

## 天の川銀河に存在する広大な極構造の形成

善光 哲哉 (京都大学大学院 理学研究科 宇宙物理学教室)

### Abstract

天の川銀河の周囲には衛星銀河が存在している。発見されている衛星銀河の分布を調べてみると、銀河面に対してほぼ垂直に突き刺さった円盤のような Disk of Satellites(DoS) と呼ばれる構造を作っていることが分かっている。そして DoS は衛星銀河の軌道平面を表しているということも分かっている。しかし、この構造がどのように形成されたのかは分からなかったため、いろいろな理論が考えられた。その中に潮汐カシナリオというものがある。潮汐カシナリオとは、質量の大きい銀河がもう一方の銀河を潮汐力で引き伸ばし星やガスを剥ぎ取ったりするというものである。

先行研究のシミュレーションで、 $10^5 - 7M_{\odot}$  程の質量を持つ天体ができることが示唆されていた。そこで今回紹介する Pawlowski et al. 2012 の論文では先行研究で示唆された天体に合致するのが球状星団で、球状星団の軌道平面は DoS の軌道平面に合致すると考えた。さらに先行研究とは別に潮汐カシナリオでできた銀河が銀河の潮汐力で破壊された天体があると著者らは考えた。ストリームはまさに衛星銀河や球状星団が天の川銀河の潮汐力で破壊された天体であったので、そのストリームの軌道平面も DoS に合致すると考えた。そこで著者らは球状星団は金属量と年齢で分類し分類したものの分布から軌道平面を求めた。またストリームはその形状から軌道平面を求めた。今回結果とそれに対する紹介論文での考察を紹介し、さらに論文では考えられていない他の研究への応用を紹介する。

### 1 イントロダクション

天の川銀河の周りにある衛星銀河が非等方的に分布していることから、衛星銀河の位相空間が揃っているということが提案された (Lynden-Bell 1976)。それから 2000 年頃からスローン・デジタル・スカイサーベイ (York et al. 2000) によって天の川銀河周りにある暗い衛星銀河も発見されたが、標準宇宙論と合致しないことが観測からいろいろと示唆されていた (Kroupa et al. 2010)。また、発見された衛星銀河の分布を求めてみると銀河面に対してほぼ垂直に突き刺さった円盤のような DoS(Kroupa, Theis & Boily 2005; Metz, Kroupa & Jerjen 2007; Metz, Kroupa & Jerjen 2009) と呼ばれる構造を作っていることが分かった。さらに DoS は衛星銀河の軌道平面を表していることも分かった (Metz, Kroupa & Libeskind 2008)。

こうした構造がなぜできるのかを説明するためにさまざまな理論が提唱された。その中に潮汐カシナリオというものがある (Kroupa et al. 2010)。これは、質量の大きい銀河が接近してきた銀河を潮汐力

で引き伸ばしガスや星を剥ぎ取ったりするというものである。実際に数値シミュレーション (Pawlowski, Kroupa & de Boer 2011) したところうまく DoS を形成することが分かった。さらにシミュレーションの結果から  $10^5 - 7M_{\odot}$  程の質量を持つ天体があると予想された (Bournaud, Duc & Emsellen 2008)。しかし発見されている衛星銀河はすべて調べられているので、それ以外の天体を考える必要があった。それとは別に、この潮汐カシナリオでできた衛星銀河は再び天の川銀河の潮汐力で破壊される可能性が考えられた。そこで、Pawlowski et al. 2012 は考えうる天体の軌道平面を求めて DoS の軌道平面と比較することを考えた。

### 2 対象天体

$10^5 - 7M_{\odot}$  程の質量を持つ天体として考えられたのは球状星団であった。また、天の川銀河の潮汐力で破壊された天体としてストリームが考えられた。これらから軌道平面を求め、DoS の軌道平面と一致するかどうかを調べた。

