粘性降着円盤モデルの
円盤外側領域における流体不安定性

発表者: 小野 智弘

(京都大学 宇宙物理教室 D1)

共同研究者: 野村 英子, 竹内 拓 (東京工業大学)

武藤 恭之 (工学院大学)

どの降着円盤に注目するの？

我々が興味が有るのは惑星形成

➡ 原始惑星系円盤の構造が知りたい

ということで

原始惑星系円盤を対象として議論していく

しかし、本研究の話は

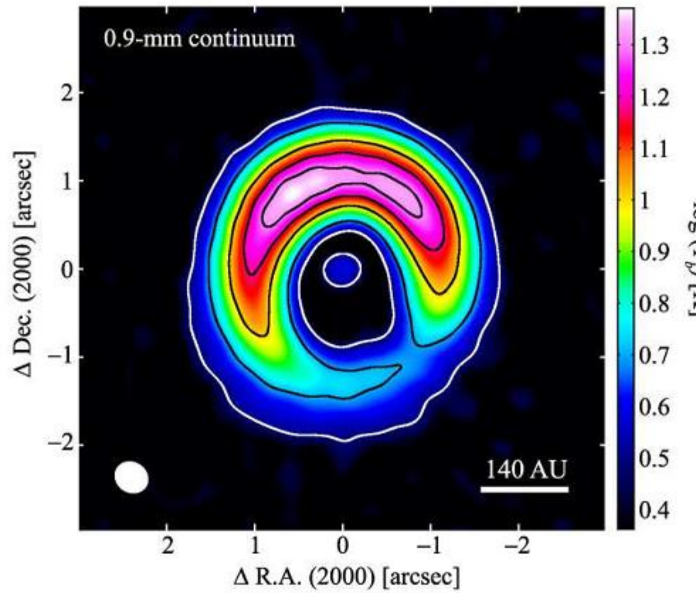
- 降着円盤中の気体成分に着目している
- 圧力勾配力が中心星重力に比べ無視できない場所

ならば適用できる

他の降着円盤でも適用できる or もう知られてる？

原始惑星系円盤外側領域

本研究で着目するのは
円盤外側領域(数10 AU～数100 AU)のガス



Fukagawa et al. 2013

円盤外側領域

- 電波波長で観測可能
- 内側領域に比べ観測が容易

とは言っても・・・

観測だけから得られる円盤の性質は不十分

➡ モデルを利用
(Lynden-Bell & Pringle 1974: LP74 の解析解)

LP74の降着円盤モデル

仮定

いくらか仮定があるが、本研究で重要なものは以下の3点

- 乱流粘性により粘性進化する円盤 (α粘性)
- 常に 圧力勾配力 ≪ 中心星重力 とする

  ➡ 回転則はどの半径でもKepler回転
- 幾何学的に薄い円盤

ガス面密度進化の式

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{3}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r^{1/2}\frac{\partial}{\partial r}(r^{1/2}\nu\Sigma)\right]$$

(Lynden-Bell & Pringle 1974)

Σ: ガス面密度、 r: 中心星からの半径、
t: 時間、 ν: 動粘性係数

➡ 動粘性νが半径rの冪の形で表せるなら
ガス面密度進化の式は解析解が存在する

LBP74の解析解

面密度進化の式は $$\frac{\partial\Sigma}{\partial t} = \frac{3}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r^{1/2}\frac{\partial}{\partial r}(r^{1/2}\nu\Sigma)\right]$$

