

rR1 ring structureの起源

著者

M.Romero-Gomez

J.J.Masdemont

E.Athanassoula

C.Garcia-Gomez

スライド作成者

野口研究室 修士二年 笠井互

Ring Structure in Barred Galaxy

Barred galaxyにはRingを持つものがある。

今回の主役は rR_1 と分類される銀河。

r はinner ringを表し、

R はouter ringを表す。

1 はringが8の字形な事を表す。



Butaが1986に提示した分類.

今回の仕事の特徴

Celestial Mechanicsでよく用いられる手法を
でring structureの起源について考察してゆく.

なお、この方法はGalactic Dynamicsの分野
ではあまり用いられていない.

Lagrangian point

今回のmodelは軸対称+bar-likeなmodel

回転座標系

力 : 重力 + コリオリの力 + 遠心力

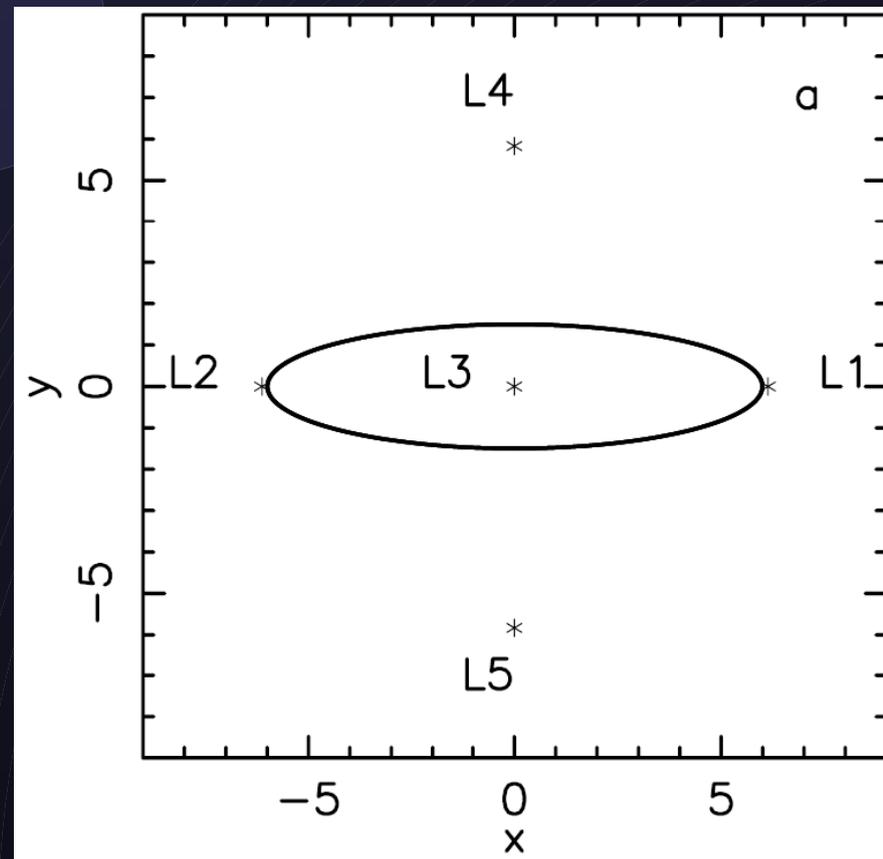
これらでeffective potentialを作ってあげる.

$$E_J = \frac{1}{2} |\dot{r}|^2 + \Phi_{\text{eff}}$$

このeffective potentialの平衡点が
Lagrangian Points.

