

原始惑星系円盤の 自己重力的分裂の条件

高橋実道（京都大学）

塚本裕介、犬塚修一郎（名古屋大学）

円盤の分裂による天体形成

- 系外惑星の直接撮像
中心星からはなれた位置に
巨大惑星 ($M \sim 10M_J, >20\text{AU}$)

標準モデルで説明困難

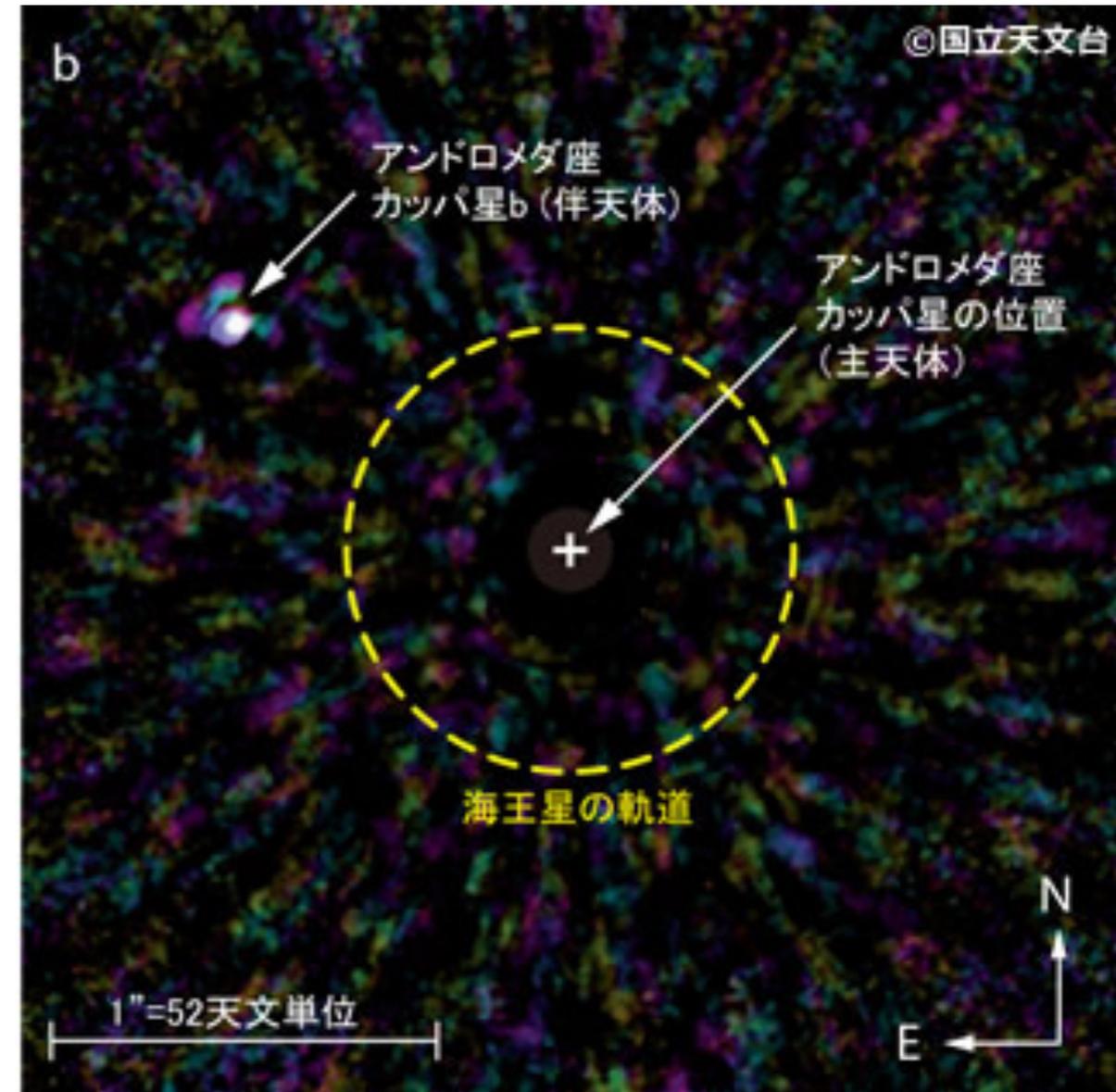
- 原始惑星系円盤形成の数値計算
初期に重い円盤が形成

原始惑星系円盤の重力不安定性による分裂

➡ 巨大惑星形成？

連星系、褐色矮星形成にも関連。

原始惑星系円盤が分裂する条件は？



(Carson et. al. 2013)

円盤の自己重力不安定性

自己重力不安定性

Toomre's Q parameter

$$Q \equiv \frac{c_s \Omega_{\text{epi}}}{\pi G \Sigma}$$

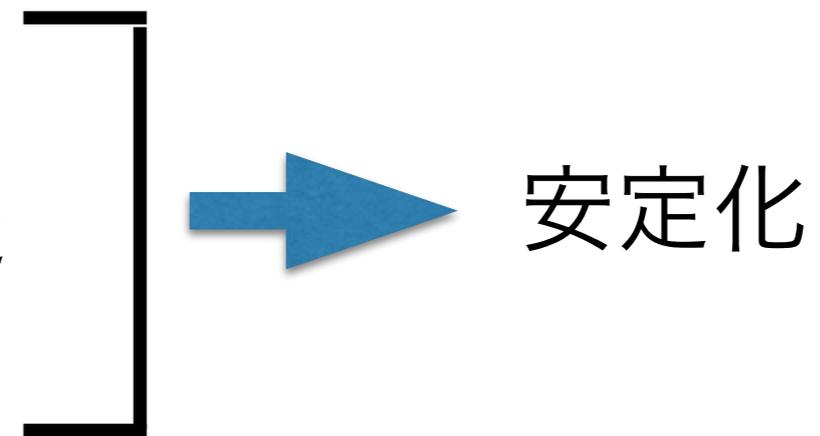
c_s : 音速
 Ω_{epi} : エピサイクル振動数
 Σ : 面密度

$Q < 1 \Rightarrow$ 不安定 (local instability, Toomre 1969)

$1 \lesssim Q \lesssim 2 \Rightarrow$ **渦状腕** が形成

(global instability Takahara 1976, 1978, Iye 1978)

- Shock 加熱
- 重力トルクによる角運動量輸送
 \Rightarrow ガス降着



渦状腕による安定化に打ち勝ち分裂する条件は？

円盤の分裂条件

先行研究:冷却率に注目

(Gammie 2001, Rice et al. 2005, 2014, Meru and Bate 2012 等)

Cooling time \propto Kepler time として冷却過程をモデル化

$$t_{\text{cool}} = \beta \Omega^{-1}, \quad \frac{dE}{dt} = -\frac{E}{t_{\text{cool}}}$$

数値計算



分裂するための**冷却率**の条件

$$\beta < \beta_{\text{crit}} \sim 30 \text{ で分裂 (Meru and Bate 2012)}$$

他の数値計算の結果と矛盾

例) Tsukamoto et al. 2015 : $\beta < \beta_{\text{crit}}$ ・ 分裂しない

Machida et al. 2010 : 断熱 ・ 分裂する

冷却率に対する分裂条件では不十分
現実的な円盤分裂の条件を明らかにするために
数値計算を行い、分裂過程を解析

Setup (FARGO)