## 2.1 球状星団

球状星団は (Harris 2003) というカタログを用いた。ここには天の川銀河にある 137 個の球状星団のデータが揃っている。これを用いて、金属量と年齢で 3 種類に分類した (Mackey & van den Bergh 2005)。その 3 種類とは、バルジとディスク領域にあるもの、古いハローにあるものと若いハローにあるものである (Zinn 1993; Parmentier et al. 2000)。そして、分類した球状星団の分布を求め、最小二乗法を用いて銀河中心を原点とする軌道平面を決定した (Kroupa et al. 2010)。

## 2.2 ストリーム

ストリームはアークトゥルスストリームが発見されている中で一番古いものだが (Eggen 1971)、近年発見されている天体である。もともとは衛星銀河であったり、球状星団だったものが天の川銀河の潮汐力によって引き延ばされ文字通りストリーム状になったものである (Odenkirchen et al. 2003)。さまざまな発見論文があるが、位置情報がはっきりしているものだけをセクションしたところ、14 天体が基準を満たした。そして、銀河中心とストリームの始点終点を結んで扇のような形になったものから軌道平面を決定した。

## 3 結果

求めた軌道平面をそのまま DoS の軌道平面と比較すると見難いので、軌道平面の法線ベクトルに直して比較した。図 1 の中心を銀河中心から見た太陽の方角である。中が塗られていない紫色の四角が DoS の法線ベクトル方向である。菱形が球状星団の法線ベクトルの方向である。若いハローは銀河中心から 10kpc 内にある場合と inner とし、それ以外を outer とした。古いハローには NGC2419 という極めて遠い球状星団があり、それを含める場合と含めない場合では結果が異なるので両方示している。また、ストリームはすべての法線ベクトル方向が描かれており、その平均したものが中が塗られていない赤の六角形である。衛星銀河の軌道の極も緑色で示されているが今回の話ではあまり重要ではないので言及しない

(Metz, Kroupa & Libeskind 2008)。赤い線で囲った所が、平均したストリームの法線ベクトル方向の  $1\sigma$  の等高線である。これからわかる通り、若いハローの球状星団の法線ベクトル方向と、ストリームの平均した法線ベクトル方向が DoS の法線ベクトルに非常に近いことが分かった。これはストリームと若いハローにある球状星団が潮汐カシナリオで形成された可能性が極めて高いことを示している。

## 4 議論

### 4.1 法線ベクトルの評価

球状星団の分類のうち、バルジとディスクに分類されたものの法線ベクトル方向は図 1 のように銀河の極と同じである。これから、バルジとディスクの球状星団の軌道は銀河面に対して平行であることがわかる。また、古いハローに分類されたものの法線ベクトルは DoS の法線ベクトルよりも遠く離れている。よって、この 2 つは潮汐カシナリオで形成されたものではないという可能性が高いと考えられた。さらに、若いハローに分類された天体が本当に偏った分布なのかどうかをブートストラップ法を用いて評価した。等方的に分布していると仮定すると、DoS の法線ベクトルに近い値を取る確率は 2.5% と非常に低いため、若いハローに分類された球状星団の分布には偏りがあることが定量的にも示された。

ストリームの法線ベクトルの向きが等方的かどうかをコルモゴロフ・スミルノフ検定を用いて評価した。ストリームの法線ベクトルが等方的だと仮定する。そして、DoS の法線ベクトルとストリームの法線ベクトルの位置角を  $\theta$  とした。さらに、天の川銀河面ではストリームを観測することが困難で、ストリームが発見されていないというバイアスを考慮した。今回見つかった 14 個のストリームの内 7 個が DoS の法線ベクトルに近い値を持ったので、位置角が  $32^\circ$  内 (DoS の法線ベクトルとストリームの一つである Letha との位置角が  $32^\circ$ ) に 7 個のストリームの法線ベクトルが揃う確率を求めたところ、0.34% と非常に低かった。よって、ストリームの法線ベクトルも偏りがあることが示された。