温度Tがrの冪で書ける時($T \propto r^{-\beta}$)、解析解が存在

解析解

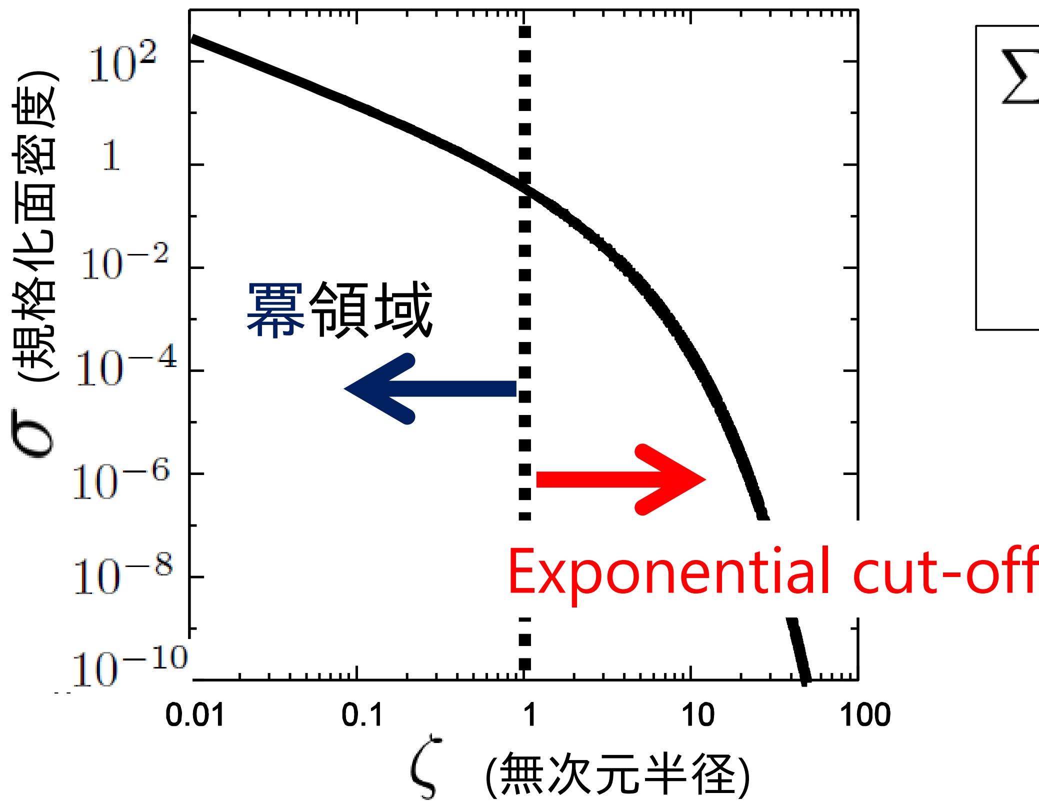
- 面密度: $\Sigma = \frac{C}{3\pi\nu_1}\tau_0^{-2(1+\beta)/(1+2\beta)}\zeta^{(\beta-\frac{3}{2})}\exp\left[-\zeta^{(\beta+1/2)}\right]$
- 無次元半径: $\zeta \equiv \frac{r}{r_0}$ 、　典型的な円盤半径: $r_0(t)$
- タイムスケール: $\tau_0(t)$ 、　ある半径 r_1 での動粘性: ν_1
- 定数: C