基礎方程式

連続の式 $\frac{\partial \Sigma}{\partial t} + \nabla \cdot (\Sigma v) = 0$

運動方程式 $\Sigma \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) = -\nabla P - \Sigma \nabla \Phi$

状態方程式 $P = (\gamma - 1)E$

エネルギー方程式 $\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot (Ev) = -P \nabla \cdot v - \frac{8}{3} \sigma (T^4 - T_{\text{ext}}^4) \frac{\tau}{\frac{1}{4}\tau^2 + \frac{1}{\sqrt{3}}\tau + \frac{2}{3}}$

放射冷却・外部加熱
(Hubeny 1990)

Optical depth $\tau = \kappa_{\text{R}} \Sigma$
 $\kappa_{\text{R}} = \kappa_{10} \left(\frac{T}{10[\text{K}]} \right)^2 [\text{cm}^2 \text{g}^{-1}]$
 $\kappa_{10} = 0.05$
(Semenov et al. 2003)

Open boundary

$$r = 20, 1000 \text{AU}$$

$$M_* = 0.5 M_{\odot}$$

$$M_{\text{disk}} = 0.34 M_{\odot}, 0.38 M_{\odot}$$

$$T_{\text{ext}} = 150[\text{K}] \left(\frac{r}{1[\text{AU}]} \right)^{-3/7}$$

(Chiang and Goldreich 1997)
 $\gamma = 5/3$

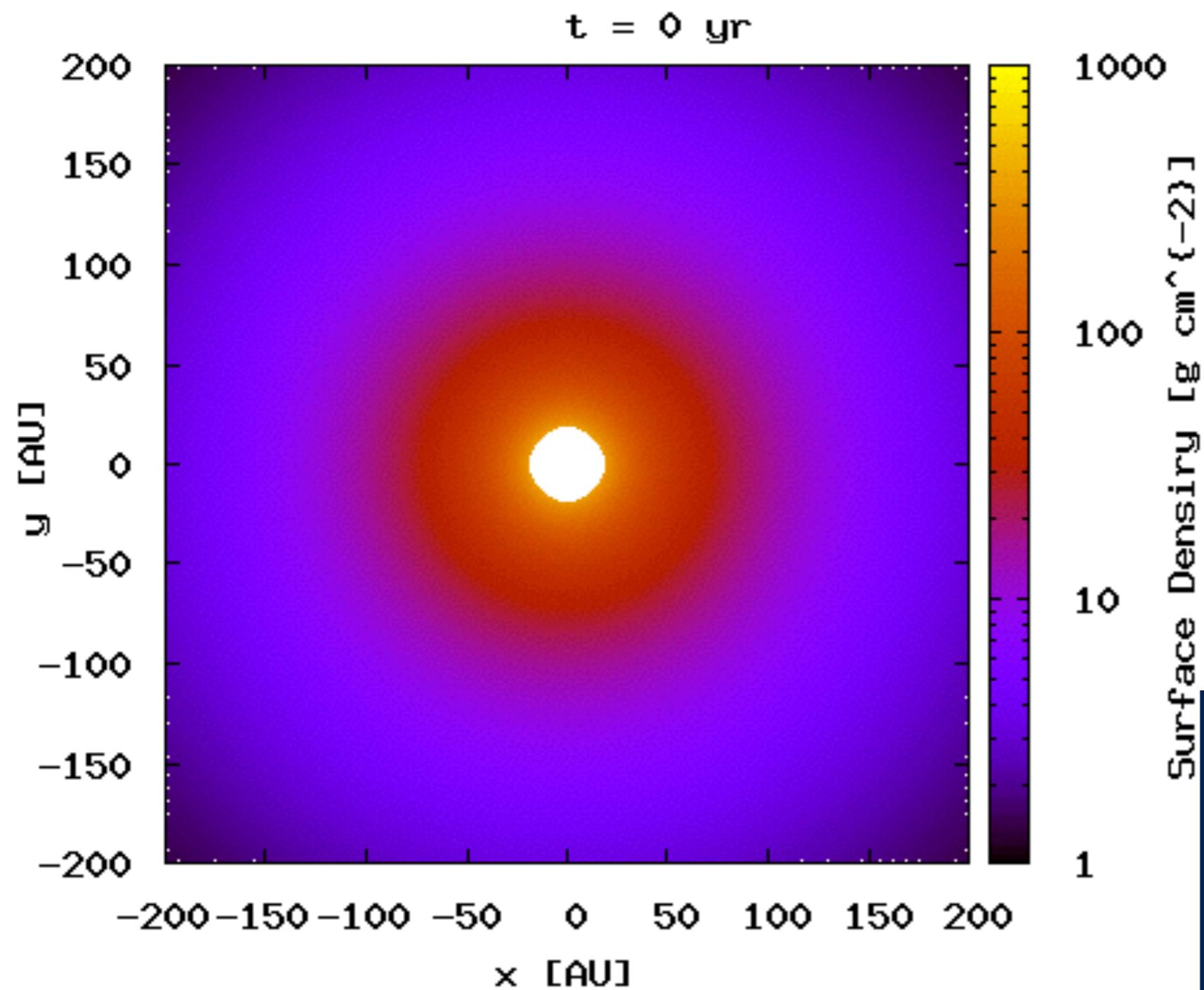
初期条件

$$\Sigma \propto r^{-12/7} \exp \left(-\frac{r}{r_{\text{disk}}} \right)$$

$$r_{\text{disk}} = 250[\text{AU}]$$

$$Q \sim 2 \quad (Q \equiv c_s \Omega / (\pi G \Sigma))$$

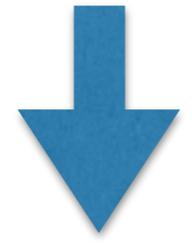
結果：分裂しない場合



$$M_{\text{disk}} = 0.34 M_{\odot}$$

大局的不安定による

渦状腕形成



分裂せずに
準定常な構造

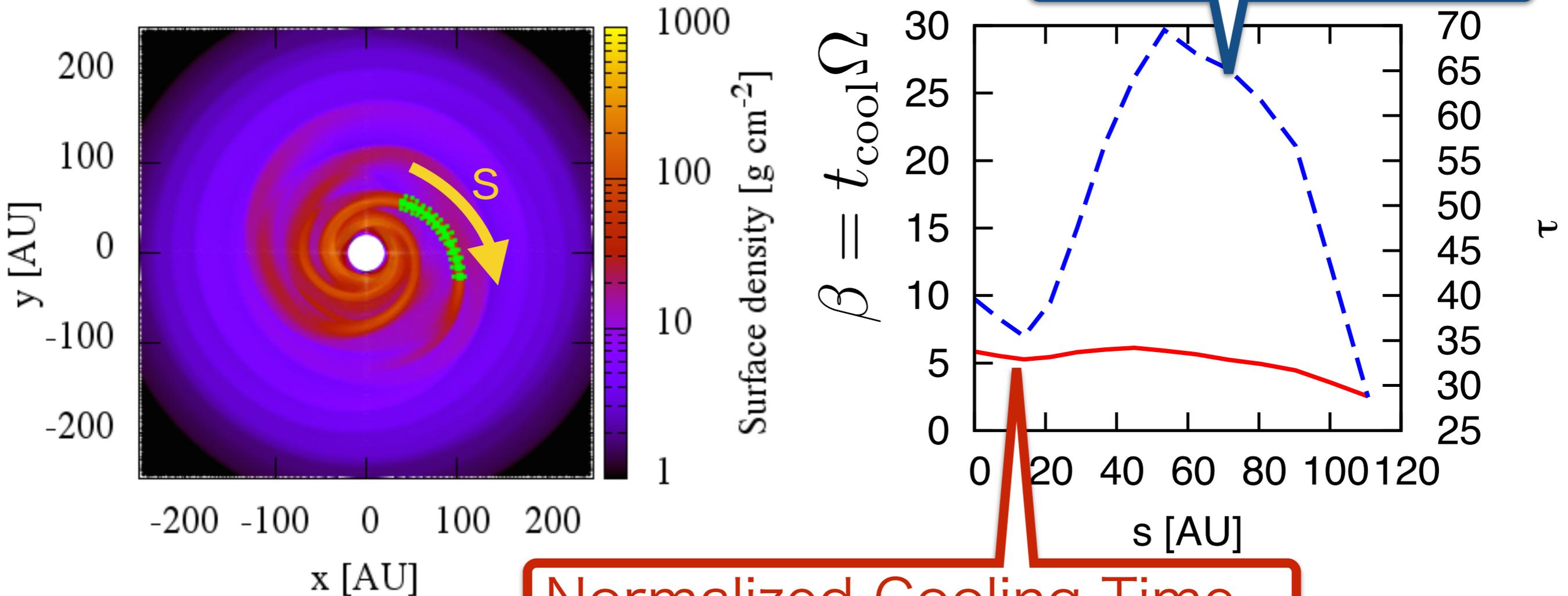
先行研究の分裂条件

$$t_{\text{cool}} = \beta \Omega^{-1} < 30 \Omega^{-1}$$

と比較

渦状腕の冷却時間

t=6285 yr

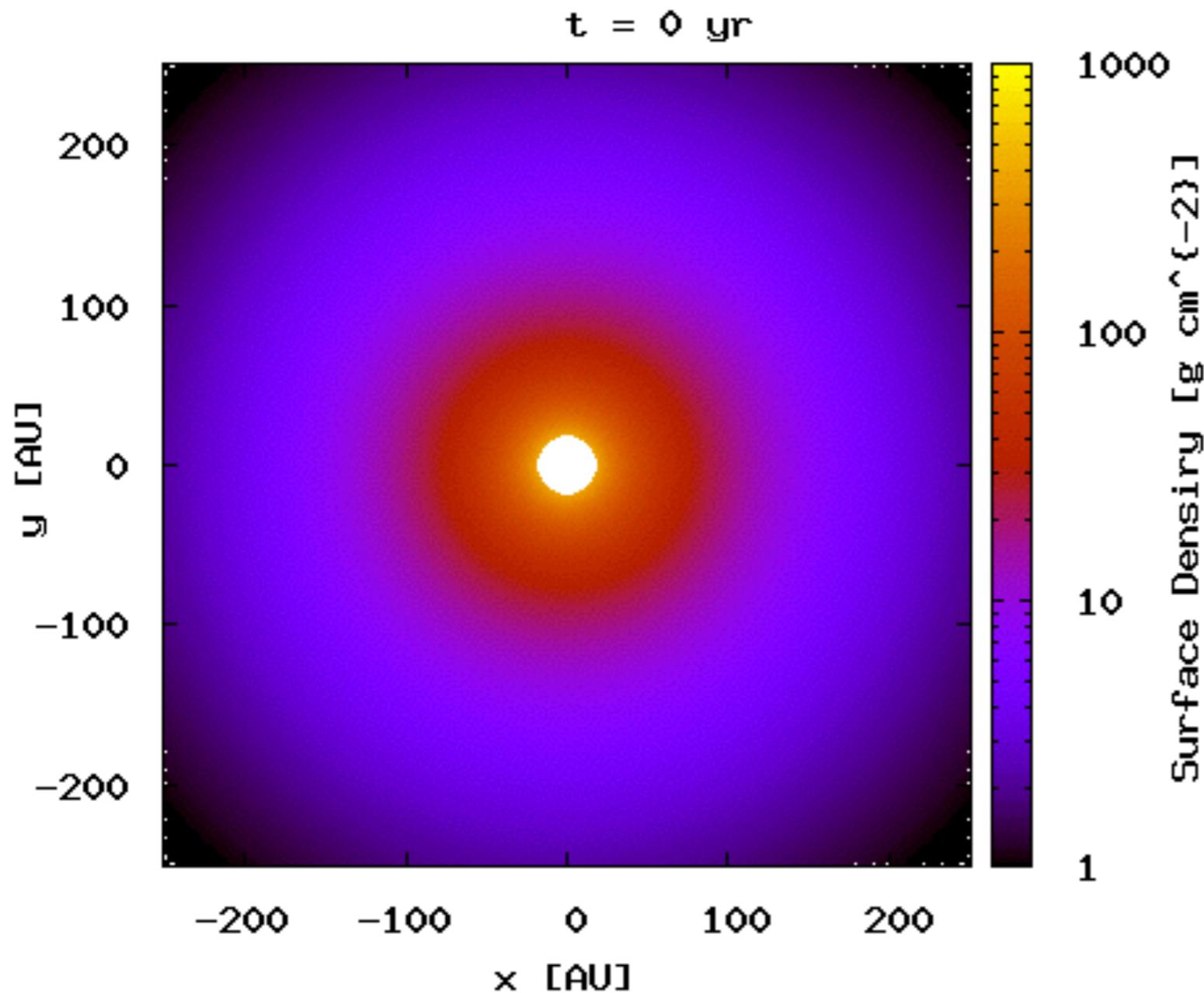


Normalized Cooling Time

$$\beta = E\Omega \frac{3 \left(\frac{1}{4}\tau^2 + \frac{1}{\sqrt{3}}\tau + \frac{2}{3} \right)}{8\sigma T^4\tau}$$