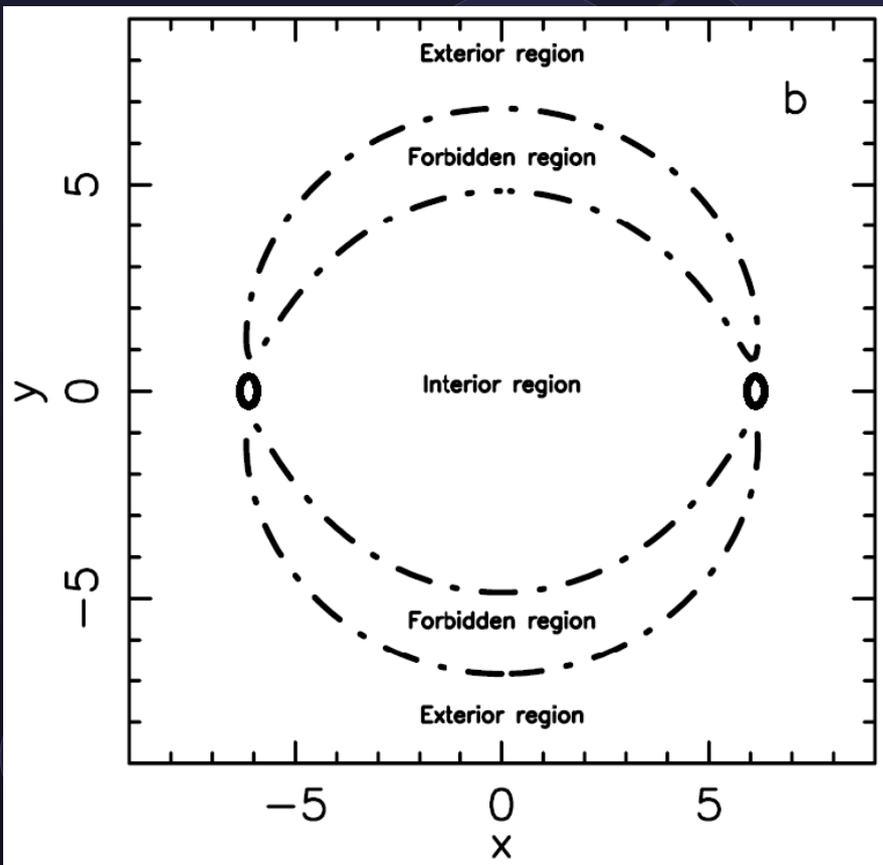
Lagrangian Pointの位置

Lagrangian PointはBarに対して次の位置にある。



Lagrangian Pointの周辺と Curve of zero velocity(CZV)

- $E_J = \Phi_{\text{eff}}$ の集合をCZVという。
- ある E_J のときに星が動ける範囲はForbidden regionで隔てられたExterior, Interior regionになる。



Lagrangian Point近傍での 運動方程式.

Effective potentialをLagrangian Point近傍
で1次まで展開すると,

$$\begin{cases} \ddot{x} = 2\Omega_p \dot{y} - \Phi_{xx}x \\ \ddot{y} = -2\Omega_p \dot{x} - \Phi_{yy}y \\ \ddot{z} = -\Phi_{zz}z \end{cases}$$

が得られる.

L1(L2)付近での解(線型).

線型運動方程式を

Lagrangian Point L1近傍で解いてあげると、

$$\begin{cases} x(t) = X_1 e^{\lambda t} + X_2 e^{-\lambda t} + X_3 \cos(\omega t + \phi), \\ y(t) = A_1 X_1 e^{\lambda t} - A_1 X_2 e^{-\lambda t} + A_2 X_3 \cos(\omega t + \phi), \\ z(t) = X_7 \cos(\nu t + \psi) \end{cases} \quad \lambda, \omega, \nu \in \mathbb{R}$$

になる。

$$A_1 := \frac{\Phi_{xx} + \lambda^2}{2\Omega_p \lambda}, \quad A_2 := \frac{\Phi_{xx} - \omega^2}{2\Omega_p \omega}$$

線型の解から分かること.

(X_1, X_2, X_3, ϕ_1) が決まれば
時刻0での (x, y, \dot{x}, \dot{y}) がわかる.

$$X_1 = X_2 = 0$$

楕円形の回転運動. (Linear Lyapunov Orbit)

$$X_1 = 0, X_2 \neq 0$$

$t = \infty$ で Linear Lyapunov Orbit に一致.

(stable manifold of the Linear Lyapunov)

$$X_1 \neq 0, X_2 = 0$$

$t = -\infty$ で Linear Lyapunov Orbit に一致.

(unstable manifold of the Linear Lyapunov)

Lagrangian Point近傍での 運動方程式.

Effective potentialをLagrangian Point近傍
で1次まで展開すると,

$$\begin{cases} \ddot{x} = 2\Omega_p \dot{y} - \Phi_{xx}x \\ \ddot{y} = -2\Omega_p \dot{x} - \Phi_{yy}y \\ \ddot{z} = -\Phi_{zz}z \end{cases}$$

• 得られる.