LBP74の解析解の性質

LBP74の厳密解は時間 t と無次元半径 ζ を変数分離できる

$$\Sigma(t,\zeta) = \Sigma_0(t)\sigma(\zeta)$$

➡ $\sigma(\zeta)$ は時間に依存しないことから、
LBP74の解析解は**相似形で進化していく**



$\Sigma_0(t)$ は時間と共に減少

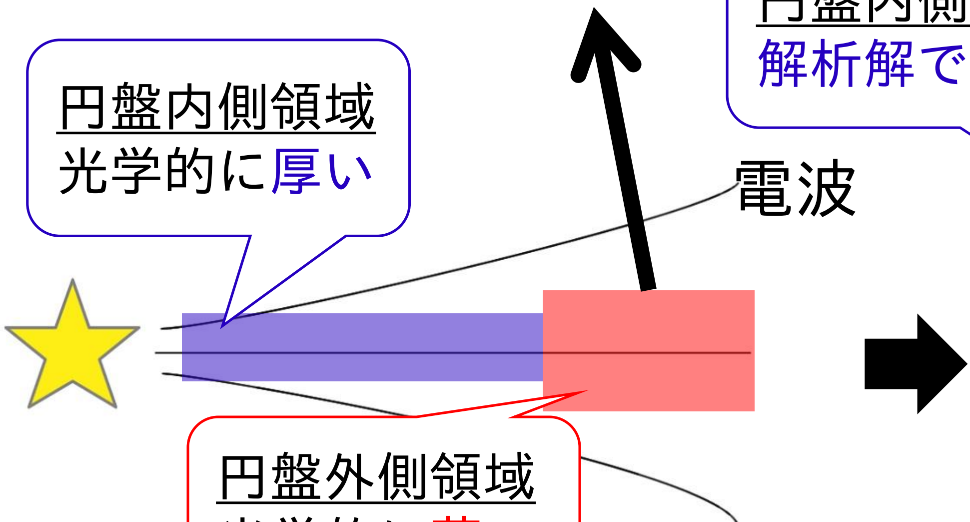
r_0 は時間と共に増加
$r_0 \sim$ 数 10-数 100 AU

無次元半径: $\zeta \equiv \frac{r}{r_0}$
典型的な
円盤半径: $r_0(t)$

解析解の利用例(Andrews+ 2010)