$\beta < \beta_{\text{crit}} \sim 30$ を満たすが分裂しない。

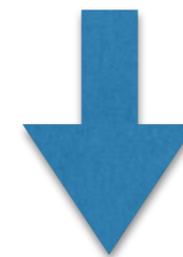
結果：分裂する場合



$$M_{\text{disk}} = 0.38 M_{\odot}$$

大局的不安定による

渦状腕形成



渦状腕が**分裂**

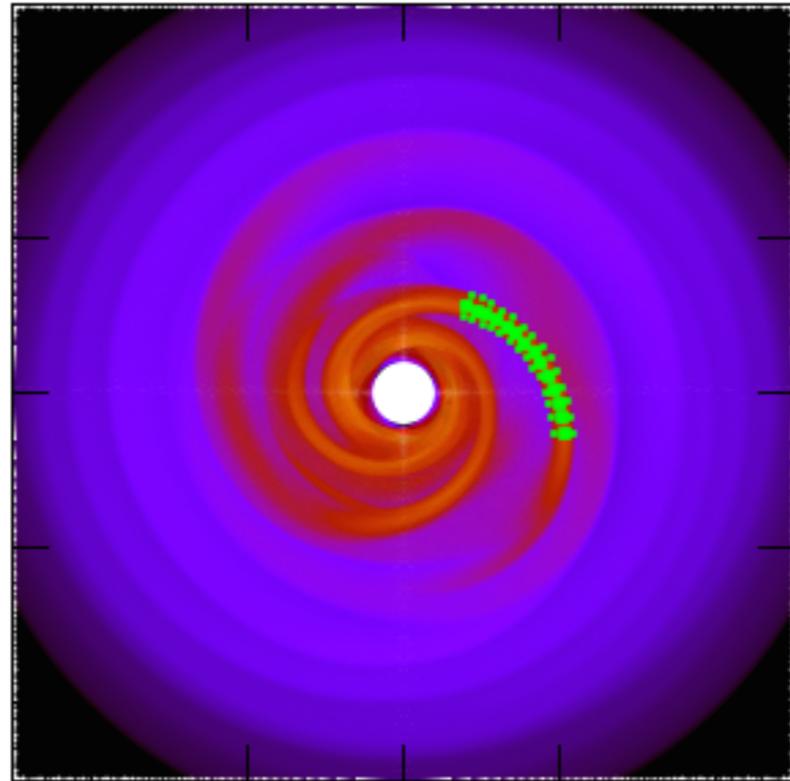
分裂しない場合との違いは？

渦状腕中のQに注目

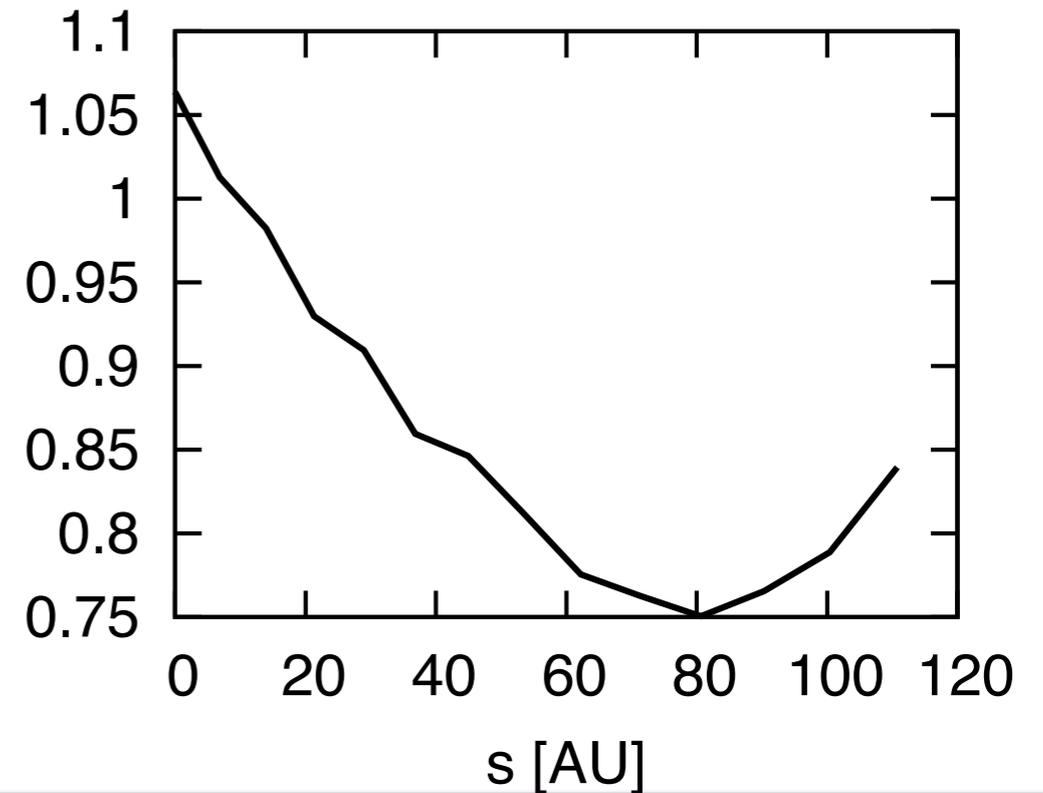
渦状腕の Q

分裂しない