非線型orbitも考える.

1次展開 \rightarrow 高次展開

Linear Lyapunov orbit
 \rightarrow Lyapunov orbit

Stable manifold of the linear Lyapunov
 $\rightarrow W_{\gamma}^s$

Unstable manifold of the linear Lyapunov
 $\rightarrow W_{\gamma}^u$

非線型orbitの集合の定義

$$W_{\gamma}^s := \left\{ X \in \mathbb{R}^4 / \lim_{t \rightarrow \infty} \|\Psi(t, X) - \gamma\| = 0 \right\}$$

要は時間経つにつれてLyapunov orbitに漸近していくような軌道の集合

$$W_{\gamma}^u := \left\{ X \in \mathbb{R}^4 / \lim_{t \rightarrow -\infty} \|\Psi(t, X) - \gamma\| = 0 \right\}$$

時間逆行するにつれてLyapunov orbitに漸近していくような軌道の集合

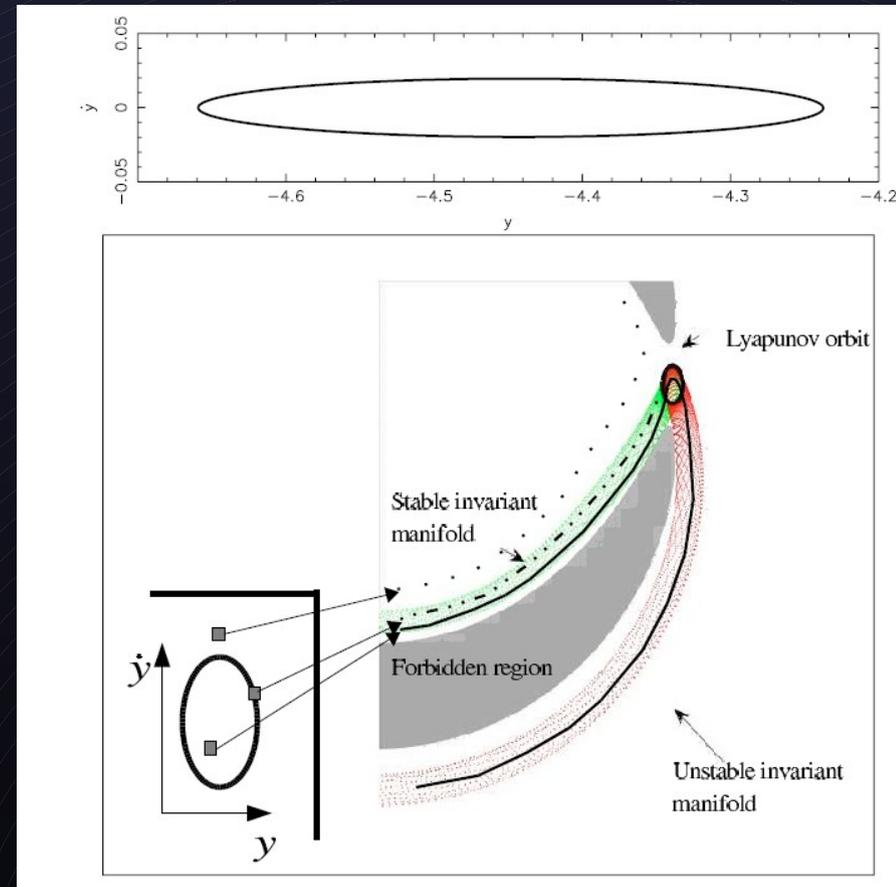
$\Psi(t, X)$

$t = 0$ で $X = (x, y, \dot{x}, \dot{y})$ という状態をもつorbitの集合

γ : Lyapunov orbits

Manifoldの断面

- $x = 0$ での W_γ^s を $W_{\gamma,1}^s$ とする.
- $W_{\gamma,1}^s$ は環状に分布.
- 内側はManifoldと共に exterior region に出てゆく. **これがringになると思われる.**
- 外側はinterior regionに残る.
- W_γ^s は **exterior region** に出てゆく軌道と留まる軌道との境.



実際にSimulationしてringを作る.