ガス面密度分布、円盤質量の推定

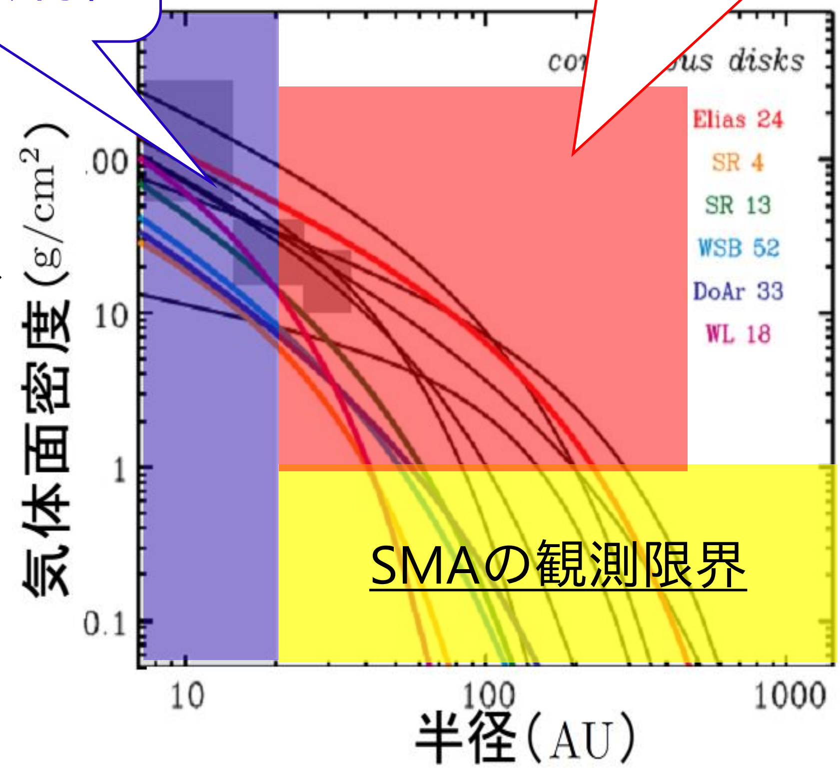
円盤内側領域
光学的に厚い



円盤外側領域
光学的に薄い

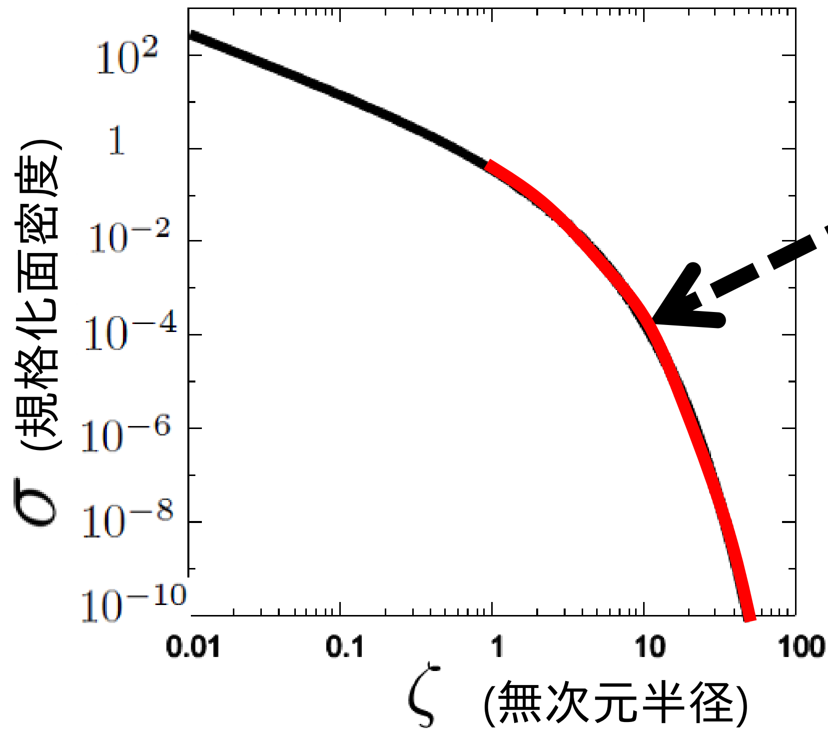
円盤内側領域
解析解で外挿

円盤外側領域
観測結果を
解析解でフィッティング



SMA(Submillimeter Array)観測
(Andrews+ 2010)

解析解内の圧力勾配力



外側領域は
- 面密度勾配　大
  → 圧力勾配力　大
- 中心星重力　小

⇩

圧力勾配力～中心星重力

⇩

回転速度がケプラー回転から大きく逸脱

⇩

解析解外側は流体不安定性に対して不安定になる可能性

流体不安定性

圧力勾配力が強くなる場所で起こる流体不安定性として考えられるのは以下の2種類

今回紹介
(Ono et al. 2014)

① 回転不安定性

✓Local、軸対称な流体不安定性

✓barotoropicである時を考えると、
不安定条件はRayleigh 条件

$\partial J/\partial r < 0$ ：不安定
$\partial J/\partial r = 0$ ：中立安定
$\partial J/\partial r > 0$ ：安定

(Jは比角運動量)

現在研究中

② Papaloizou-Pringle不安定性(のようなもの)

✓Global、非軸対称な流体不安定性

✓圧力勾配によってポテンシャル壁が形成され、
音波を捕獲・増幅

手法

解析解の回転不安定性について以下のように調べる

- 面密度分布は解析解
- 温度分布は冪を仮定($T \propto \zeta^{-\beta}$)
- 局所等温を仮定

➡ 無次元化した動径方向の力の釣り合いの式

$$j^2 = \zeta + \left(\frac{H_0}{r_0}\right)^2 \zeta^{(2-\beta)} \left[\frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \zeta} - \beta\right]$$