$$M_{\text{disk}} = 0.34 M_{\odot}$$

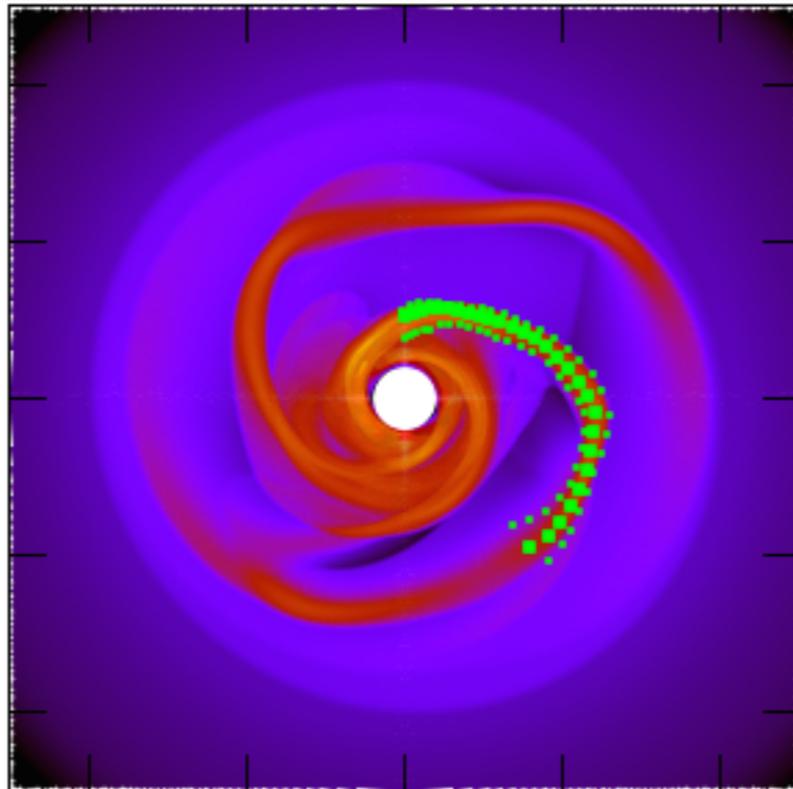


Q

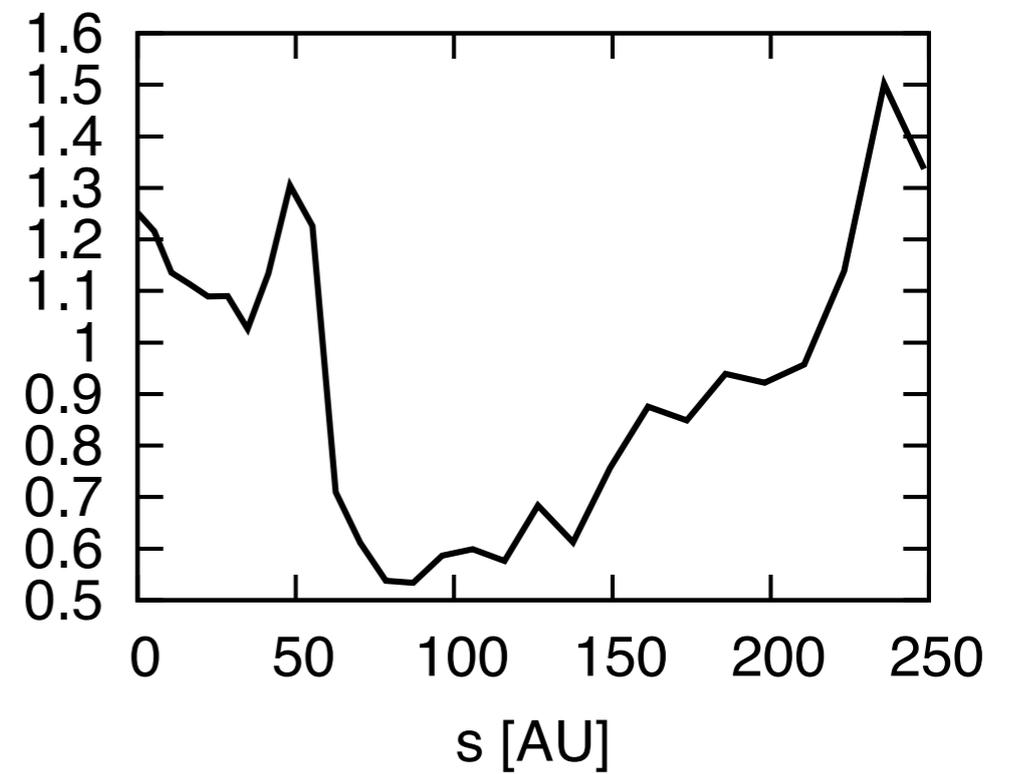


分裂する

$$M_{\text{disk}} = 0.38 M_{\odot}$$



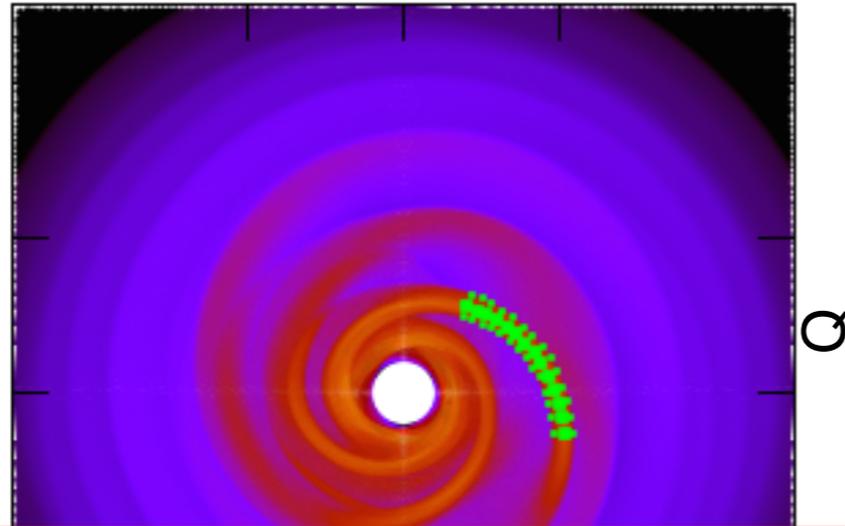
Q



渦状腕の Q

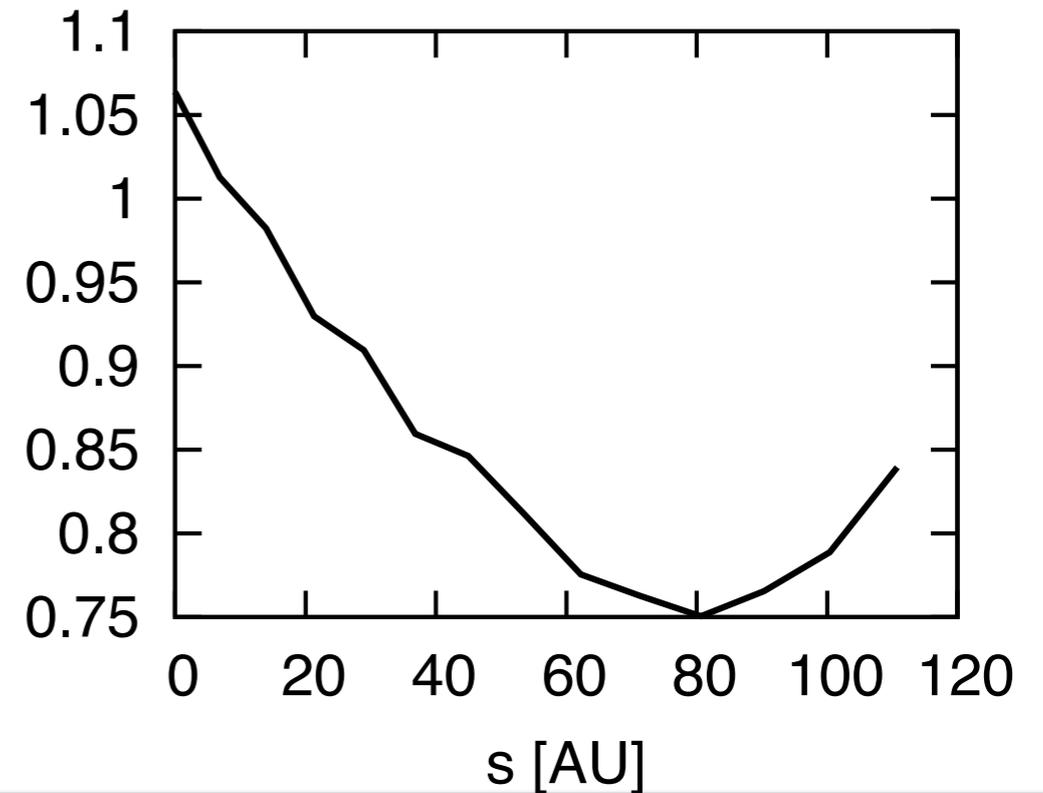
分裂しない

$$M_{\text{disk}} = 0.34 M_{\odot}$$