Modelの詳細

Miyamoto-Nagai potential

$$\Phi_d = - \frac{GM_d}{\sqrt{x^2 + y^2 + \left(A + \sqrt{B^2 + z^2}\right)^2}}$$

Ferrers bar

$$\rho = \begin{cases} \rho_c (1 - m^2)^n & m \leq 1 \\ 0 & m \geq 1 \end{cases}$$

$$m^2 = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}$$

$$\rho_c = \frac{105}{32\pi} \frac{GM_b}{abc}$$

Simulationのパラメタとか?

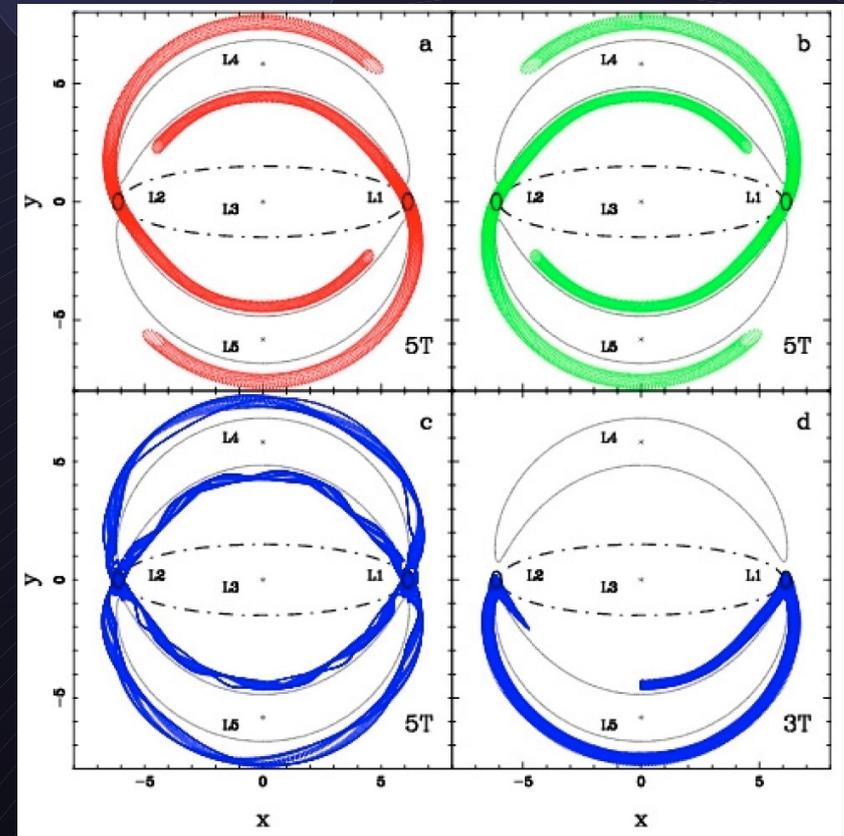
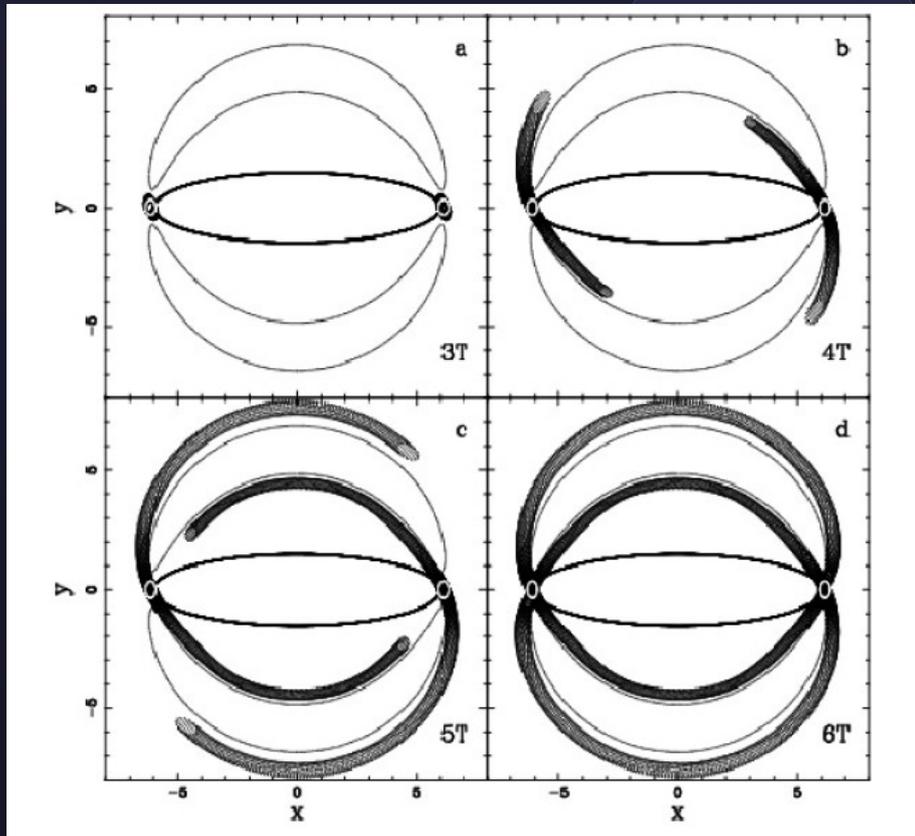
symbol	value	symbol	value
A	3	n	2
B	1	a	6
GM_d	0.9	b	1.5
z	0	c	0.6
		GM_b	0.1