から比角運動量分布を得る

j : 規格化した比角運動量

H_0/r_0 : $r = r_0$ における円盤のアスペクト比

➡ Rayleigh条件より解析解の回転不安定性を調べる

注目する量

本研究において

$r = r_0$でのアスペクト比 H_0/r_0 に注目する

H_0/r_0は円盤の温度と中心星質量に依存しており,

H_0/r_0が大　→　円盤が高温、　中心星質量　小

H_0/r_0が小　→　円盤が低温、　中心星質量　大

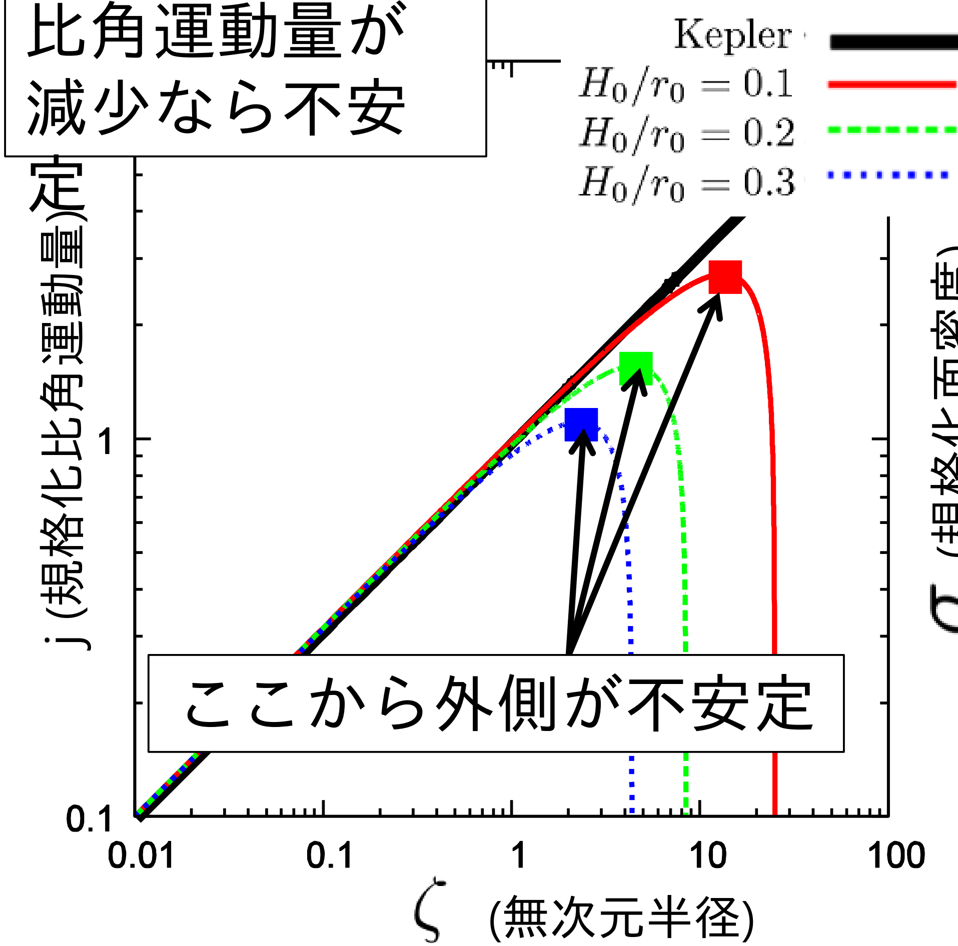
H_0/r_0が=0.1, 0.2, 0.3を考える

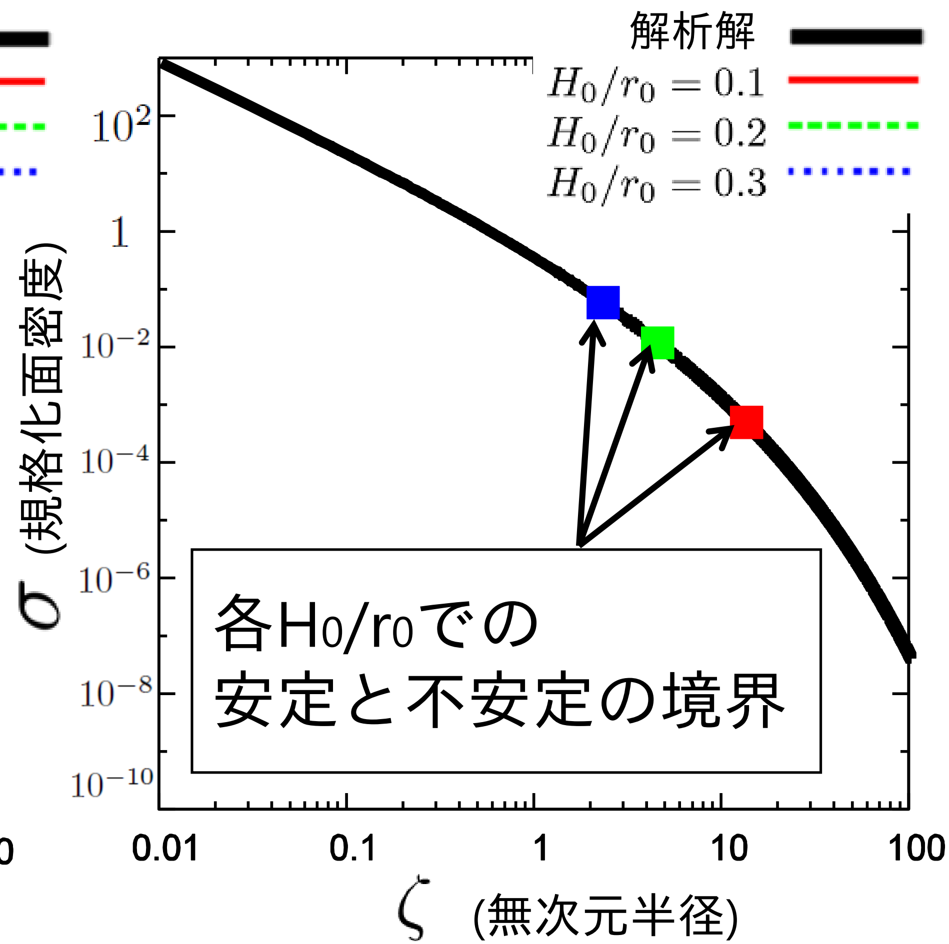
Tタウリ型星を考えると

- Tタウリ型円盤: H_0/r_0～0.1-0.2
- 近傍に大質量星がある時: H_0/r_0～0.3

結果(β=0)

比角運動量が
減少なら不安定





- 解析解は外側領域で回転不安定性に関して不安定
- H_0/r_0が大きいほど中心星に近い所で不安定になる

不安定になったらどうなるの？

