

LONG TERM EVOLUTION OF CIRCUMBINARY DISK

神戸大 今枝 佑輔

イントロ：CircumBinary Disk とは？

問題設定：どのような状況を考えるのか？

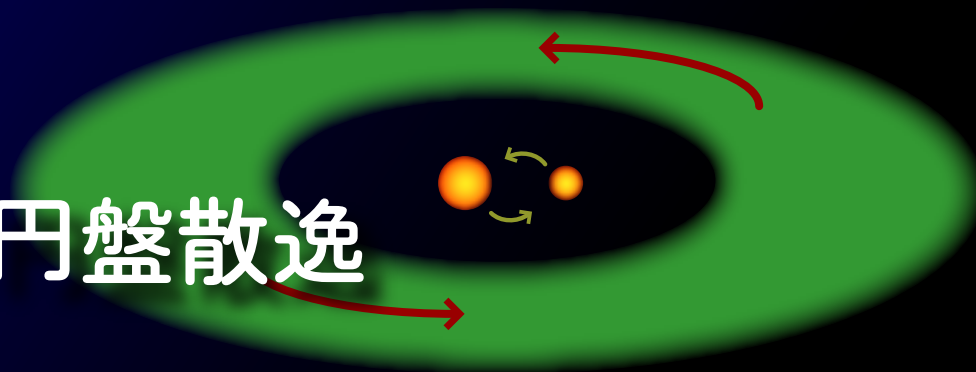
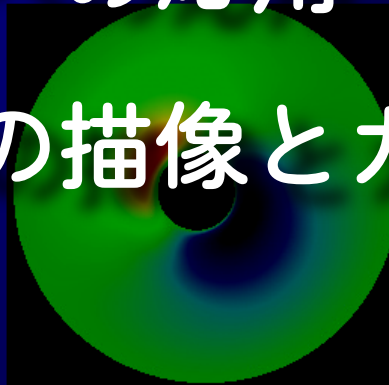
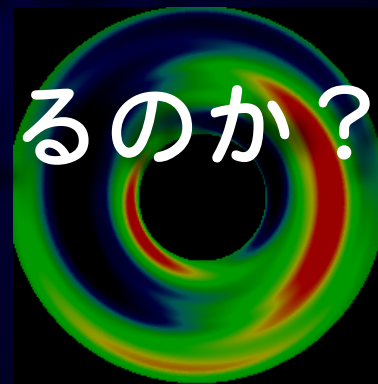
計算手法

連星周りのガス円盤の長時間進化

観測事例への応用

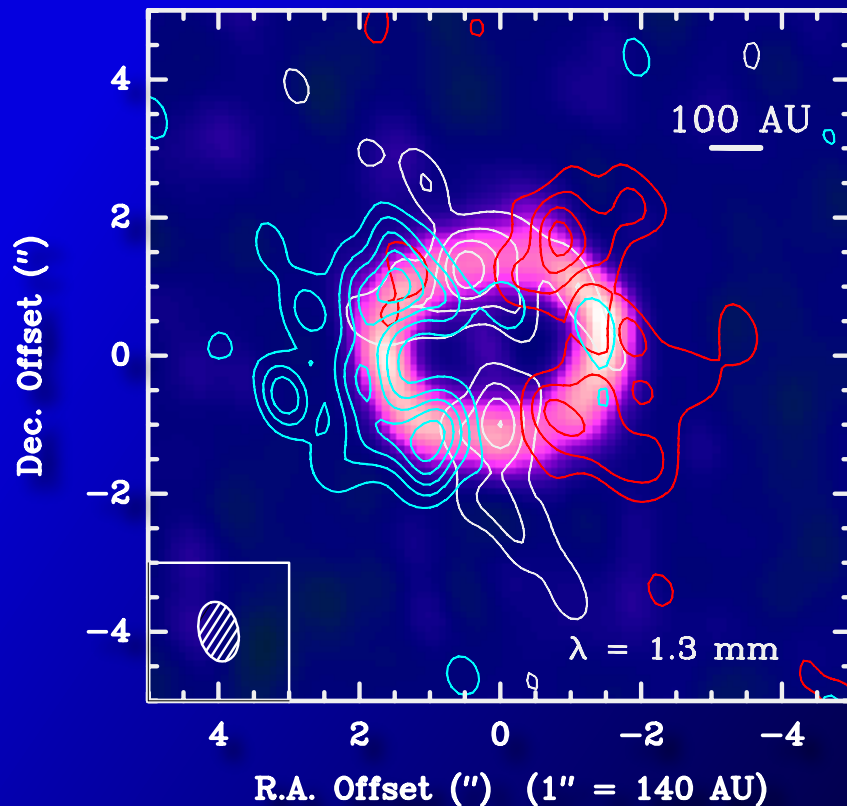
永年進化の描像とガス円盤散逸

まとめ



GG Tau Observation

GG Tau



Contour : ^{13}CO J=2-1

False color : Continuum emission at 1.4mm
(Guilloteau et al.1999)

