サテライト銀河の進化とアストロメトリ

牧野淳一郎

東京大学大学院理学系研究科

講演概要

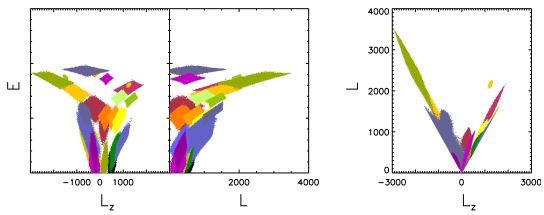
1. 初めに — 力学的な銀河形成史
2. サテライト銀河の進化の「理論」
3. 力学的摩擦の扱い
4. tidal stripping と力学的摩擦
5. JASMINE との関係
6. まとめ

初めに — 力学的な銀河形成史

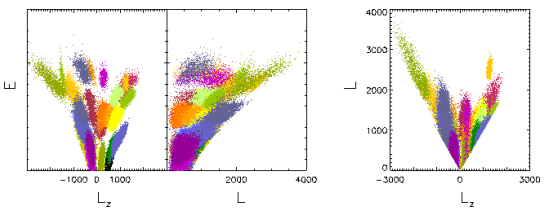
標準的な構造形成理論 — hierarchical clustering
「小さなものが集まって成長」
銀河は、その構成要素のパッチワーク

「想像図」

Helmi and de Zeeuw (astro-ph/0007166)
初期の星の起源の分布

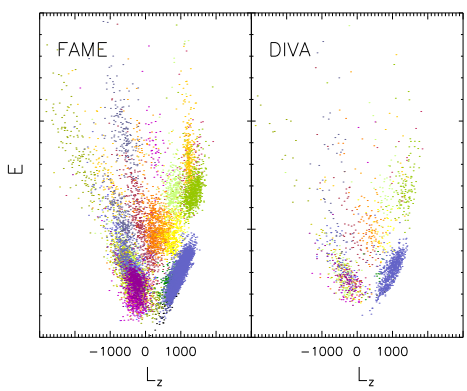


「現在の姿」



銀河ポテンシャルは halo+disk+bulge
Miyamoto-Nagai disk
GAIA の観測誤差を考慮した後

ちなみに DIVA, FAME だと



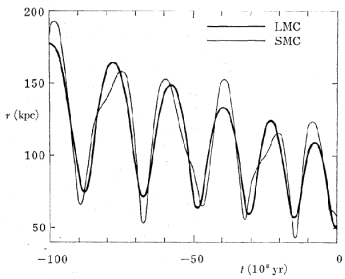
こんな簡単な話で大丈夫？

- サテライト銀河の軌道は進化する
  - 力学的摩擦
  - 親銀河の潮汐場との相互作用

力学的摩擦による軌道進化

古典的計算: 村井・藤本 (LMC-SMC)

論文読んでもどうやって計算したのかよくわからない、、、、



これは合ってるか?というのは実は問題

力学的摩擦の理論式

$$f_0(v) = \frac{n_f}{(2\pi\sigma^2)^{3/2}} \exp\left(\frac{-v^2/2}{\sigma^2}\right)$$

$$< \Delta v_{para} >= -4\frac{n_f \Gamma}{\sigma^2}\left(1+\frac{m}{m_f}\right) G(x)$$

ここで erf は誤差関数であり、

$$G(x) = \frac{\mathrm{erf}(x) - x\mathrm{erf}'(x)}{2x^2}$$

また $x = v_t/(\sqrt{2}\sigma)$。
ここで Γ は

$$\Gamma = 4\pi G^2 m_f^2 \ln\Lambda$$

$\ln\Lambda$ って?