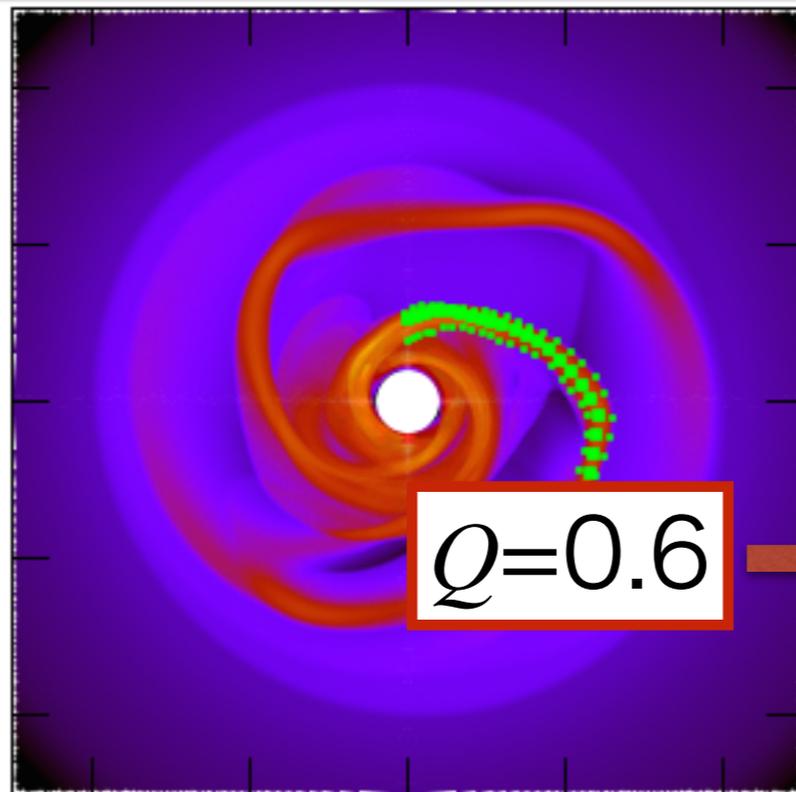
Q

渦状腕の分裂条件 $Q \lesssim 0.6$



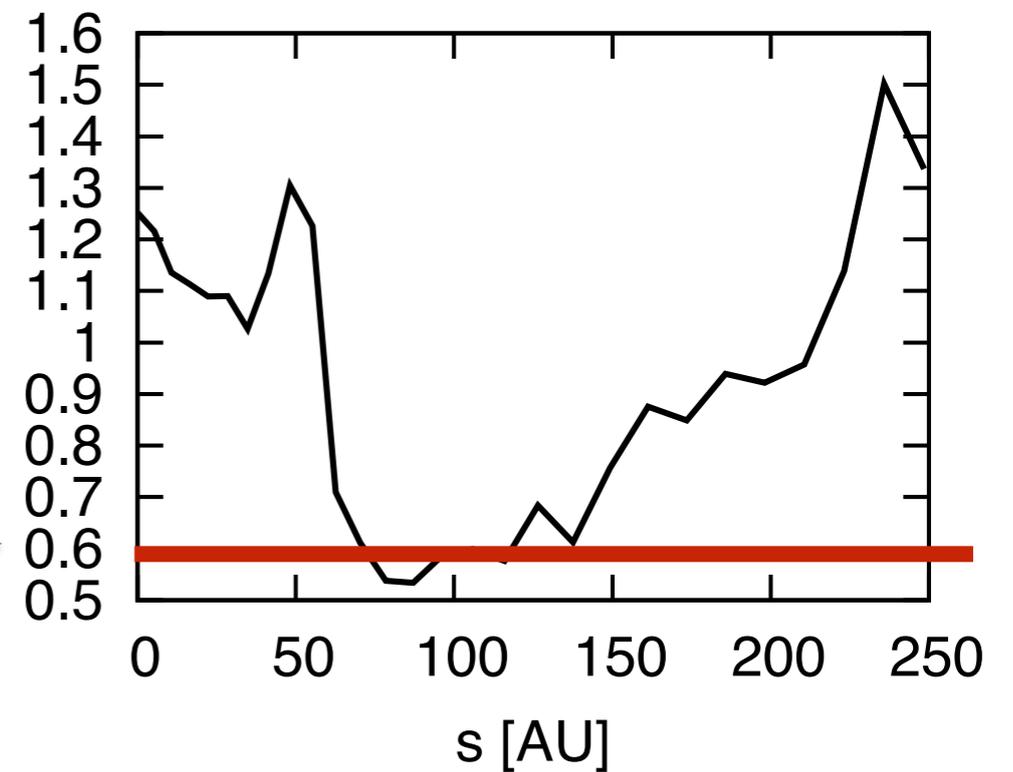
分裂する

$$M_{\text{disk}} = 0.38 M_{\odot}$$



Q

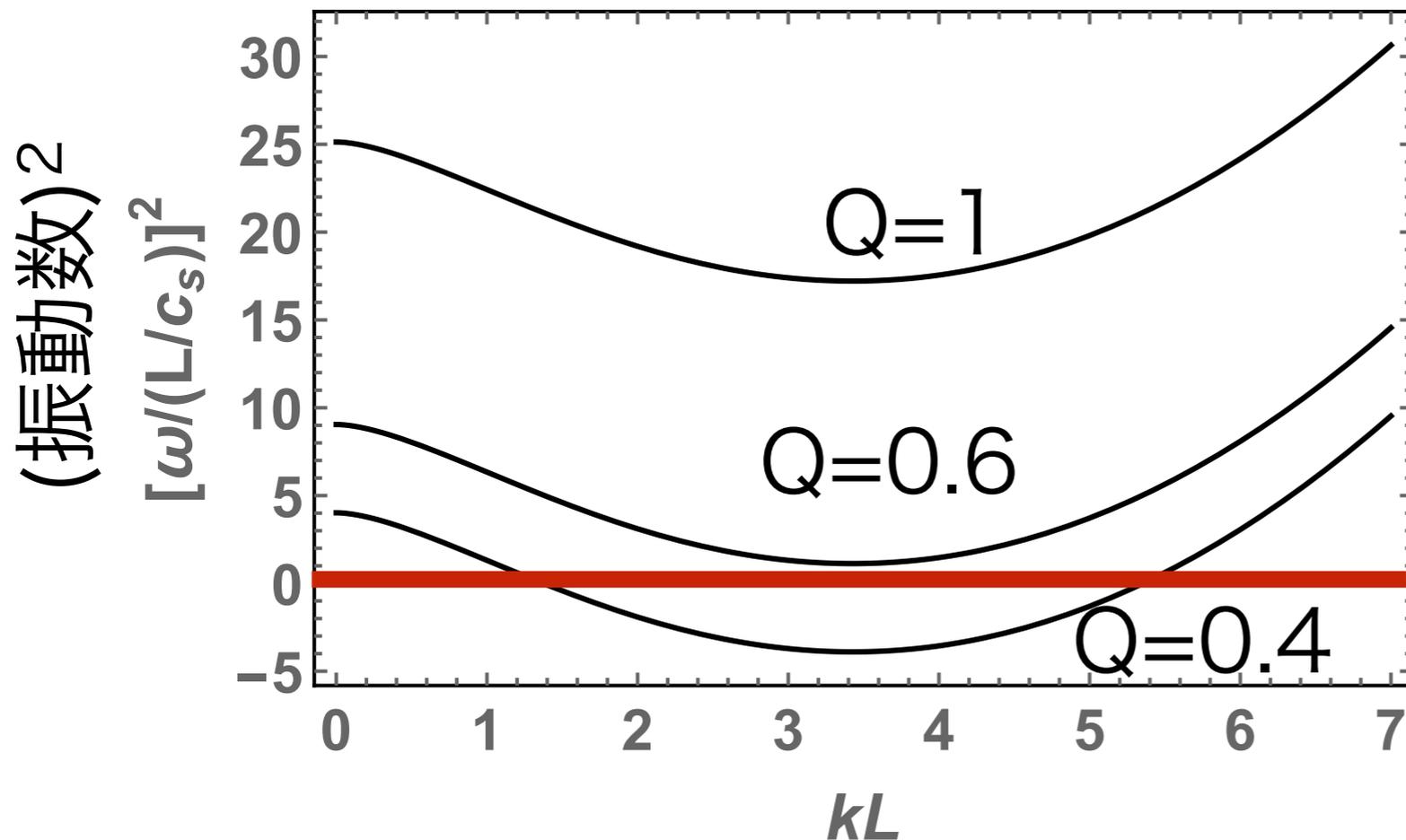
$Q=0.6$



”渦状腕”の自己重力不安定性

渦状腕 ~ 回転する細いリングとする

分散関係 (Line mass $M_L = c_s^2/G$)