Unit Length 1kpc

Unit Time 2Myr

Method Runge-Kutta-Felhberg (7-8次)

Result



- $T=3,4,5,6$ でのmanifoldの変化を見ている.
- manifoldの変化は非線型.

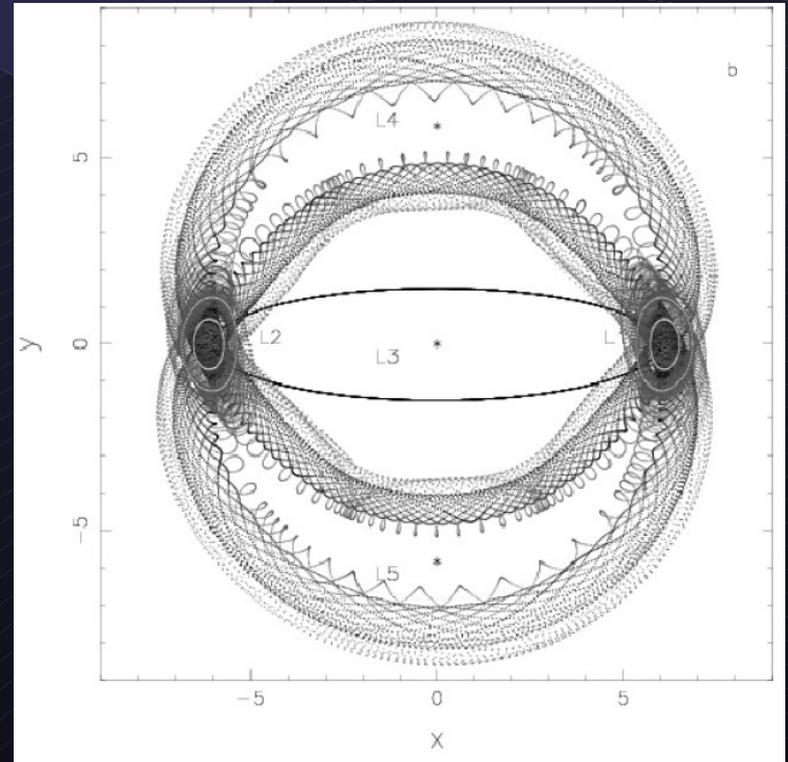
- 上2つはunstableとstable manifoldの進化.
- 下2つはorbitの進化.

Discussionの要旨.

- W_γ^s , W_γ^u の位置は E_J に殆ど依存しないが、軌道の密度に変化が現れる.
- 今回はbarとringが共回転しているが本来はbarは角運動量を失うはずである.
- Ring形成にouter Lindblad resonanceの寄与は必要ないのかも.

Discussion I-i

- E_J が大きくなると
Manifoldが太くなり、
軌道の密度も上がる。
- E_J が大きくなった分、
 W_γ^u として採用できるエ
ネルギーレベルの数が
増えた。



たぶんこんな感じかなあ？

Lyapunov orbitはunstableなperiodic orbit.
Lyapunov orbitを作るにはenergyがある程度
高くなくてはいけない.