インパクトパラメータ p での積分: $p \to \infty$ で形式的に発散する。

$$\Delta v_{para} = -2V\frac{m_f}{m_t+m_f}\frac{1}{1+(p/p_0)^2}$$

に $2\pi n p dp$ をかけて積分するから。 $p \to 0$ は(質点粒子でも) 発散しない。

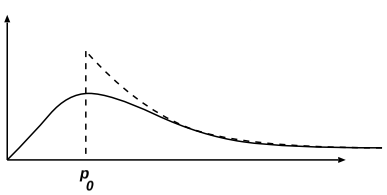
p の上限

- 系の「大きさ」くらい
- 密度のスケールハイト

もちろん n の p への依存性を書き下せればそれを使うべき

積分の下限 (1)

質点粒子: Δv_{para} をまともに積分すればよい。
実際には $\Delta v_{para} \sim 1/p$ として $p = p_0$ で積分を打ち切るのとあんまり変わらない。



積分の下限 (2)

粒子が広がっている場合 (衛星銀河とか):
Δv_{para} を軌道をといてちゃんと計算すればいい。
粒子サイズ $>> p_0$ の時は適当な近似ができる。

この場合にも、実際には $\Delta v_{para} \sim 1/p$ として p が典型的な半径 (half-mass radius とか) で積分を打ち切るので普通は大丈夫。

普通はどうするか？

大抵の数値計算の論文では以下のどちらかを使っている

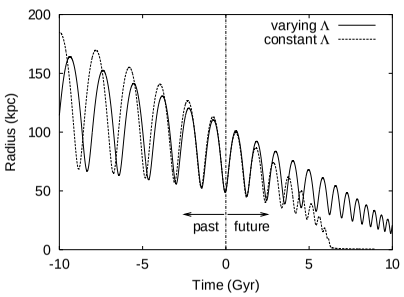
- $\Lambda = M_g/M_s$
- $\Lambda = R_g/R_s$

添字 g, s: 親銀河、サテライト銀河
理屈からすると、、、

$$\Lambda = R(t)/R_s$$

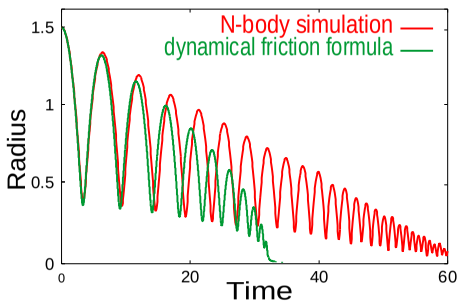
R(t) は親銀河の中心からの距離 (時間変化する)
とするのがもっともらしい (親銀河のコアの外なら)

$\ln\Lambda$ のとりかた



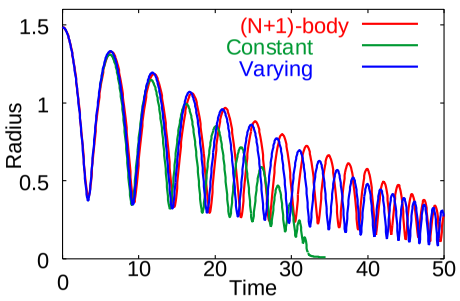
(Hashimoto, et al. 2003)
破線：$b_{max} = R_{\rm halo}$ 実線：$b_{max} = r_s$ (衛星の位置)
破線が村井・藤本によく合う。

N 体との比較 (1)



$b_{max} = R_{\rm halo}$
N 体より進化速い 軌道丸くなる

N 体との比較 (2)