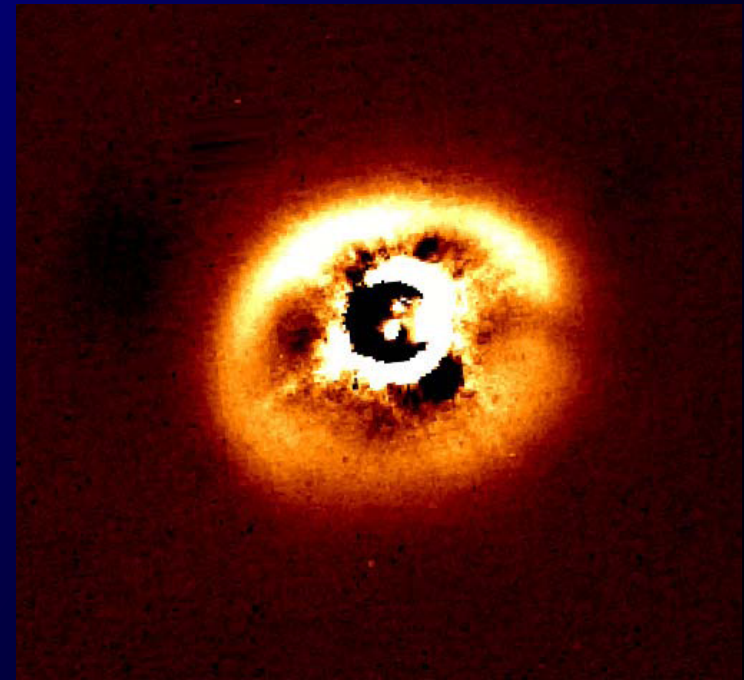


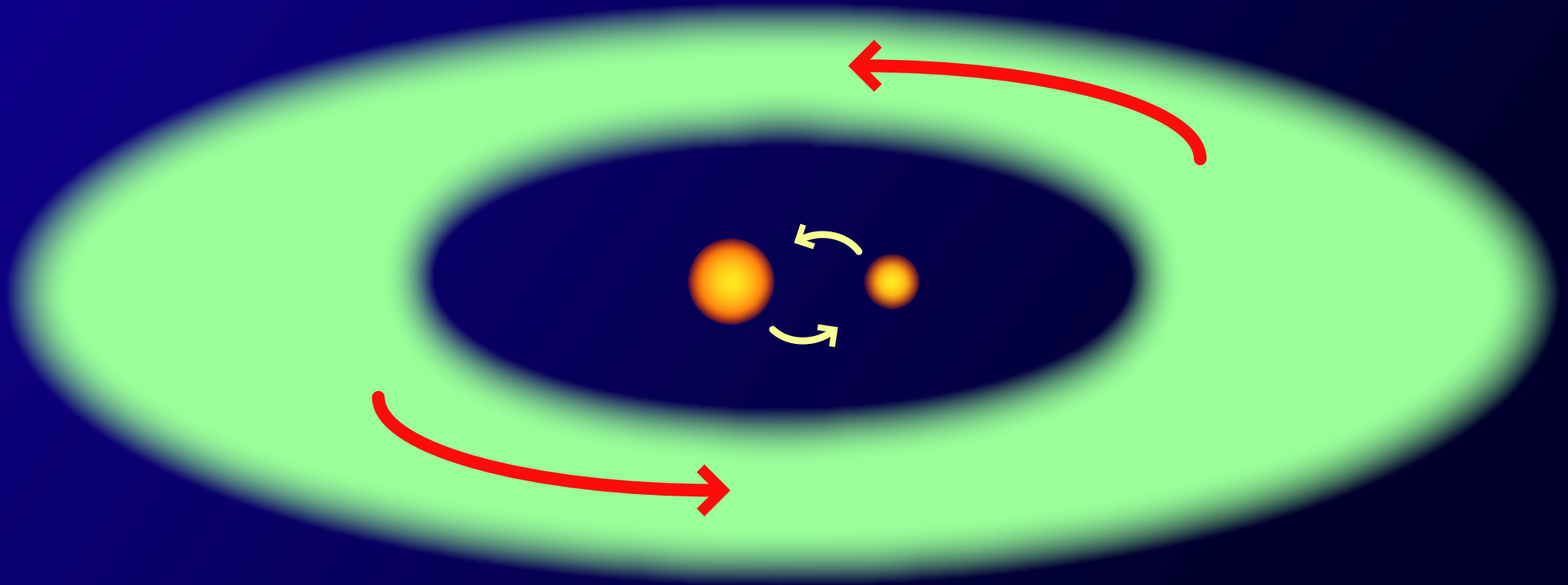
Fig. 1. H-band coronagraphic image of GG Tau. PSFs of the central binary were subtracted. The field of view is $10''.16 \times 9''.79$. North is up, east toward the left. The effective integration time of this image was 270 s.

Y. Itoh et al. 2002 PASJ

ミリ波サブミリ波の電波観測、近赤外による散乱光観測でも
Circumbinary Disk の存在が確認されている。

問題設定

実際観測されているようなガス円盤は連星と長時間にわたって重力的に相互作用している。

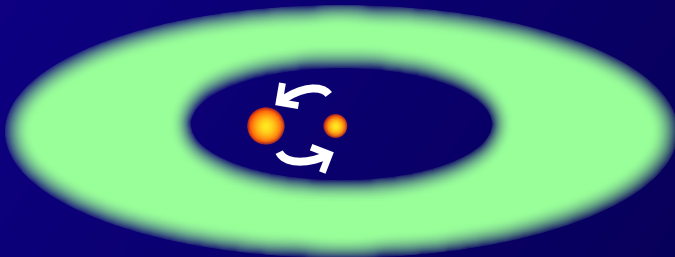


われわれが知りたいのは、長時間相互作用の後にガス円盤にどのような密度構造・速度構造が作られるのかということ。
質量比？ 連星の軌道パラメータ？ ガス円盤の物理状態？