回転不安定になると

動径方向の摂動に関する復元力がなくなり

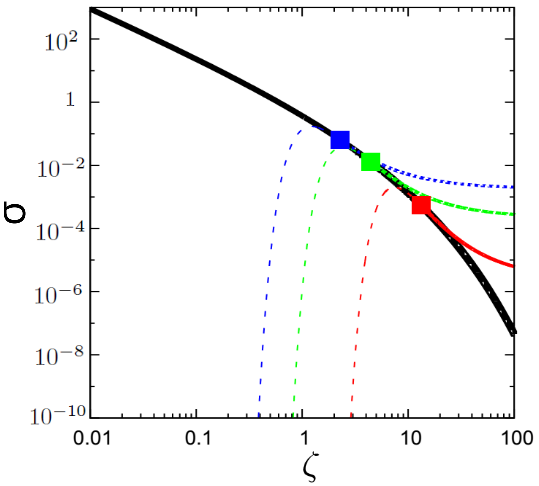
ガス粒子は動径方向に自由に動けるようになる

ガス粒子の運動は回転のタイムスケールで起こる

回転のタイムスケール≪円盤粘性進化のタイムスケール

➡ 円盤進化のタイムスケールで見ると
ガス粒子は十分に動き尽くしている

➡



回転不安定の領域では
中立安定状態に近づく
Exponential cut-off の傾きが
緩やかになる

PP不安定性に関する研究をちょっとだけ①

解析解のPP不安定性に対する線形安定性解析を行っている

基礎方程式

EOC: $$\frac{D\tilde{\Sigma}}{Dt} + \tilde{\Sigma}\nabla\cdot\tilde{\boldsymbol{v}} = 0\,,$$

EOM: $$\frac{D\tilde{\boldsymbol{v}}}{Dt} = -\frac{1}{\tilde{\Sigma}}\nabla\tilde{P} - \nabla\Phi\,,$$