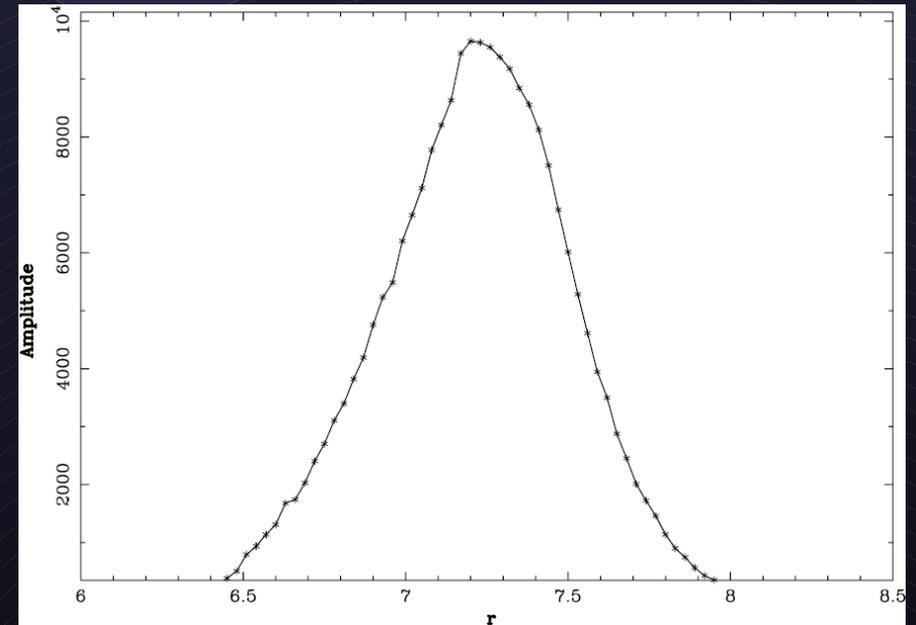
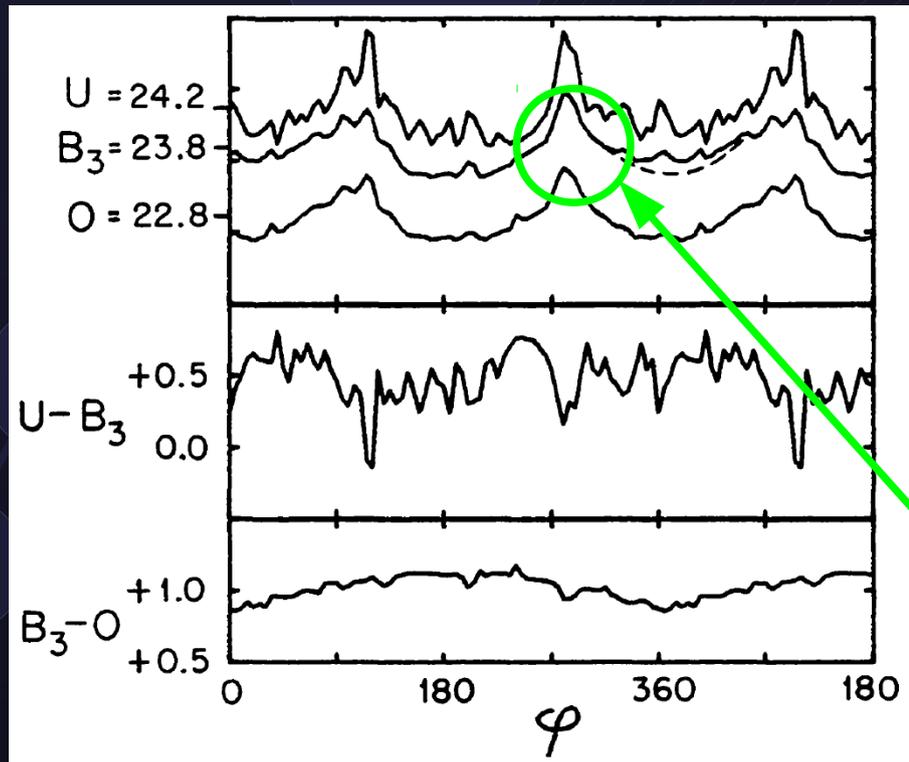
$(h_{cr} < E_{J})$

E_{J} が高くなるとunstableなLyapunov orbit
になる軌道の数が増える.

だからmanifoldが太く、高密度になる.

