

銀河円盤の力学進化と 円盤内での星・星団形成

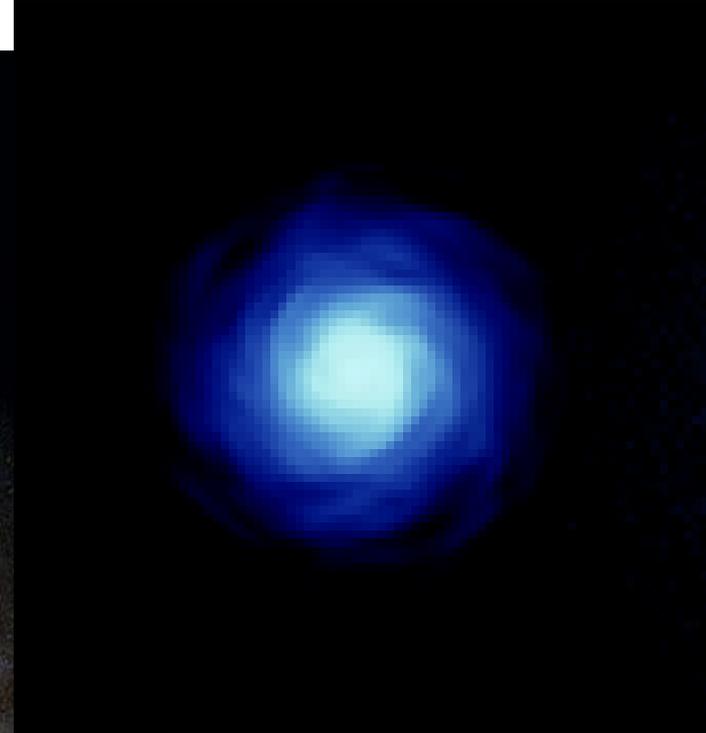
藤井 通子

国立天文台 理論研究部

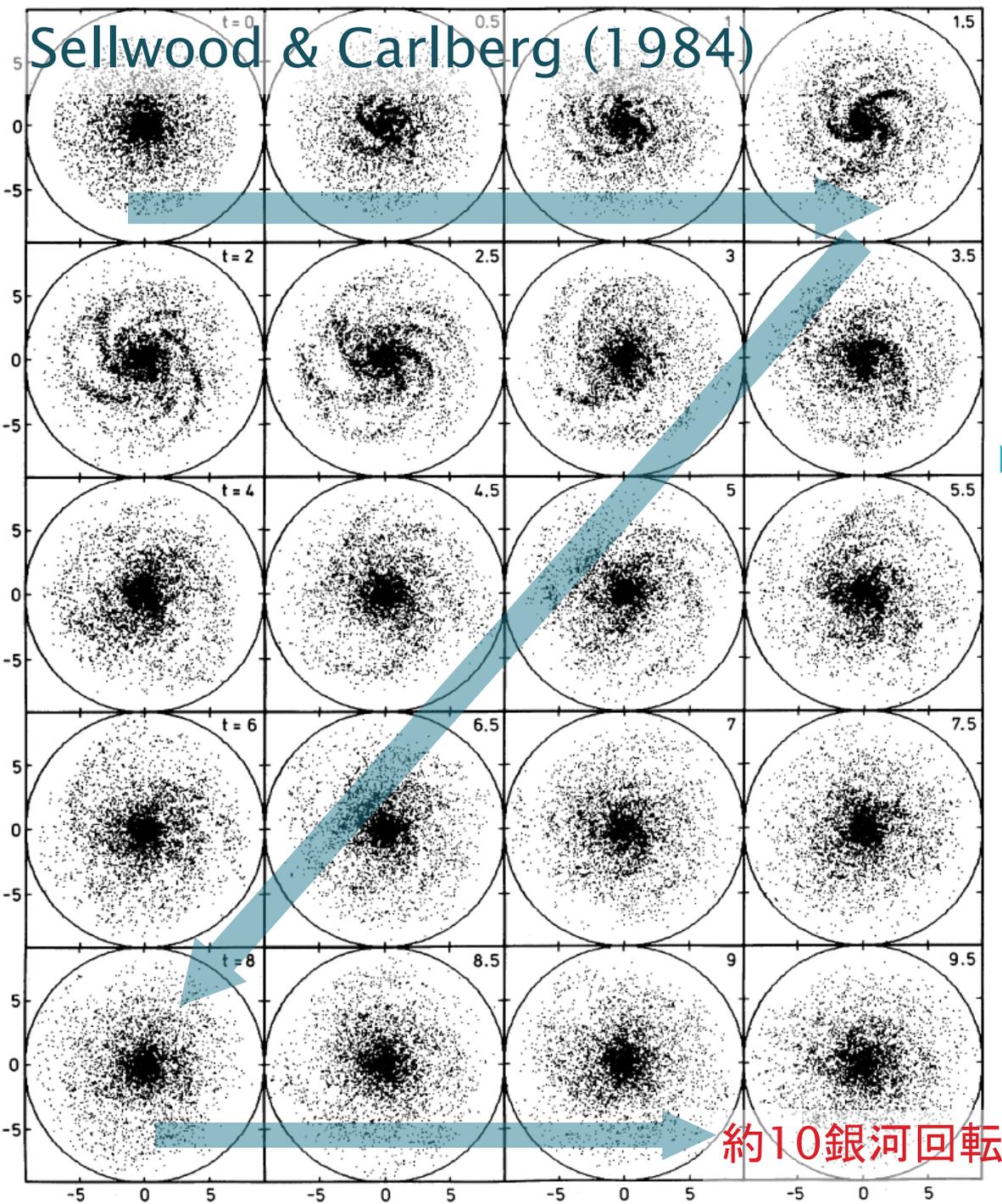
Outline

- ▶ 銀河の渦状腕の力学的進化
 - ▶ 星団形成シミュレーション
 - ▶ 今後の展望
 - ▶ まとめ
- 

銀河の渦状腕の力学進化



Sellwood & Carlberg (1984)



銀河の渦状腕

銀河の渦状腕はすぐに消える？

▶ Sellwood & Carlberg (1984)

- 2次元、pure N-body
→ 腕がすぐに消える
(円盤が加熱される)
- 実際の銀河の腕は消えていないので、どうにかして腕を維持しないといけない
→ ガスを入れる = 冷却

約10銀河回転

ディスクの加熱とQ値

- ▶ 円盤の安定性の指標; Toomre's Q

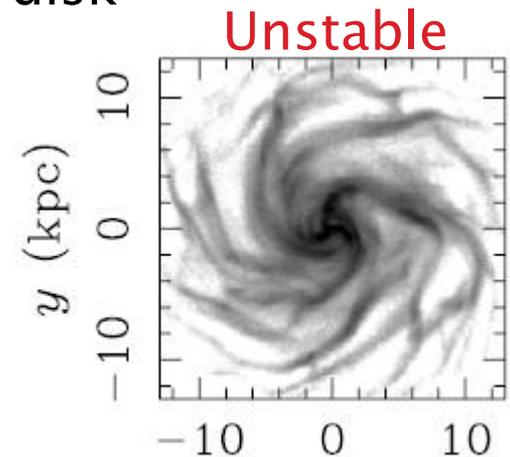
$$Q = \frac{\sigma_R \kappa}{3.36 G \Sigma}$$

