Development of Multiple Tidal Arms in a Satellite Galaxy

穂積俊輔 (滋賀大学教育学部), Andreas Burkert (University of Munich)

はじめに

親銀河の周りを軌道運動する比較的近い衛星銀河は、親銀河からの潮汐力を受けて一対の潮汐腕を形成することが知られている(*e.g.*, Piatek & Pryor 1955)。このような一対の潮汐腕はいくつかの球状星団に対しても見つかっている(*e.g.*, Belokurov et al. 2006)。最近の観測によれば、Willman 1として知られるSDSSJ1049+5103は、通常の2本の潮汐腕だけでなく、この潮汐腕の方向にほぼ垂直に3本目の腕が衛星本体から出ていることが明らかにされている。

そこで、親銀河による潮汐作用によってどのような潮汐腕が形成されるのかを詳しく調べるために、親銀河を外場として与え、その中を軌道運動する自己重力衛星銀河の力学進化を追跡した。その結果、一般に、衛星銀河が遠銀点付近に近づくたびに、新たな一対の潮汐腕が形成されることがわかった。このような多重潮汐腕がどのようなメカニズムで形成されるのかを示す。

モデル

- **親銀河モデル**

  親銀河はハローのみからなる無限に拡がる球対称等温密度分布を仮定し、ポテンシャル $\Phi_{\rm g}$ を

$$\Phi_{\rm g}(r) = {v_{\rm c}}^2 \ln r \tag{1}$$

  で与える。ここで、r は銀河中心からの距離であり、$v_{\rm c}$ は円運動の速さである。

- **衛星銀河モデル**

  衛星銀河は自己重力系とし、その密度分布 $\rho_{\rm s}$ とポテンシャル $\Phi_{\rm s}$ は、それぞれ、

$$\begin{cases} \rho_{\rm s}(r) = \dfrac{3M_{\rm s}}{4\pi a_{\rm s}^3}[1+(r/a_{\rm s})^2]^{-5/2} \\ \Phi_{\rm s}(r) = -\dfrac{GM_{\rm s}}{\sqrt{r^2+a_{\rm s}^2}} \end{cases} \tag{2}$$

  によって与えられるPlummerモデルで表す。ここで、$M_{\rm s}$ と $a_{\rm s}$ は、それぞれ、衛星銀河の質量とスケール長である。衛星銀河は粒子数 $N = 50,000$ で表し、$5a_{\rm s}$ まで拡がっているものとする。

- **初期条件**

  衛星銀河が点銀河と仮定したときに、遠銀点 $400\,a_{\rm s}$ で近銀点 $80\,a_{\rm s}$ の軌道になるように、初期に遠銀点に衛星銀河を親銀河中に配置する。

方法

- **計算コード**

  計算にはツリーコード (Barnes & Hut 1986)を使用する。衛星銀河の粒子に対するsoftening length ε は $\varepsilon = 0.068\,a_{\rm s}$ とする。計算開始後に衛星銀河が親銀河から瞬間的に重力を受けて平衡状態が大きく変化しないように、衛星銀河の周期の1/20まで親銀河のポテンシャルは断熱的に増大させるものとする。

- **計算の単位**

  衛星銀河を、$M_{\rm s} = 10^7\,M_\odot$ で $a_{\rm s} = 0.25\,{\rm kpc}$ の球状銀河として親銀河の $v_{\rm c} = 220\,{\rm km\,s^{-1}}$ と設定した場合(以下、基準モデルと呼ぶ)に $G = M_{\rm s} = a_{\rm s} = 1$ となる単位系を用いる。衛星銀河の質量を変えるときは、$M_{\rm s}$ の値を変えるものとする。この場合の時間の単位は 1.86×10^7 年、速度の単位は $13.1\,{\rm km\,s^{-1}}$ となる。また、親銀河の $100\,{\rm kpc}$ までの質量は $1.13\times10^{12}\,M_\odot$ となる。