Various timescales in the disk

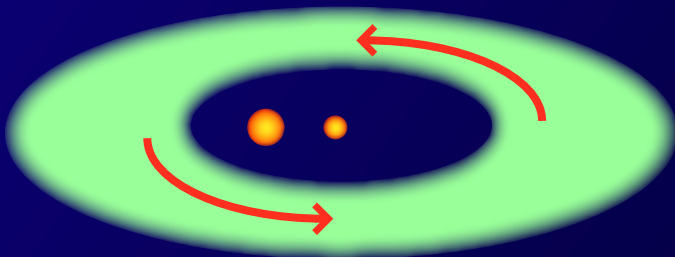
The Long-Term Evolution

Dynamical time scale of the binary



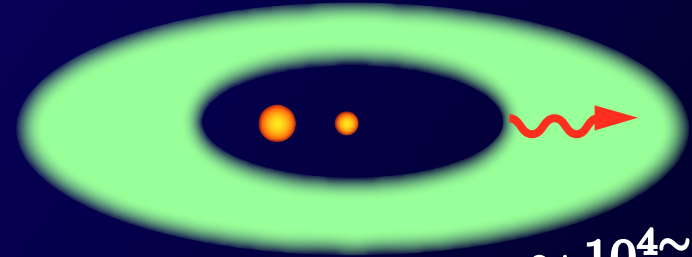
If the semimajor axis is several tens of AU
 $\sim 10^2$ year

Dynamical time scale of the gas disk



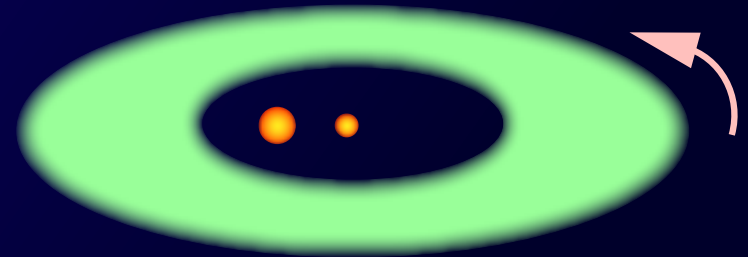
$\sim 10^3$ year

Sound crossing time scale



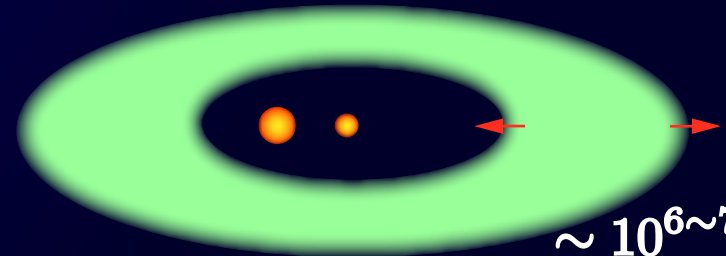
$\sim 10^{4\sim 5}$ year

Precession time scale



$\sim 10^{5\sim 6}$ year

Viscous time scale

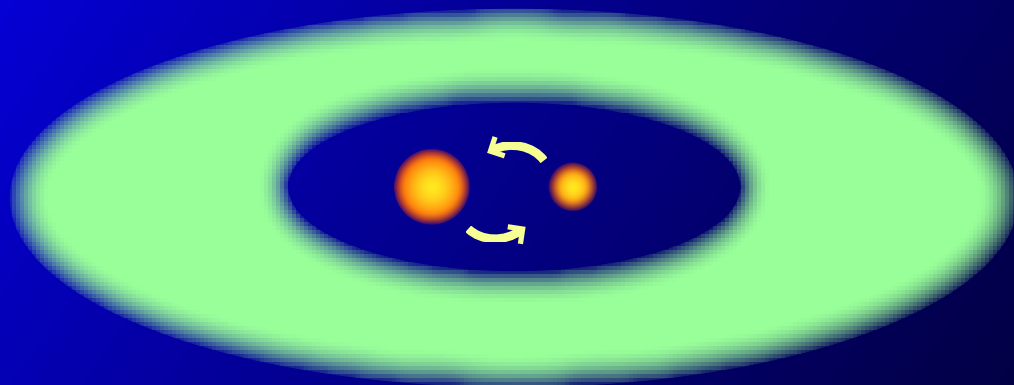


$\sim 10^{6\sim 7}$ year

計算方法（2次元）

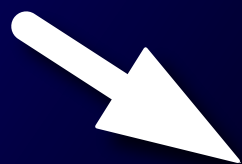
短周期成分と長周期成分を分離して短周期成分については時間平均して取り扱う

$$\frac{dx}{dt} \quad \frac{dy}{dt} \quad \frac{dv_x}{dt} \quad \frac{dv_y}{dt} \quad \longrightarrow \quad \frac{da}{dt} \quad \frac{de}{dt} \quad \frac{d\omega}{dt} \quad \frac{df}{dt}$$