河の合体によって引き起こされたと提唱した (Bekki & Tsujimoto 2011; Di Matteo et al. 2014)。この説ではバルジと厚いディスクの間の星分布の類似点もうまく説明できる (Melendez et al. 2008; Alves-Brito et al. 2010; Bensby et al. 2011)。もしも潮汐カシナリオで形成された衛星銀河によるものならば、金属量の分布や恒星の固有運動などに銀河ディスクには衛星銀河の落下による痕跡が残っているかもしれない。それらの痕跡から、銀河ディスクの 2 層の構造形成理論に制限を与えることができるかもしれない。そこで、銀河ディスクの個々の恒星の金属量や固有運動を求めることは大事であると考えられる。

## 5 まとめ

今回紹介した Pawlowski et al. 2012 は、先行研究で考えられていた  $10^5 - 7M_{\odot}$  程の質量を持つ天体や潮汐カシナリオでできた銀河が銀河の潮汐力で破壊された天体が球状星団とストリームだと考え、それらの軌道平面を求めて DoS の軌道平面との比較を行った。その結果、若いハローに分類される球状星団とストリームは DoS の軌道平面にほとんど揃い、これからこの 2 つが潮汐カシナリオで形成された可能性が高いことが分かった。さらに、潮汐カシナリオによって形成された衛星銀河が形成されてから天の川銀河の銀河面にどのような影響を与えたのかについて独自に考察した。そこで銀河ディスクは 2 層の構造の形成に潮汐カシナリオが関係していると考えた。潮汐カシナリオによって形成された衛星銀河が銀河面に落下することで、銀河ディスクにはその痕跡または理論に制限を与えることができるかもしれない。そこで、銀河ディスクの個々の恒星の金属量や固有運動を求めることは大事である。

## 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。

この発表を進めるあたり指導教官の長田哲也教授にいろいろとご意見をいただきました。また、博士後期課程一年の長友竣先輩には発表練習や文章校正

だけでなく、日頃からいろいろとお世話になりお礼申し上げます。そして、時間を割いて発表練習に付き合ってくださった宇宙物理学教室の先輩及び同期の皆様に深く感謝いたします。

## 参考文献

- Alves-Brito A., et al. 2010, A&A, 513, A35  
Bekki, K., Tsujimoto, T., 2011, MNRAS, 416, L60  
Bensby, T. et al. 2011, A&A, 533, A134  
Bournaud F., Duc, P.-A., Emsellen, E., 2008, MNRAS, 389, L8  
Di Matteo, P. et al. 2014, ArXiv, e-prints  
Eggen, O. J., 1971, PASP, 83, 271  
Gilmore, G., Reid, N., 1983, MNRAS, 202, 1025  
Harris, W. E., 1996, AJ, 112, 1487  
Kroupa, P., Theis, C., Boily, C. M., 2005, A&A, 431, 517  
Kroupa, P. et al. 2010, A&A, 523, A32  
Lee, Y. S., et al. 2011,  
Lynden-Bell, D., 1976, MNRAS, 174, 695  
Mackey, A. D., van den Bergh, S., 2005, MNRAS, 360, 631  
Melendez, J. et al. 2008, A&A, 484, L21  
Metz, M., Kroupa, P., Jerjen, H., 2007, MNRAS, 374, 1125  
Metz, M., Kroupa, P., Jerjen, H., 2007, MNRAS, 394, 2223  
Metz, M., Kroupa, P., Libeskind, N. I., 2008, ApJ, 680, 287  
Pawlowski, M. S. et al., 2012, MNRAS, 423, 1109  
Pawlowski, M. S., Kroupa, P., de Boer, K. S., 2011, A&A, 532, A118  
Odenkirchen, M. et al., 2003, AJ, 126, 2385  
Parmentier, G. et al. 2000, A&A, 363, 526  
York, D. G. et al., 2000, AJ, 120, 1579  
Zinn, R., 1993, in Smith G. H., Brodie J. P., eds, ASP Conf. Srt. Vol.48, The Globular Cluster-Galaxy Connection. Astron. Soc. Pac., San Francisco, p.38