切ったうちの 1 つ分の細長いシリンダーのことをいい、今回は簡単のためこの stripe の形状が円柱形ではなく直方体形であるとした。計算する際に使ったデータは Newby et al. 2013 の Table 1. の “#stars” と Table 3. の “#Stars” のコラムで、単純に Table 1. のものから 3. のものを引き算することにより求めた。彼らによれば、各 stripe には Sagittarius Stream 構造所属星とハロー所属星の他に bifurcation 構造といったものに所属するものもあり、単純に引き算しただけでは正しいハロー所属星の数にはなっていないわけであるが、今回は bifurcation 構造といったものに所属する星はごく少量であるとして無視し、引き算した結果がそのままハロー所属星であるとした。またこの過程で、stripe 番号 17、18、

22、23、86 の stripes については、その中に明らかに Sagittarius Stream 構造所属星とハロー所属星以外の星がいることが Table 2. により見受けられるので、上の議論も踏まえ私の解析から外した。

次に各 stripe の長さ  $l$  と幅  $w$  を計算し、その後その  $l$ 、 $w$  をもった各 stripe を 1 辺の長さが 100pc の立方体ビンに区切った。  $l$  と  $w$  の値は Newby et al. 2013 の Table 1., 3., and 4. の値を適切に使うと求めることができると考えられる。この作業はこの後の解析において、“このビンにはこれだけの星が存在している” (各ビンには当然ながら整数個の星が入っているようではなければならないが、これも簡単のため小数個の星が入っていてもよいものとした) というふうにしていくための準備である。またこの計算の過程でエラーが生じた stripe 番号 20 の stripe については、私の解析から外した。

さて、ビンに区切られた stripe の 3 次元的な描像はこのようにして得られたわけである。次の作業として私は、先ほど単純な引き算により求めた、各 stripe 中のハロー (恒星ハロー) に所属している星を、その空間的な分布が Hernquist model に従うように stripe 中の各ビンにばら撒いていった。こうすることで Newby et al. 2013 が Hernquist model にフィットさせるデータとして扱ったものはほぼ再現できたと考えた。ここで、再現することを考慮すれば、ばら撒きに用いた Hernquist model が、彼らが使ったものと同じ形をしていなければならないのは当然であり、これを踏まえて式 (1) を使った。彼らは式 (1) における軸比  $q$  の値とスケール半径  $r_0$  の値をそれぞれ 0.53、6.73kpc と見積もったので、ばら撒きはその値を代入した上で行った。

$$\rho_{\text{stellarhalo}} = \frac{A}{\frac{r_*}{r_0} \left(1 + \frac{r_*}{r_0}\right)^3}, \quad (1)$$

$$\text{where } r_* = \sqrt{X^2 + Y^2 + \frac{Z^2}{q^2}}$$

ここで比例定数  $A$  の値は一意に決まっているはずで、全ての stripes にユニバーサルなものでなければならないはずである。しかしばら撒きに用いた Hernquist model の  $A$  の値は、各 stripe で異なっていた。

私は  $A$  の値が一意に決まっているというスタンスを崩したくはなかったので、この平均値  $A=9070$  を

全 stripes に対しユニバーサルに成立する値として定めた。そしてもう一度、全 stripes 中に、式 (1) の A を 9070 とした Hernquist model に従ってハロー所属星をばら撒いた。ばら撒き方としては単純に、式 (2) における  $r_*$  のところへ各 stripe の各ビンがもつ  $r_*$  の値を当てはめ、得られる値をそのビンに取められるハロー所属星の数とするものである。ばら撒いた結果として得られたのが、まさに今回モデルフィッティングさせるために扱う (疑似) データである。これを NFW model や Einasto model にフィッティングし直していったわけである。

このデータの、銀河系中心からの radial 方向の分布を見てみると、やはりハロー所属星の分布が一樣でないことが明らかだった。これは、NFW model や Einasto model へのフィッティングし直しが、ハロー所属星のデータ点の密集しているところに優先的に依存して決定されることになることも示しており、フィッティングの結果得られるものはデータ・情報源の有限性・非一様性の影響を少なからず受けているはずであることを既にこの段階で示唆していると言える。

ここまで見てきたように、私は用いる (疑似) データの生成の過程においてかなり思案をめぐらした。このことも考えると、本研究において妥当性の議論の余地があるとするところの部分に多いと考えられる。

そしてここからはいよいよ、生成したデータの NFW model、Einasto model へのフィッティングし直しの方法について簡単に解説していきたいと思う。先述の通り、これらモデルには軸比  $q$  の情報を盛り込ませており、式 (3)、(4) で表現されるモデルにフィッティングし直していったわけである。それぞれの表式は、NFW model については Binney and Tremaine 1987 が示したものの、Einasto model については Merritt et al. 2006 が示したものを参考にした。

$$\rho_{NFW} = \frac{A}{\frac{r_*}{r_0} \left(1 + \frac{r_*}{r_0}\right)^2} \quad (2)$$

$$\rho_{Einasto} = A \times \exp \left\{ -d_n \left( \frac{r_*}{r_0} \right)^{\frac{1}{n}} \right\} \quad (3)$$

Einasto model に付随する、 $n$  に依存する係数  $d_n$  や、インデックスの  $n$  の値については Merritt et al. 2006 の示すところを参考にし、 $d_n = 18, n = 6$  へと固定し

	A	q	r0(kpc)
各値間隔	100	0.1	0.1
範囲	1300~16900	0.1~1.0	0.1~15

図 1: Table.1:両 model に当てはめたフリーパラメータ。範囲について、A:各 stripe で異なっていた生成データの A の平均から  $3\sigma$ 。  $r_0$ :Newby et al. 2013 の結論として得られた最尤値 6.73kpc と付随エラー  $\sigma=2.51$ kpc 借用ののち、最尤値から  $3\sigma$ 。