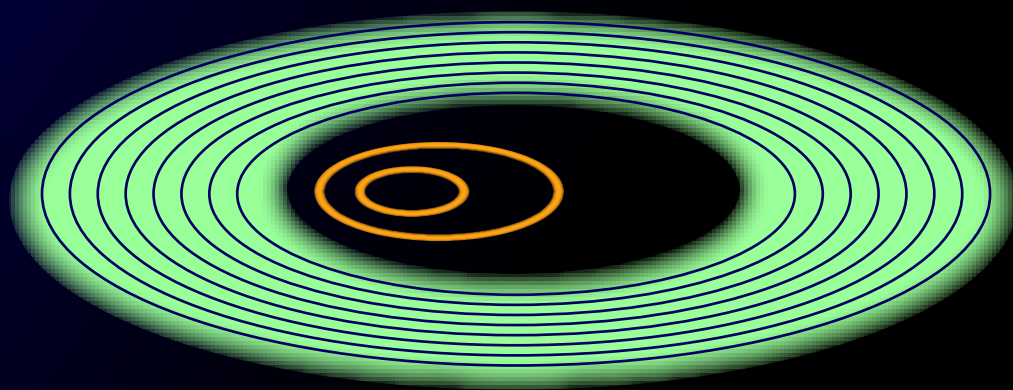


楕円軌道の軌道要素

1公転のあいだには殆ど変化の無い
物理量 a, e, ω と激しく変化する
物理量 f に分離



1周期に渡って短周期成分を時間平均する
星の重力 → リング状の質量分布からの重力
ガス圧 → 円盤内のガスリング同士の
相互作用



軌道進化の方程式の方程式は最終的には次のようにかける

$$\left\langle \frac{da}{dt} \right\rangle = 0 \quad \text{軌道長半径は変化しない}$$

$$\frac{1}{i\Omega_B} \left\langle \frac{d\psi}{dt} \right\rangle = \frac{d^2\psi}{d^2\xi} + U\psi + V \quad \text{軌道離心率と近点方向の時間進化}$$