Radial velocity dispersion
Epicycle frequency
Surface density of disk

$Q > 1$... 安定

$Q < 1$... 不安定

- ▶ 腕が円盤を加熱すると...
 - = 速度分散が上昇
 - = Q 値が上昇 (円盤が安定になる)
 - => スパイラルアームは消失する



これまでの研究の流れ

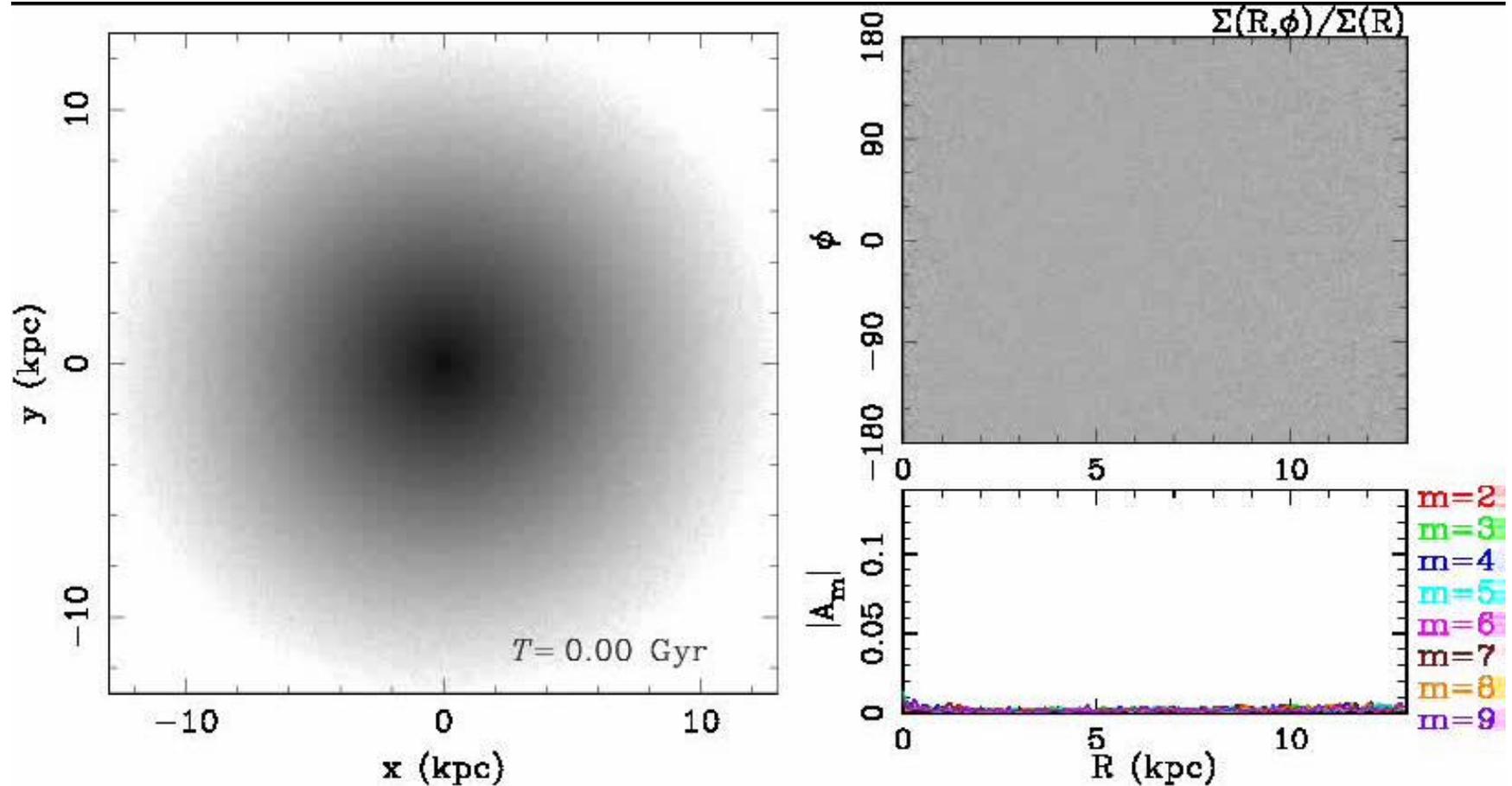
- ▶ Sellwood & Carlberg (1984)後、**ガスがないと腕は維持できない**というのが一般的な理解に
- ▶ 馬場さんの計算(N-body+SPH)
 - これまで言われていた準定常的な密度波とは違う
 - 恒星のみの円盤で何が起きているか知りたい
- ▶ ただし、これまでのpure N-body の計算は2次元または粒子数が少ない
- ▶ 3次元で粒子数を増やして、恒星円盤の力学的進化を調べたい