$$Q_{\text{crit}} \sim 0.6$$

最大成長波長 $\sim 2L$

安定

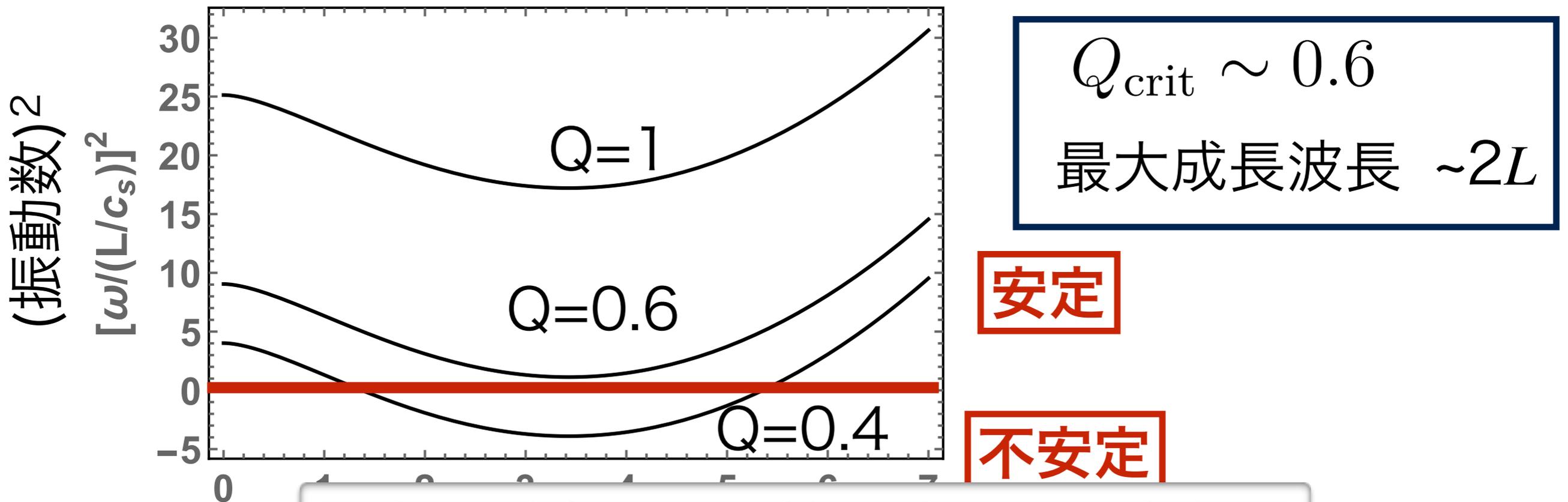
不安定

波数 (L: リングの幅)

“渦状腕”の自己重力不安定性

渦状腕 ~ 回転する細いリングとする

分散関係 (Line mass $M_L = c_s^2/G$)