便宜上、ここでは $\psi = e \cos \omega + i e \sin \omega$ と複素数を使って書いてある

ポテンシャル U : 軸対称摂動

強制項 V : 非軸対称摂動

考えている連星モデルと円盤モデル $\rightarrow U, V$

U から円盤内に存在しうる固有波とパターン速度

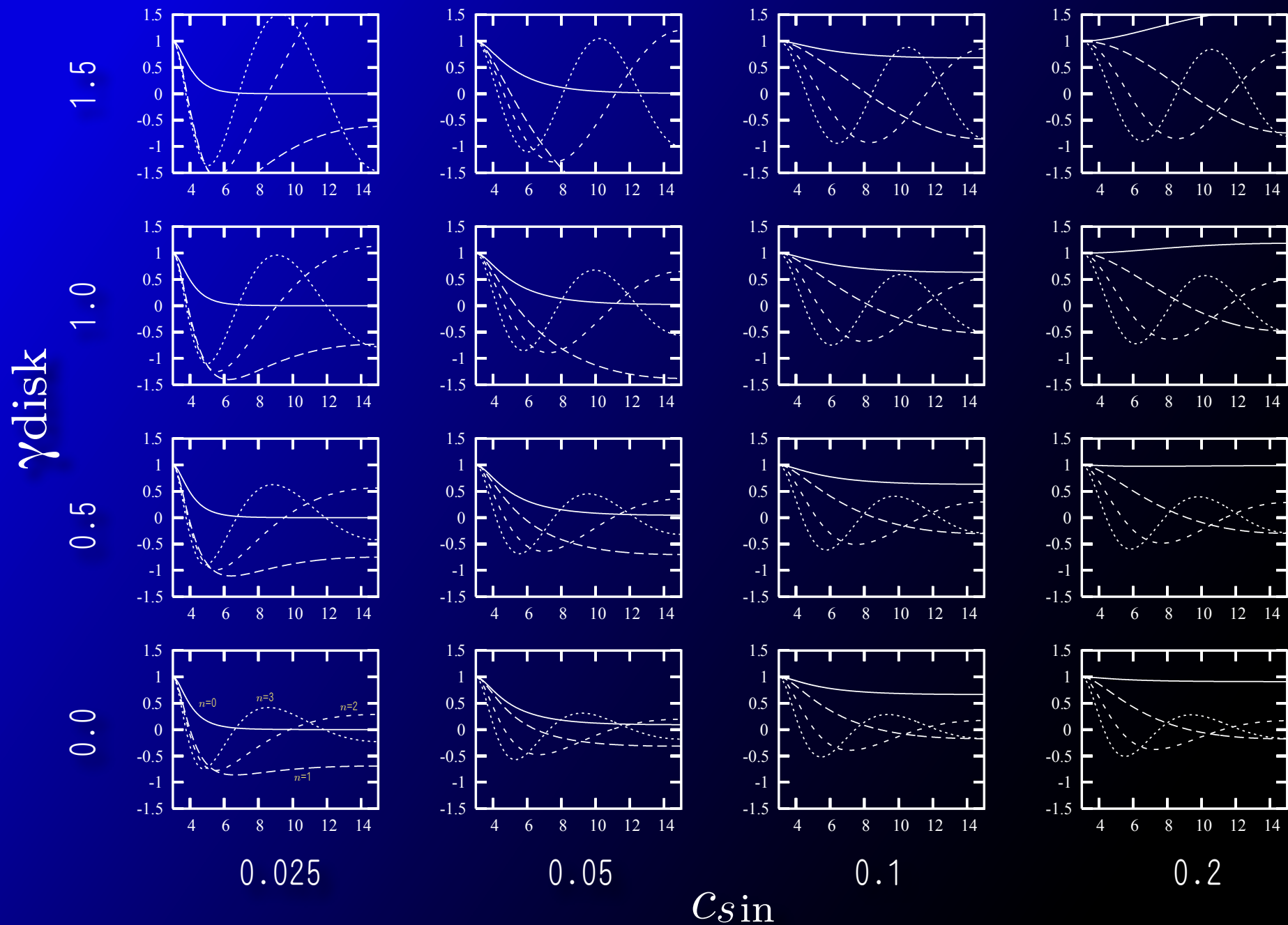
V と初期条件から各固有波の振幅

\rightarrow 円盤の長時間進化

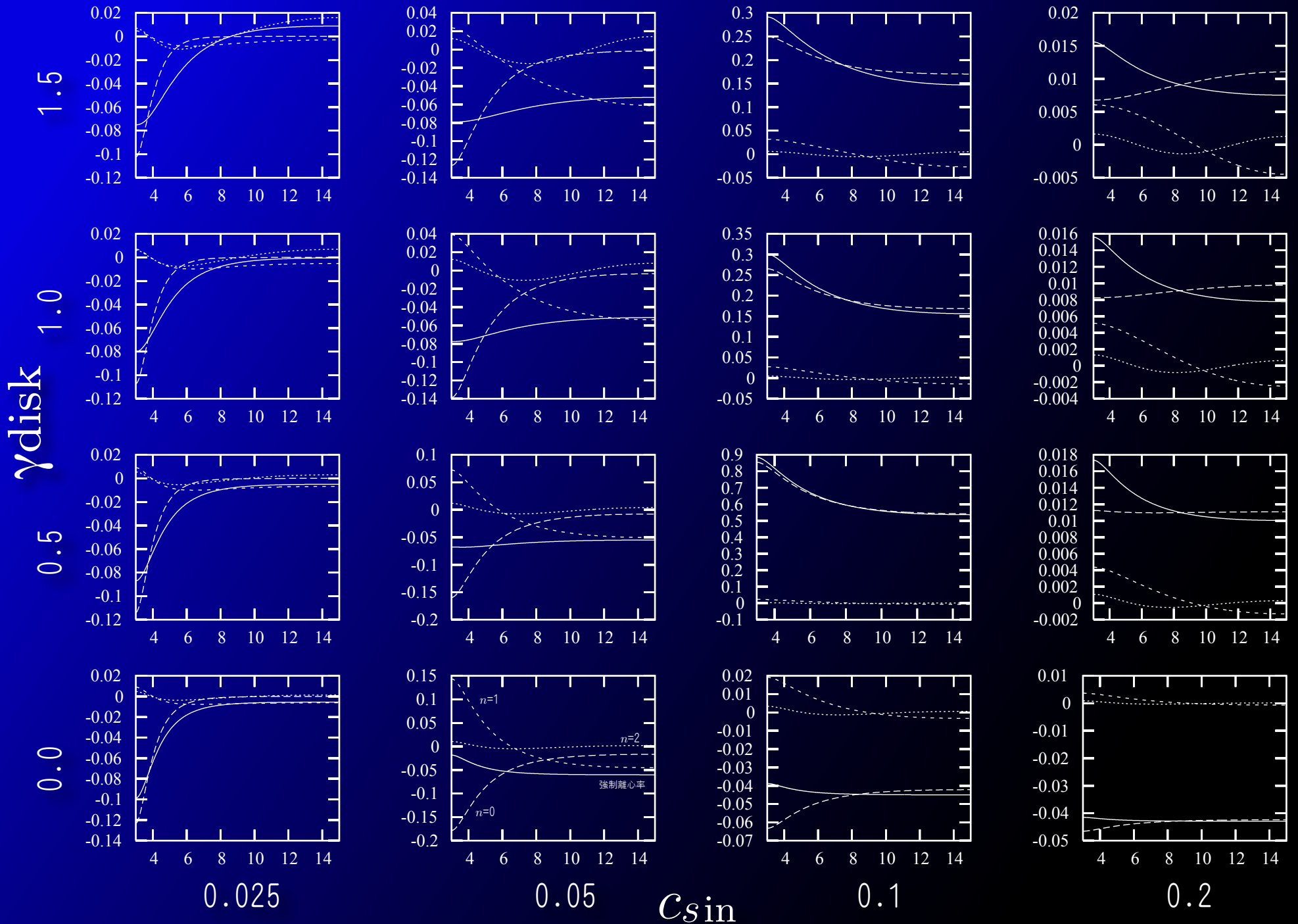
$$\begin{aligned} k &\equiv e \cos \omega \\ h &\equiv e \sin \omega \\ A &\equiv \frac{3}{4} q_1 q_2 \left(\frac{a}{a_B} \right)^{-\frac{7}{2}} \left(1 + \frac{3}{2} e_B^2 \right) \Omega_B^4 \\ B &\equiv \frac{15}{16} q_1 q_2 (q_1 - q_2) \left(\frac{a}{a_B} \right)^{-\frac{9}{2}} \left(1 + \frac{3}{4} e_B^2 \right) e_B \Omega_B^4 \\ \xi &= \int \frac{1}{aZ} da \\ \psi &= (k + ih) \exp\left(-\int X d\xi\right) \\ Z &= \frac{1}{\sqrt{2} M_L} \left(\frac{a}{a_B} \right)^{-\frac{3}{2}} \\ X &= -\frac{1}{2} \left[Z \left(3 + \gamma \frac{\partial \ln \Sigma_0}{\partial \ln a} \right) - \frac{\partial}{\partial a} (aZ) \right] \\ U &= -X^2 + aZ \frac{\partial X}{\partial a} + Z^2 \frac{\partial \ln \Sigma_0}{\partial \ln a} + \frac{A}{\Omega_B} \\ V &= \frac{B}{\Omega_B} \exp\left(-\int X d\xi\right) \end{aligned}$$