議論

図1より、衛星銀河は親銀河の潮汐力を受けて潮汐腕を形成する。親銀河の潮汐力は近銀点でもっとも大きくなるが、その影響は遅れて出現し、実際に潮汐腕が引き出されるのは遠銀点付近である。さらに、衛星銀河が軌道を1周して遠銀点付近に達するたびに新たに一対の潮汐腕が現れる。その結果、衛星銀河には多重潮汐腕が形成される。

図2より、各潮汐腕に属する粒子は、衛星本体に束縛された状態から非束縛状態になってエネルギー (E) と角運動量 (J) を変化させるが、一旦衛星本体から非束縛状態になると、その後はエネルギーも角運動量も実質的に変化しない。したがって、各潮汐腕に属する粒子は、衛星に束縛されているときにもっていた $(E,\ J)$ で決まる軌道から、潮汐力を受けて新たな $(E,\ J)$ で決まる軌道に遷移したことになる。

図3と図4から、どのような衛星銀河と親銀河の質量比であっても、1番目、2番目、3番目に形成される潮汐腕に属する粒子の $(E,\ J)$ 分布はほとんど同じである。したがって、新たに形成された潮汐腕に属する粒子の軌道はその1つ前に形成された潮汐腕に属する粒子の軌道と同じことになる。つまり、衛星銀河の軌道の同じ位相で同じ現象が繰り返されて、多重潮汐腕が形成されていることになる。Willman 1に見られる3本の腕もこのような軌道運動で形成されたものであると考えられる。

図5から、衛星本体から非束縛状態になって各潮汐腕に属する粒子がもっているエネルギーや角運動量から初期に衛星本体に束縛されたときにもっていたエネルギーや角運動量との差の平均は、衛星銀河の質量や親銀河の質量、および、何番目に形成された潮汐腕かに依らず、$(M_{\rm s}/M_{\rm g})^{1/3}$ に比例することがわかる。

結論

衛星銀河が親銀河の潮汐力を受けて軌道運動するとき、遠銀点付近で一対の潮汐腕を形成する。その際、潮汐腕を形成する粒子は衛星本体から非束縛状態になって新たなエネルギーと角運動量をもって軌道運動する。このようなエピソードが繰り返されて衛星銀河に多重潮汐腕が形成される。潮汐腕の粒子のエネルギーや角運動量の平均の変化は $(M_{\rm s}/M_{\rm g})^{1/3}$ に比例する。

参考文献

- Barnes, J., & Hut, P., 1986, Nature, 324, 446
- Belokurov, V., et al., 2006, ApJ, 637, L29
- Montuori, M., et al., 2006, submitted to ApJ (astro-ph/0611204)
- Odenkirchen, M., et al., 2001, ApJ, 548, L165
- Piatek, S., & Pryor, C., 1995, AJ, 109, 1071
- Willman, B., et al., 2006, submitted to AJ (astro-ph/0603486)

結果

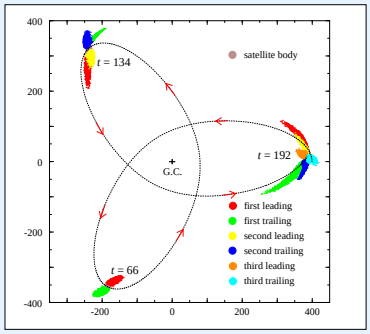

図 1: 基準モデル ($M_{\rm s} = 10^7\,M_\odot, a_{\rm s} = 0.25\,{\rm kpc}$, 遠銀点100 kpc, 近銀点20 kpc)における衛星銀河の軌道運動による潮汐腕の進化。初期に球状の衛星銀河は、近銀点付近で親銀河からの大きな潮汐力を受けて変形し、遠銀点付近で一対の潮汐腕を形成する。その後、このような潮汐作用による一対の潮汐腕の形成を遠銀点付近で繰り返す。その結果、衛星銀河は、毎回遠銀点付近で新たな一対の潮汐腕を発生させ、多重潮汐腕が形成される。