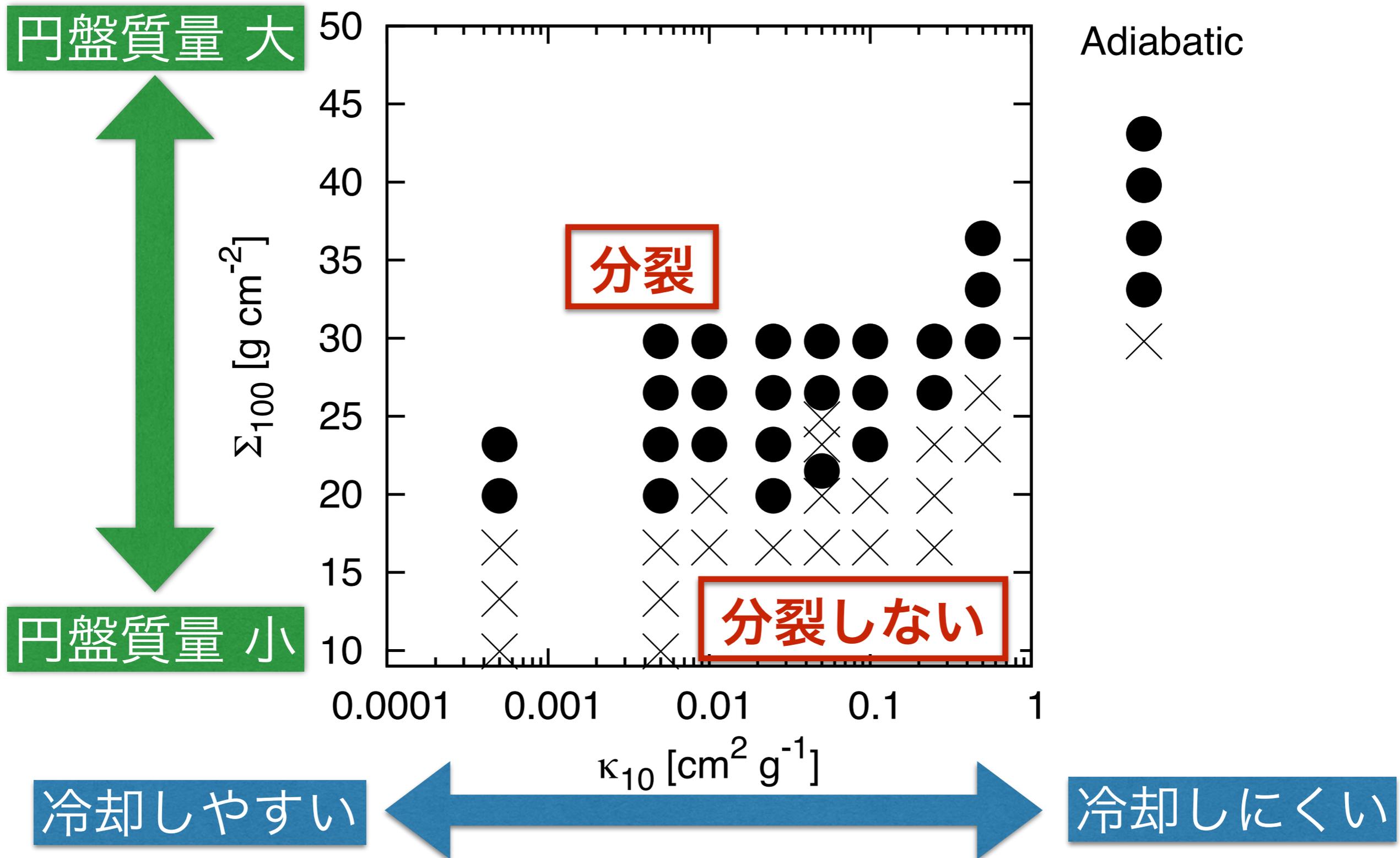
自己重力不安定性が成長する条件

渦状腕が長さ $\gtrsim 2L$ で $Q \lesssim 0.6$

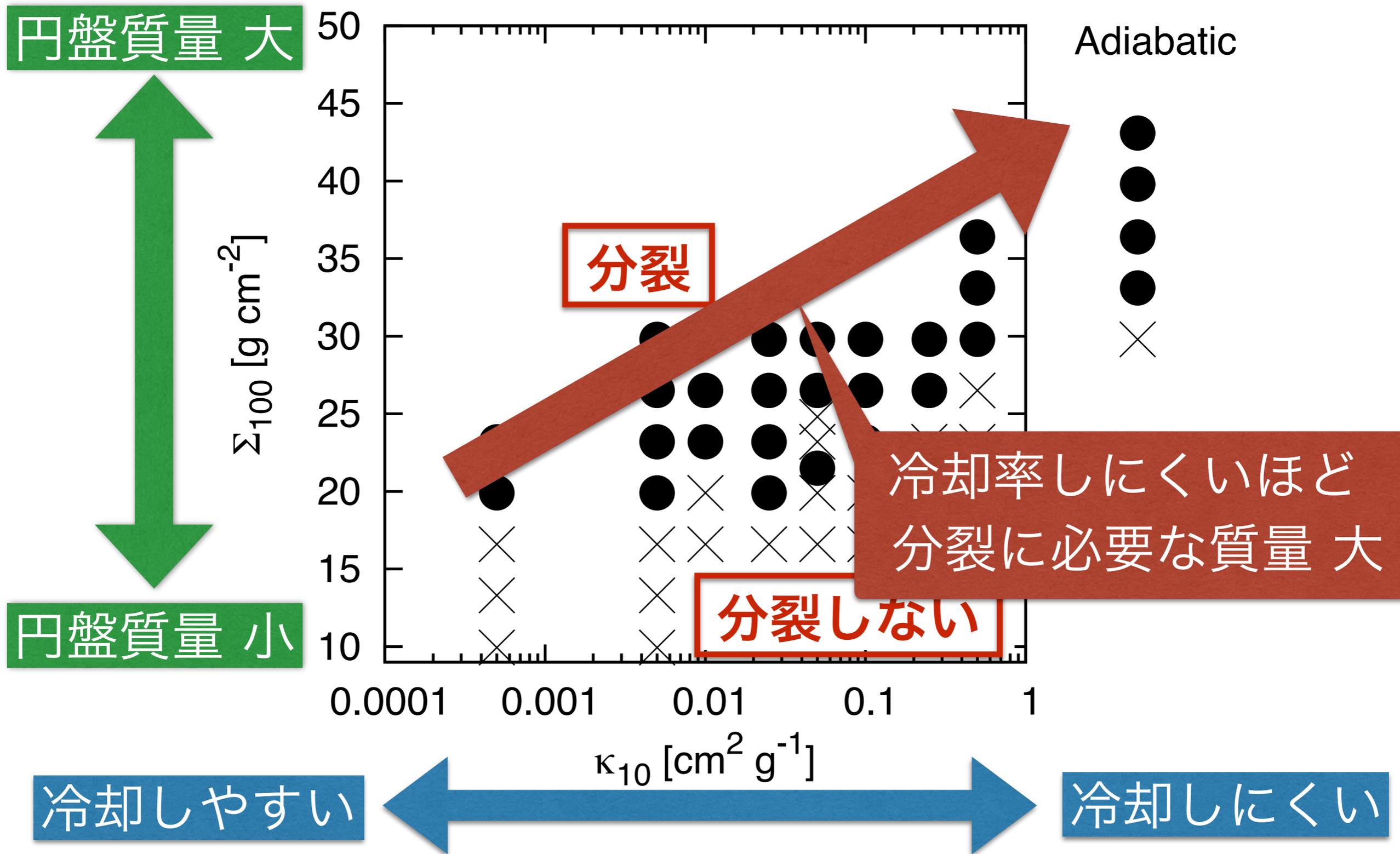
数値計算の結果と一致

円盤の分裂条件 \Leftrightarrow 渦状腕の自己重力不安定条件

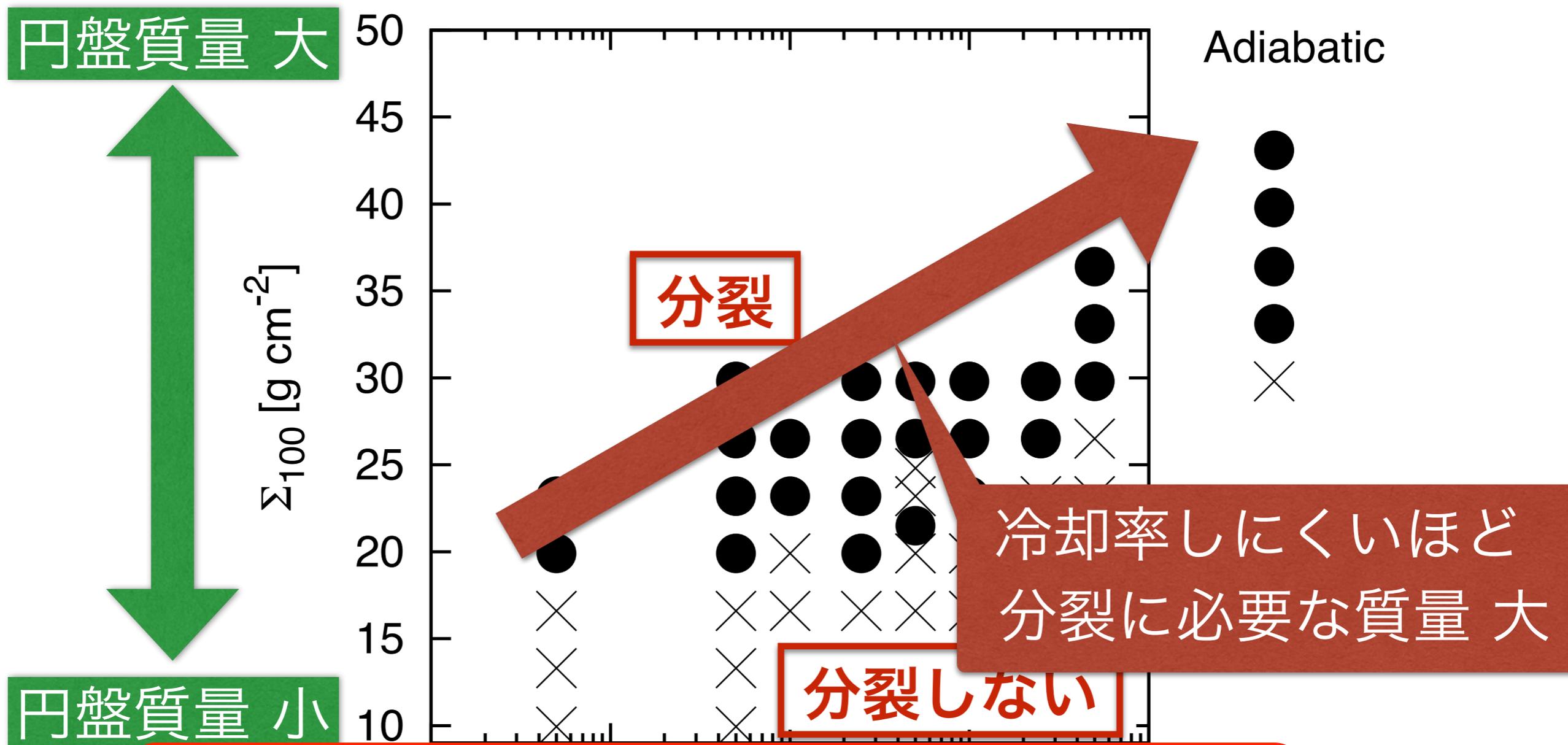
Opacityに対する依存性



Opacityに対する依存性



Opacityに対する依存性



断熱まで含めた広いパラメータ領域で

分裂条件は $Q \lesssim 0.6$ で与えられる。

冷却

しにくい

まとめ

- 原始惑星系円盤の自己重力不安定性による分裂は、連星系、褐色矮星、ガス惑星形成メカニズムの候補として重要。
- これまで、円盤が分裂する条件として円盤の**冷却率**が重要だと考えられてきたが、この条件は**他の数値計算結果と矛盾**する。
- 自己重力円盤の数値計算を行い円盤の分裂過程を詳細に解析した。**円盤が分裂する条件は円盤に形成された渦状腕中で $Q < 0.6$ で与えられることがわかった。**この結果はリングの線形解析の結果と一致する。
- **Opacity** が大きく冷却しにくい円盤ほど分裂に必要な質量は大きい。断熱まで含めた広いパラメータで分裂条件は **$Q < 0.6$** で与えられる。