EOE: $$\frac{D}{Dt}\left(\frac{\tilde{P}}{\tilde{\Sigma}^{\Gamma}}\right) = 0\,,$$

摂動

物理量 $A \to A_0 + \delta A$

$$\delta A \propto f(r)\exp[i(m\varphi - \omega t)]$$

非摂動状態は定常・軸対称を仮定

r方向はnormal mode 展開しない

エンタルピー $\Psi \equiv \delta P/\Sigma$ の2階微分方程式が得られる

エンタルピーのr微分を ′ で表すと

摂動方程式 $\Psi'' + B(r,\omega)\Psi' + C(r,\omega)\Psi = 0$

が得られる

B(r, ω), C(r, ω)はωに関して非線形な関数、

ω, Ψは複素数

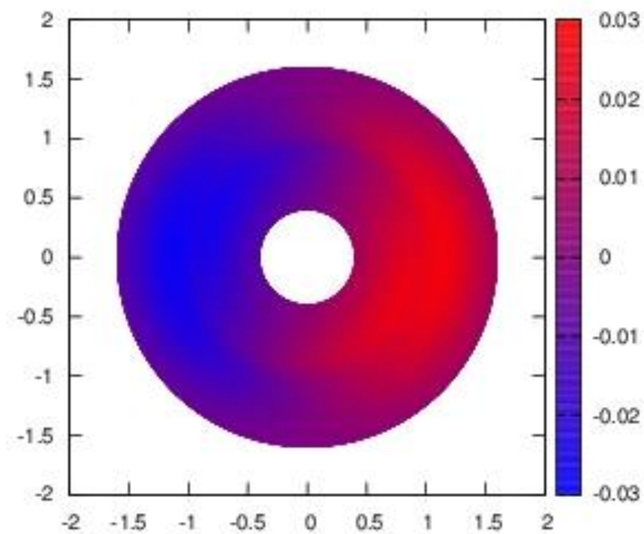
これを解くことで解析解のPP不安定性を調べる

PP不安定性に関する研究をちょっとだけ②

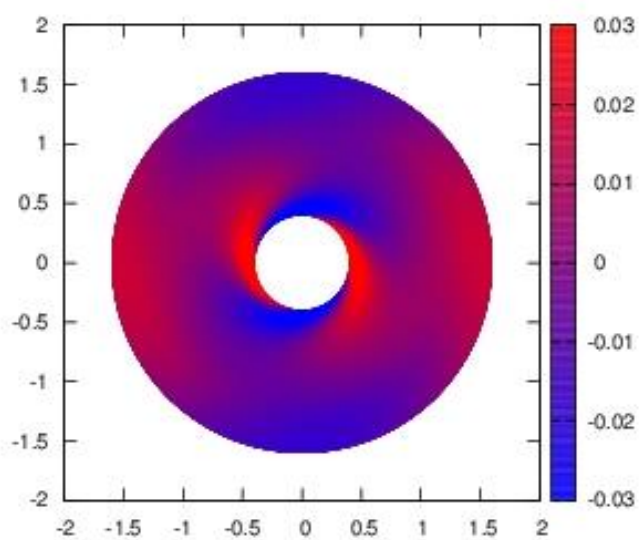
Preliminary な結果ではあるが、

✓ m=1 のモード

起こりやすい



回転不安定性に対して
不安定でない分布でもm=1の
PP不安定性に対して不安定？



✓ m=2以上のモード

起こりにくい

localな不安定より
起こりにくい(?)

まとめ

- Lynden-Bell & Pringle (1974)の解析解は
  円盤外側領域にExponential cut-offを持ち、
  そこで流体不安定になると考えられる
- 解析解は円盤外側領域で、
  回転不安定性(local、軸対称)に対して不安定
- 円盤のアスペクト比が大きいほど、
  不安定になり始める点は内側になる
- 回転不安定の結果
  相似解のExponential cut-offは緩やかになると考えられる
- Preliminary な結果ではあるが、
  m=1モードのPapaloizou-Pringle 不安定性は
  回転不安定性より不安定になりやすい(要検証)