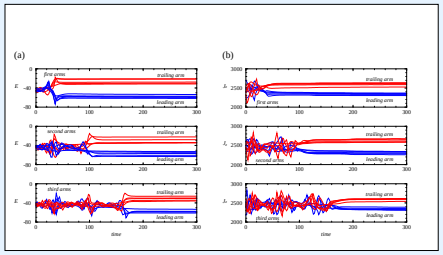

図 2: (a) 基準モデルにおける各潮汐腕に含まれるランダムに選ばれた5個の粒子のエネルギーの時間変化。いずれの潮汐腕に含まれる粒子も、衛星本体に束縛された状態から引き出されて非束縛状態になって潮汐腕を形成すると、その後はエネルギー変化はほとんどなくほぼ一定に保たれる。(b) 基準モデルにおける各潮汐腕に含まれるランダムに選ばれた5個の粒子の角運動量の時間変化。粒子のエネルギーと同様に、一旦、衛星本体から非束縛状態になると、その後は角運動量はほとんど変化しない。

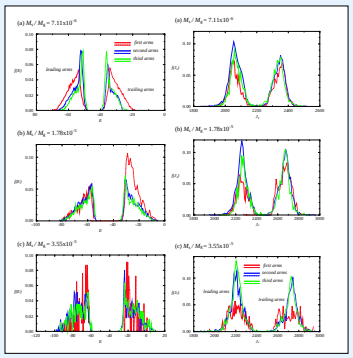

図 3: 親銀河の質量を固定して衛星銀河の質量を変えたときの最終状態において各潮汐腕に含まれる粒子のエネルギー分布 $f(E)$ と、角運動量の軌道面に垂直な成分の分布 $f(J_z)$。最初に形成される潮汐腕、2番目、3番目に形成される潮汐腕の $f(E)$ と $f(J_z)$ はほぼ同じ分布をしていることがわかる。

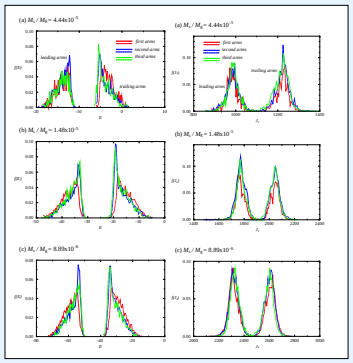

図 4: 衛星銀河の質量を固定して親銀河の質量 $(v_{\rm c})$ を変えたときの最終状態において各潮汐腕に含まれる粒子のエネルギー分布 $f(E)$ と、角運動量の軌道面に垂直な成分の分布 $f(J_z)$。最初に形成される潮汐腕、2番目、3番目に形成される潮汐腕の $f(E)$ と $f(J_z)$ はほぼ同じ分布をしていることがわかる。

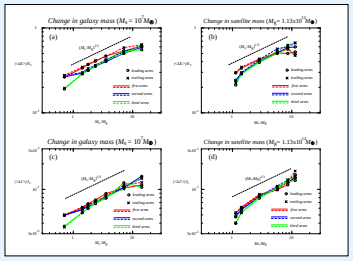

図5: 衛星銀河の質量を固定して親銀河の質量を変化させた場合と、親銀河の質量を固定して衛星銀河の質量を変化させた場合における、各潮汐腕に含まれる粒子の平均のエネルギー変化と平均の角運動量の軌道面に垂直な成分の変化。ここで、エネルギー変化と角運動量変化ともに、初期の値と最終状態の値の差を意味し、それぞれ、衛星の中心のエネルギーと角運動量の軌道に垂直な成分の値で規格化している。エネルギー変化も角運動量変化も $(M_{\rm s}/M_{\rm g})^{1/3}$ に比例することがわかる。