円盤内に存在する固有波

円盤の内縁と外縁の間に n 個の節を持つ



Amplitude : 固有関数の形、固有値がわかると、強制項から固有関数のamplitudeを計算できる

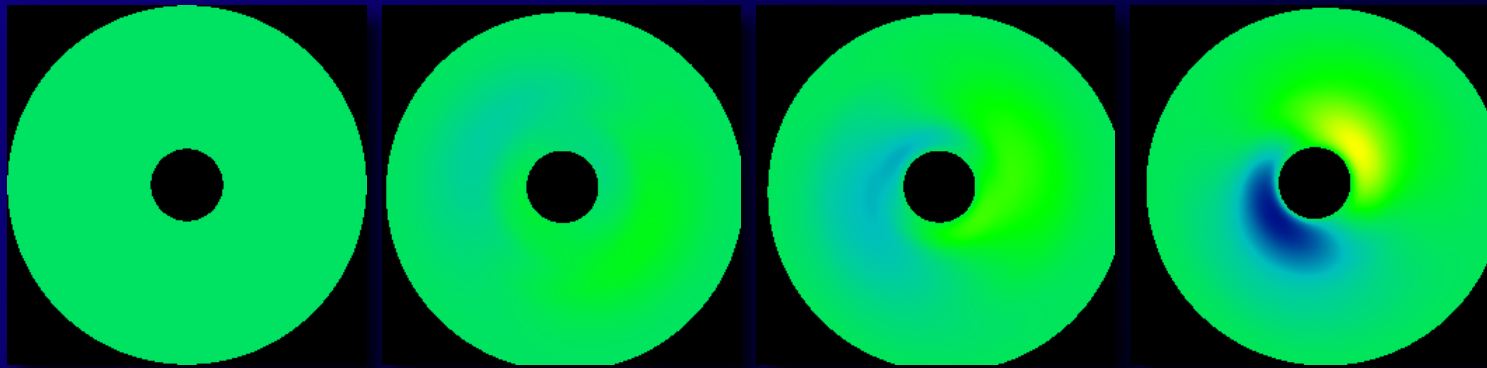


Density Evolution of a flat Circumbinary Disk

求められた軌道進化は、密度の進化として表示できる

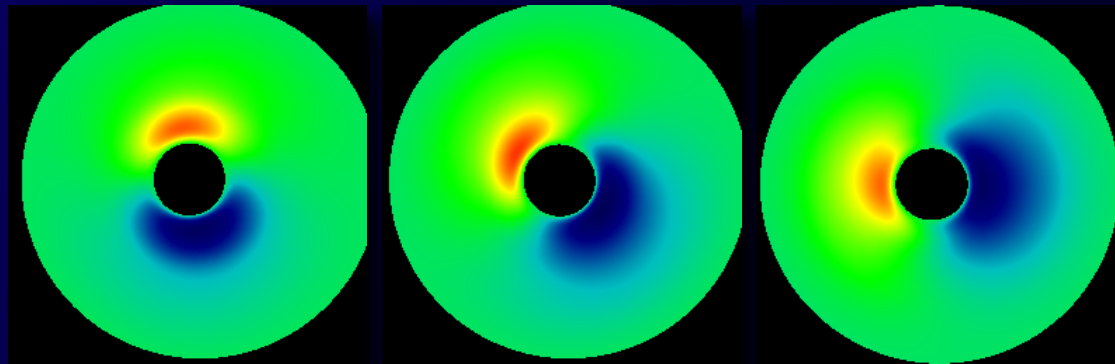
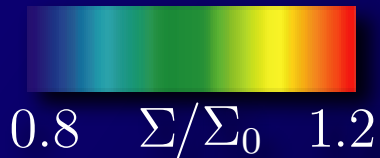
$$M_1 : M_2 = 0.8 : 0.2 \quad e_B = 0.3 \quad \gamma_{\text{disk}} = 0.0 \quad \gamma = 5/3$$

$$a_{\text{in}} = 3.0 \quad a_{\text{out}} = 15.0 \quad c_{\text{S}_{\text{in}}} = 0.07$$