Discussion I-ii

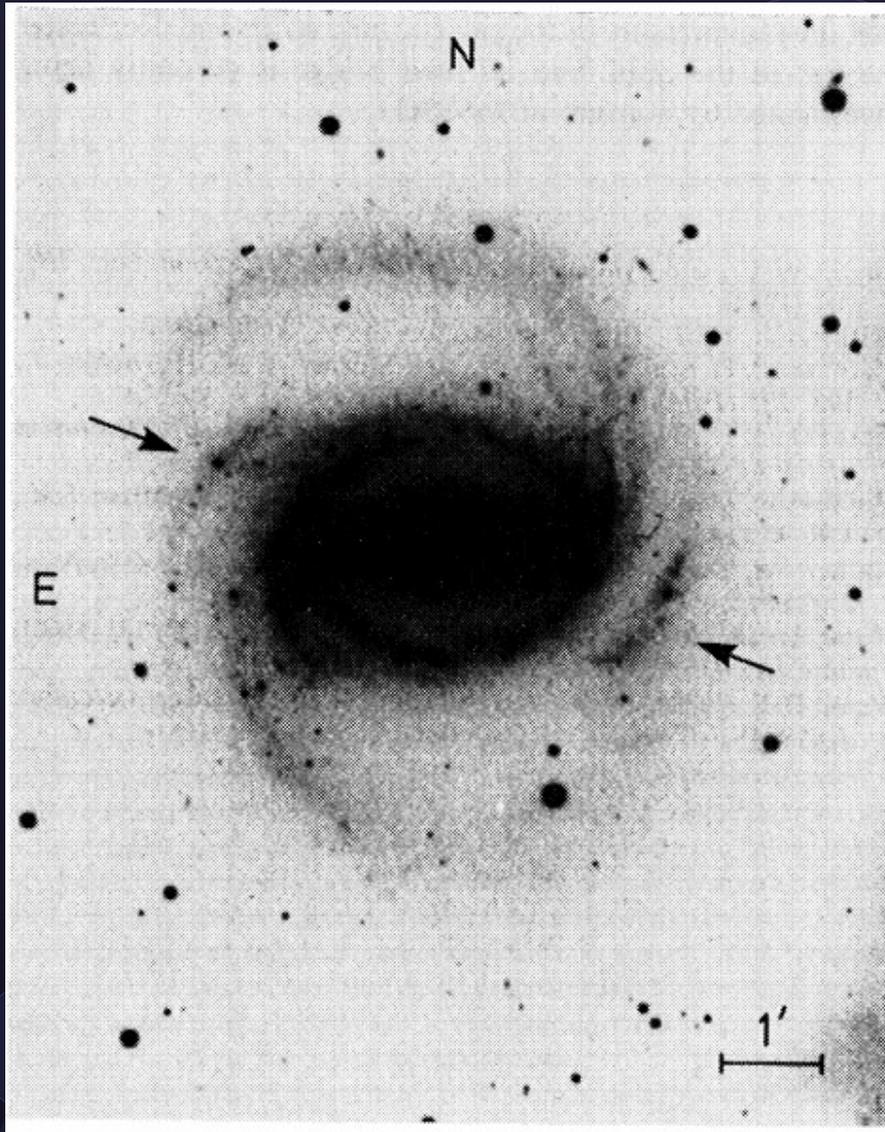
- 右図はExterior regionのmanifoldの軌道数密度.



- Schwizer 1976にあるring及びspiralの星のpatternと概形が似てる.

この部位だと思われる

Discussion II



Buta 1984

- 本来はBarのpattern speedは減速する
 - L1, L2, L4, L5は外側に移動.
 - Ringには常に新たな供給され、ring内に蓄積してゆく.
- この蓄積とringやspiralの周りで観測されるplumeとは関係があるかも.

Discussion III

Inner ring radius :: 4.25

Outer ring radius :: 7.5

Corotation radius :: 6

Outer Lindblad resonance(OLR) :: 8.7

OLRの半径内でring structureが発生している。
→ ring structureにOLRは寄与しないのでは？

Ratio of Outer Inner ring radius :: 1.76

この比率は観測とも一致する。

(Athanasoula et al.1982, Buta 1995)

Conclusion

rR_1 ring structureは

Lyapunov orbitに漸近するような

invariant manifoldsの時間進化で形成される。