た。また A の値は、もともと Newby et al. 2013 がハロー所属星のフィットの対象として選んだ、Hernquist model のものと、NFW model のものと、Einasto model のものとは、関数形が全く異なるゆえ大きく異なってくることに注意されたい。今回行ったフィッティングの作業においては当然 A の値も変えながら最適な値を見積もったわけであるが、ここで1つふれておきたいのは、そもそもの関数形が上記の3モデルで異なることに起因する A の固有の違いに関しては予め補正を加えたうえで、今回のフィッティングに臨んだということである。具体的には式 (2)(3) の A のところをそれぞれ  $A \times A_{NFW}^{correct}$ 、 $A \times A_{Einasto}^{correct}$  に書き直した上でフィッティングに臨んだわけであるが、そのときの  $A_{NFW}^{correct}=0.160$ 、 $A_{Einasto}^{correct}=1.54 \times 10^7$  としたということである。こうすることで、NFW model、Einasto model の“A”の値は Hernquist model のものと近い値となることを見込まれると考えた。

これら2つのフィッティングの model においていわゆるフリーパラメータはそれぞれ3つずつである (A と  $q$  と  $r_0$ )。これらに以下の表に示すような値を当てはめていった中で、最も生成データを良く説明するモデルを見積もっていった (Table.1)。

これで methods の説明を終わるが、細かな部分に関してまだ表記しきれていない部分があるが、ここでは割愛させていただく。

### 3 Results

私は NFW model、Einasto model へのもの生成データのフィッティングし直しを行った。その結

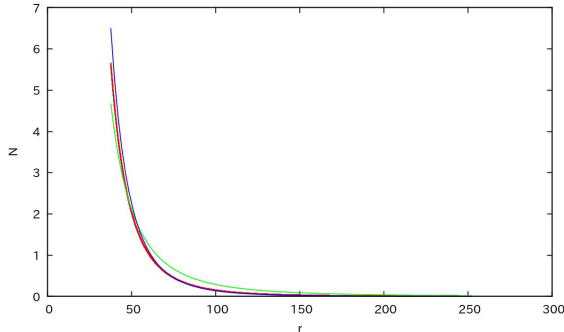


図 2: Fig.1:解析で得た結果のベストフィットモデルと、生成データの、銀河系中心からの radial 方向の分布。赤い点が生成データのプロット、緑線と青線がそれぞれベストフィットな NFW model、Einasto model の分布を表している。ここで横軸の  $r$  は  $r_*$  である。

果、最も生成データを良く説明するモデルはそれぞれ 1.  $(A, q, r_0)=(16900, 0.5, 4.9\text{kpc})$  の NFW model、2.  $(A, q, r_0)=(1300, 0.5, 11.8\text{kpc})$  の Einasto model であった。それぞれのベストフィッティングモデルと生成データの、銀河系中心からの radial 方向の分布を表した図が以下の Fig.1 である。参考にさせていただきたい。

## 4 Discussion

前にふれた、(疑似) データの生成の過程における妥当性の議論もちろんあるだろうが、ここではそれよりも着目すべき事実として得られた以下のことについてふれていきたい。

Results として得られた、最も生成データを良く説明するモデルの  $A$  の値は、NFW model のものも Einasto model のものも、Table.1 において示された当てはめていった  $A$  の値のうち、その値の範囲における端点値となってしまっている。このことは明らかに、今回当てはめた  $A$  の値ではないものが、最も生成データを説明するモデルにふさわしいということを示していると考えられる。このことにはここでふ

れておかなければならないと強く思うとともに、今回当てはめたのとはまた違う他の  $A$  の値を当てはめる同様の解析を将来的に行わなければならないことが示唆されていると、今回の解析を終えて理解している。

## 5 Conclusion

結論としては端的に以下のようなことが分かった。今後は上記 (Discussion) でふれたような、今回の解析の精度の問題を克服していきながら、この結果を将来的な rotation curve を説明する研究にいかしていければと思う。具体的には、恒星ハロー・DM ハロー関連性を認め  $q$  が両者で同一であるとした上での、rotation curve を説明する DM ハロー/ディスクモデルの見積もりである。

Newby et al. 2013 が Hernquist model に従うものとして選択し出したハロー所属星の分布を示すデータを再現し、その上でそれとは異なるモデルにその再現データをフィッティングしたところ、1. NFW model に関して、それへのベストフィットパラメータは  $(A, q, r_0)=(16900, 0.5, 4.9\text{kpc})$ 、2. Einasto model に関して、 $(A, q, r_0)=(1300, 0.5, 11.8\text{kpc})$  であった。とくにハローの軸比  $q$  (各モデルに組み込まれた軸比) に関しては 0.5 程度と、Newby et al. 2013 が示した 0.53 という値とも consistent であると言え、ハローの oblate な力学的形状を十分に支持するものであると言える。

## 6 References

- Binney, J., & Tremaine, S., 1987, Galactic Dynamics (Princeton: Princeton Univ. Press)
- Knapp, G. R., 1987, PASP, 99, 1134
- Loebman, S. R., Ivezić, Z., Quinn, T. R., et al., 2012, ApJ, 758, L23
- Merritt, D., Graham, A. W., Moore, B., et al., 2005, arXiv, 0509.417
- Newby, M., Cole, N., Newberg, H. J., et al., 2013, arXiv, 1304.1476
- Olling, R. P., 1995, AJ, 110, 591