t = 0 rot

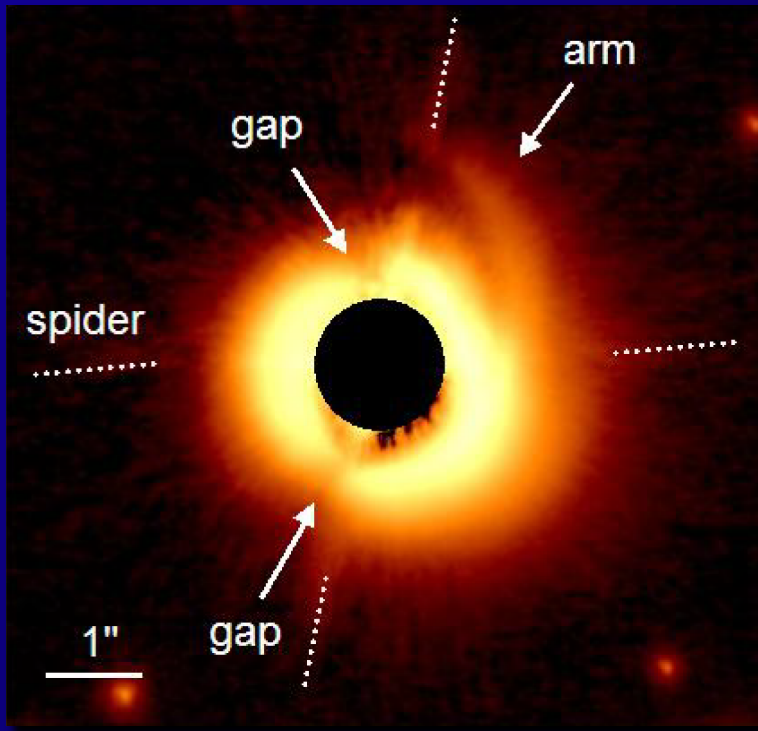
t = 1900 rot



t = 38000 rot

離心率を持った連星の影響で、ガス円盤中に非常にゆっくりと回転する $m=1$ の密度パターンが存在する。

観測結果への応用



CIAO のKバンドの観測で
HD14252の周りに左図の
ような構造が見えた

Fukagawa et al. 2006

2重バナナ構造

※近赤画像なので色の濃淡が
直接密度の濃淡をあらわ
すわけではない(散乱光)

しかし二重バナナ構造を作り出す
ためのに、何らかの密度構造が
存在していると考えてよいだろう

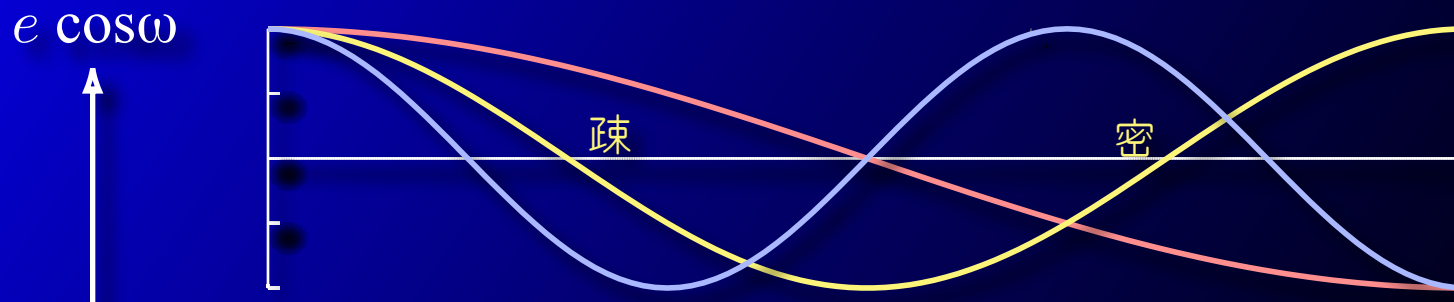
これを連星周りのガス円盤の永年進化で説明できるだろうか？

どのようにしたら2本バナナ構造が現われるか？

※ 密度構造は軌道離心率の勾配によって作られる！

$$\Sigma(a, f) = \frac{\Sigma_0(a)}{\sqrt{1-e^2}} \left[1 - \frac{2e + (1+e^2)\cos f}{(1-e^2)^2} r e' - \frac{e \sin f}{1-e^2} r \omega' \right]^{-1}$$

※ 固有関数の形は基本的に内縁と外縁の間に n 個の節を持つ波の形をしている。

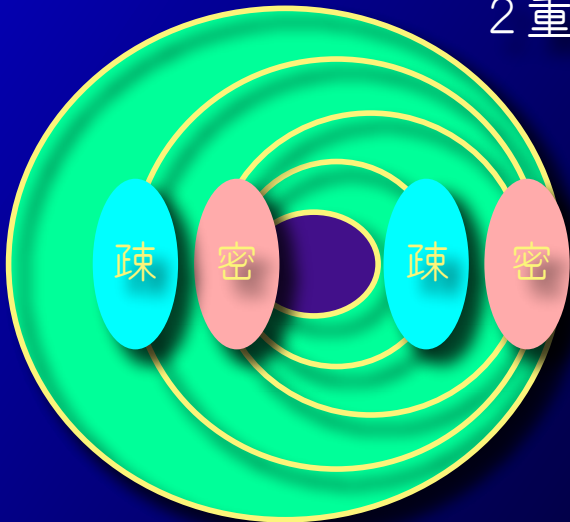


2重バナナ構造を作りたいかったら $n=2$ のモードを励起してやればよい。

$n=2$ のモードの固有値が0に近ければよい

(0で外力のパターンと共鳴し振幅大)

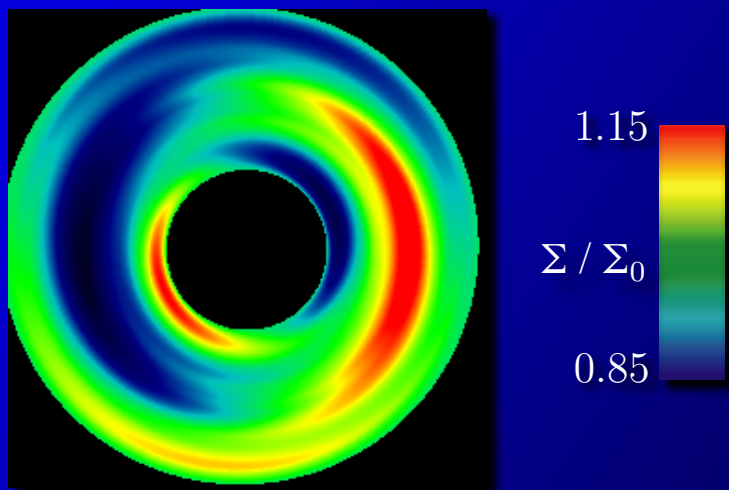
いろいろとパラメタサーチしてみる



$$M_1 : M_2 = 0.65:0.35 \quad e_B = 0.3$$

$$a_{\text{in}} = 2.5 \quad a_{\text{out}} = 7.5 \quad c_{s \text{ in}} = 0.025$$