N体シミュレーション

- ▶ ハロー(外場) + ディスク(N体)で計算
 - ガスや星形成は入れない(pure N-body)
- ▶ ディスク
 - Exponential disk
 - $R_d = 3.4 \text{ kpc}$
 - $Z_d = 0.34 \text{ kpc}$
 - $M_d = 3 \times 10^{10} M_\odot$
 - $\epsilon = 30 \text{ pc}$
 - $N = \underline{3M}, 300k$
 - $Q_0 = 1.1, \underline{1.2}, 1.3, 1.4, 1.5, 1.7$
- ▶ ハロー
 - NFW, $c = 10$
 - $M_h = 6 \times 10^{11} M_\odot$
 - $R_h = 80 \text{ kpc} (= r_{200})$

計算機: GRAPE7@MUV
コード: ツリーコード

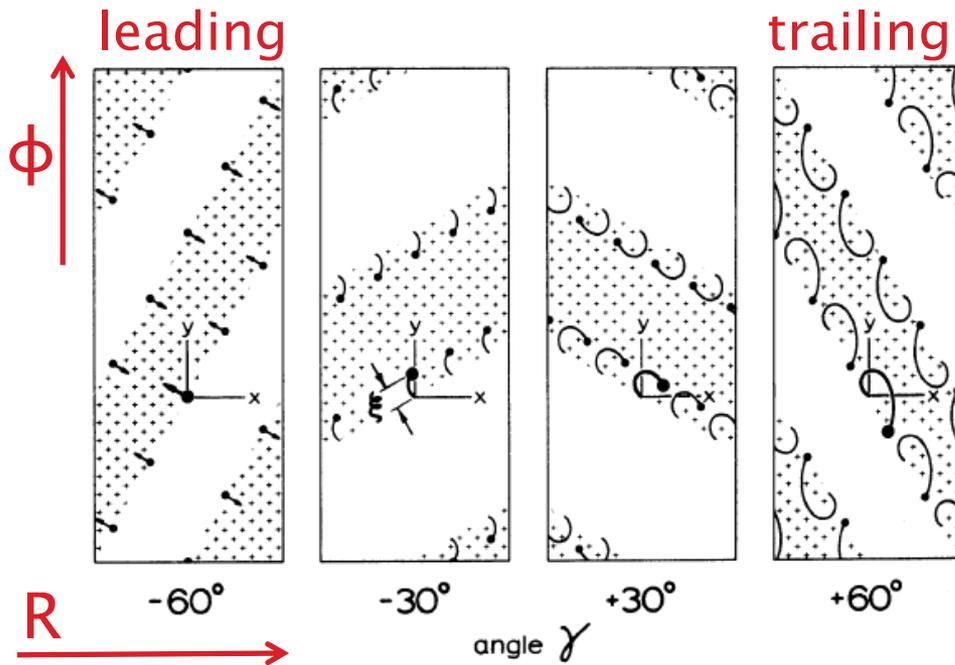
Movie



- Swing amplificationで腕が発達
- 腕はシアで引き伸ばされ、ちぎれる
- 隣の腕と繋がって、再び発達

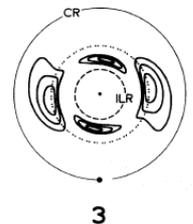
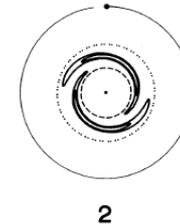
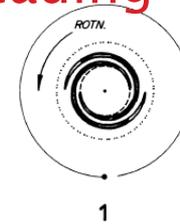
Swing amplification