$b_{max} = r_s$ にすると、、、
N 体とよく合う 軌道丸くならない

N 体との比較まとめ

$\ln\Lambda$ の絶対値だけの問題ではないことに注意

軌道が丸くなるかならないか
= 近点で DF がどれくらい有効か

$b_{max} = r_s$ とすると近点で $\ln\Lambda$ が非常に小さくなる
= circularization が抑えられる

$\ln\Lambda$ の問題

DF の公式を使って衛星銀河の進化を調べた論文は無数にあるが、、、

これまで発見できたなかでは Tremaine (1976) だけが $b_{max} = r_s$ 採用。

一番悪い論文: $\Lambda = M_H/M_s$ これは衛星銀河を質点と仮定しているのと同じ。

こういう困った論文もいっぱいある。特に semi-analytic の論文では大抵これ。

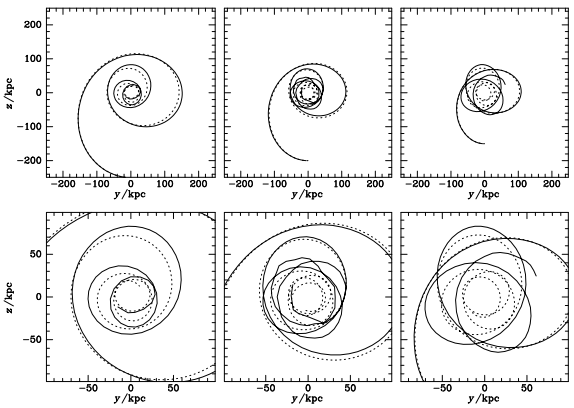
Tidal stripping と力学的摩擦

Tidal stripping と力学的摩擦を同時に「正しく」考慮すると、、、

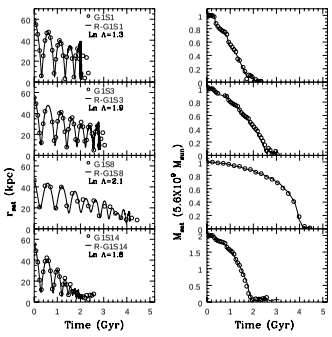
- Jiang and Binney (MN 2000, 314, 468)
- Velázquez and White (MN 1999, 305, 527)

「チャンドラセカールの公式の力学的摩擦と潮汐半径でのストリッピングで合う」と文章には書いてある。

どれくらい合うか？ Jiang and Binney



どれくらい合うか？ Velázquez and White



Notice that the agreement is quite remarkable ... provided we choose the right value for Λ
The values for Λ *... were fine-tuned to get the 'right' values.*

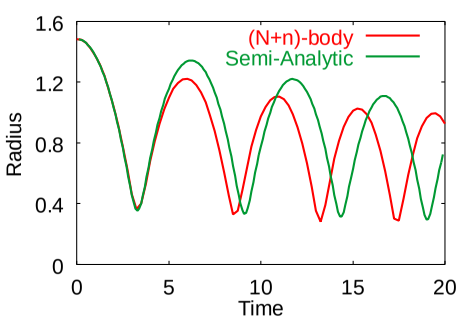
・・・それはなんか違うんじゃないか、、、

他の人の結果のまとめ

Jiang and Binney: N 体とチャンドラセカールの式、あんまりあってない
Velázquez and White: まあまああってるけど、、、$\log\Lambda$ をフィッティングパラメータにするのは変。

何故か？
計算は間違ってないか？

我々の計算 橋本 (2003, 修士論文)



$N+1$: サテライトはリジッド、質量変化しない
$N+n$: サテライトも N 体、質量変化する
full N-body のほうが進化が速い!?

とりあえずの解釈

- ストリップされた粒子との相互作用が効いている？

確かに角運動量交換はあるが、それだけでは説明しきれない、、、

というわけで、「まだ良く分からない」

JASMINE との関係

JASMINE との関係

すみません、あんまりないかも、、、
どちらかというとハローに関係

JASMINE との関係

バルジで何が見えるか？

- 若い星団 (Arches, Quintuplet)
- 銀河中心近くの若い星

距離精度としては苦しい？

まとめ

- サテライト銀河の進化は、単純に「力学的摩擦+ストリッピング」として理解できるものではない
- 力学的摩擦の正しい理論的扱いには、 $\log \Lambda$ の正しい扱いが重要
- full N-body の時のサテライトの軌道進化は、力学的摩擦の正しい理論的扱いからでてくるものより速い