適当な円盤モデル、連星モデルを考えると密度に二重バナナ構造を作ることができた。

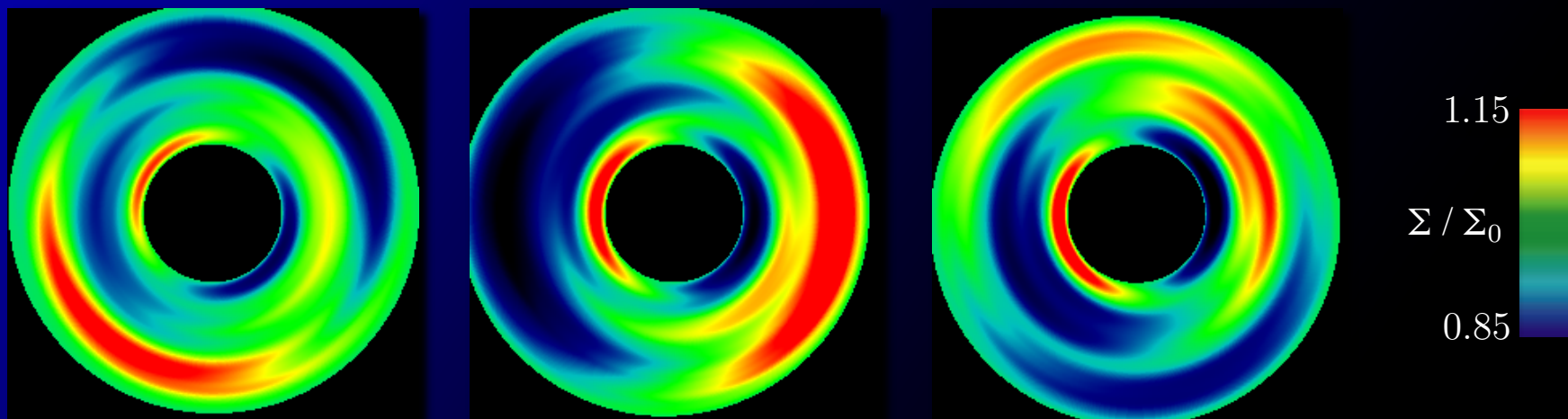


問題点：音速がかなり低くないと二重バナナ構造が現れない。
 ガス円盤の典型的 $c_s/v_K = 0.05 \sim 0.1$ に対して、二重バナナ構造が作られるのは $c_s/v_K = 0.02 \sim 0.03$

$$M_1 : M_2 = 0.65:0.35 \quad e_B = 0.3$$

$$a_{\text{in}} = 2.0 \quad a_{\text{out}} = 6.0 \quad c_{s \text{ in}} = 0.03$$

二重バナナ構造は $n=2$ が単独で励起されて作られるというよりは、 $n=1$ のモードで励起された1本と、 $n=2$ で励起された内側の1本とが組み合わさって作られる。そのため、常に向かい合った二重バナナ構造になるわけではなかった。



永年進化の描像とガス円盤散逸

ここで示されたこと

ガス円盤は連星からの永年摂動を受けて楕円軌道化する

どのくらい楕円軌道化するか？

円盤内に存在する固有波のパターン速度が、

連星軌道の歳差運動とどの程度一致するかによる

一致すると、大きく楕円化 (~ 1)

共鳴が起これば、連星軌道自体の軌道離心率は小さくても OK

ガス円盤の散逸 (ガス降着)

inner hole (ギャップ領域) が形成されるとガス降着量は極端に減ってしまう

ガス円盤全体を消失させるにはガス円盤の粘性進化のタイムスケール ($\sim 10^7$ 年) が必要

永年進化を考えると？

ガス円盤の構造自体は粘性進化のタイムスケールで変化

ある時点で共鳴条件を満たすような円盤構造に達する

歳差運動のタイムスケールで円盤が楕円軌道化 ($\sim 10^5 \sim 10^6$ 年)

→動的な質量降着が復活し一気にガス円盤消失→ガス円盤保持期間の多様性？

まとめ

離心率を持った連星の影響で、ガス円盤中に非常にゆっくりと回転する $m=1$ の密度パターンが存在する。

適当な円盤モデル、連星モデルを考えることで
ガス円盤中に二重バナナ構造を作ることができる

二重バナナ構造を作るパラメタ範囲は、連星周りの典型的な
ガス円盤のパラメタに比べて、例えば音速にして
factor 2~4 程度低い場合に作られやすかった。

2つの波のモードの寄与によって二重バナナ構造が作られるため
常に向かい合ったバナナ構造ができるわけではなかった。

ガス円盤の永年進化をガス円盤の粘性進化と
同時に考えると、ガス円盤が連星の歳差運動との
共鳴条件を満たすまで粘性進化した後、
円盤構造を一気に楕円円盤へと変化させ
一気にガス降着が行われるという円盤散逸の
シナリオを考えることができる