Toomre (1981)

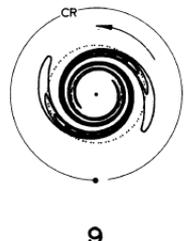
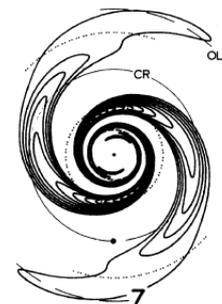
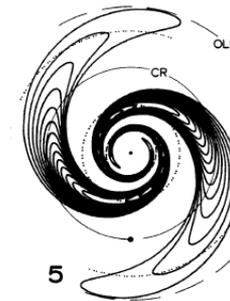
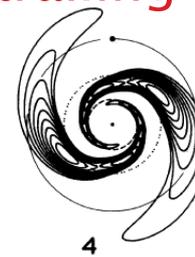


Spirals are amplified when they shift from leading to trailing arm

leading



trailing



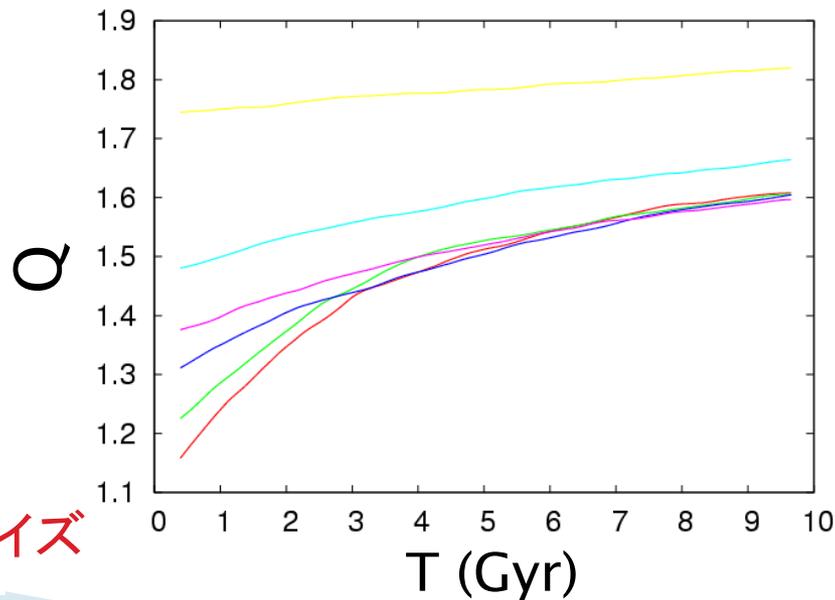
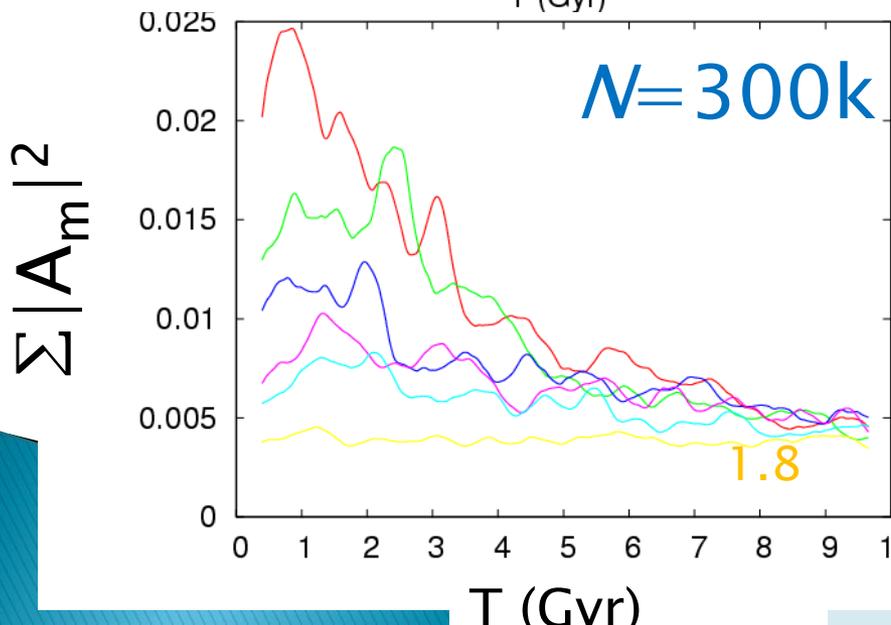
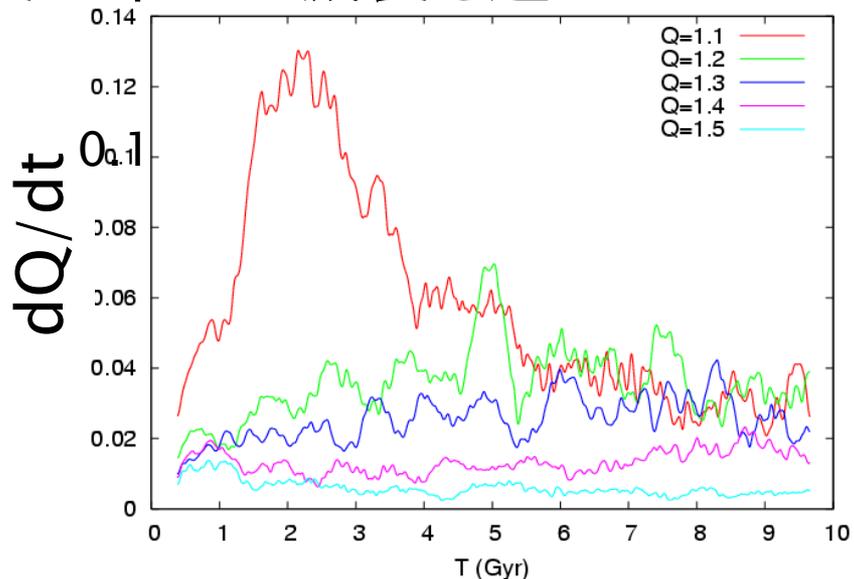
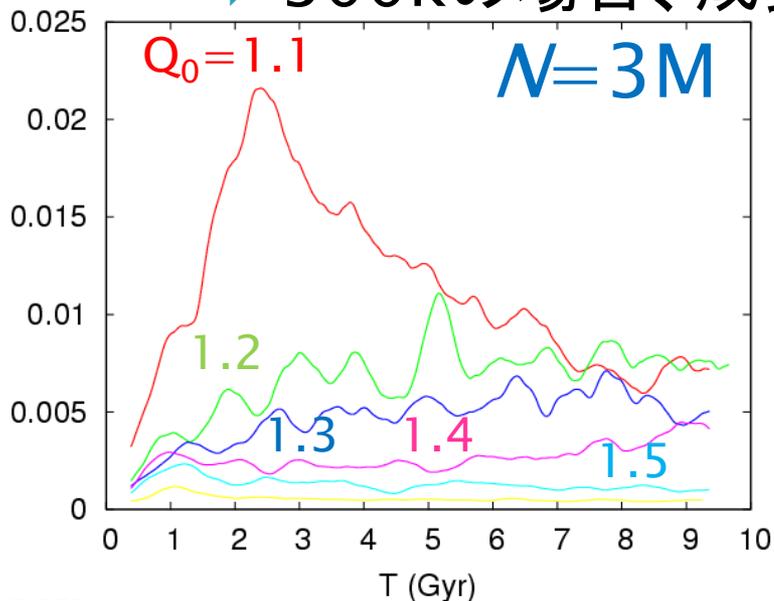
▶ シミュレーションでは、粒子のポアソンノイズを種にして発達

結果

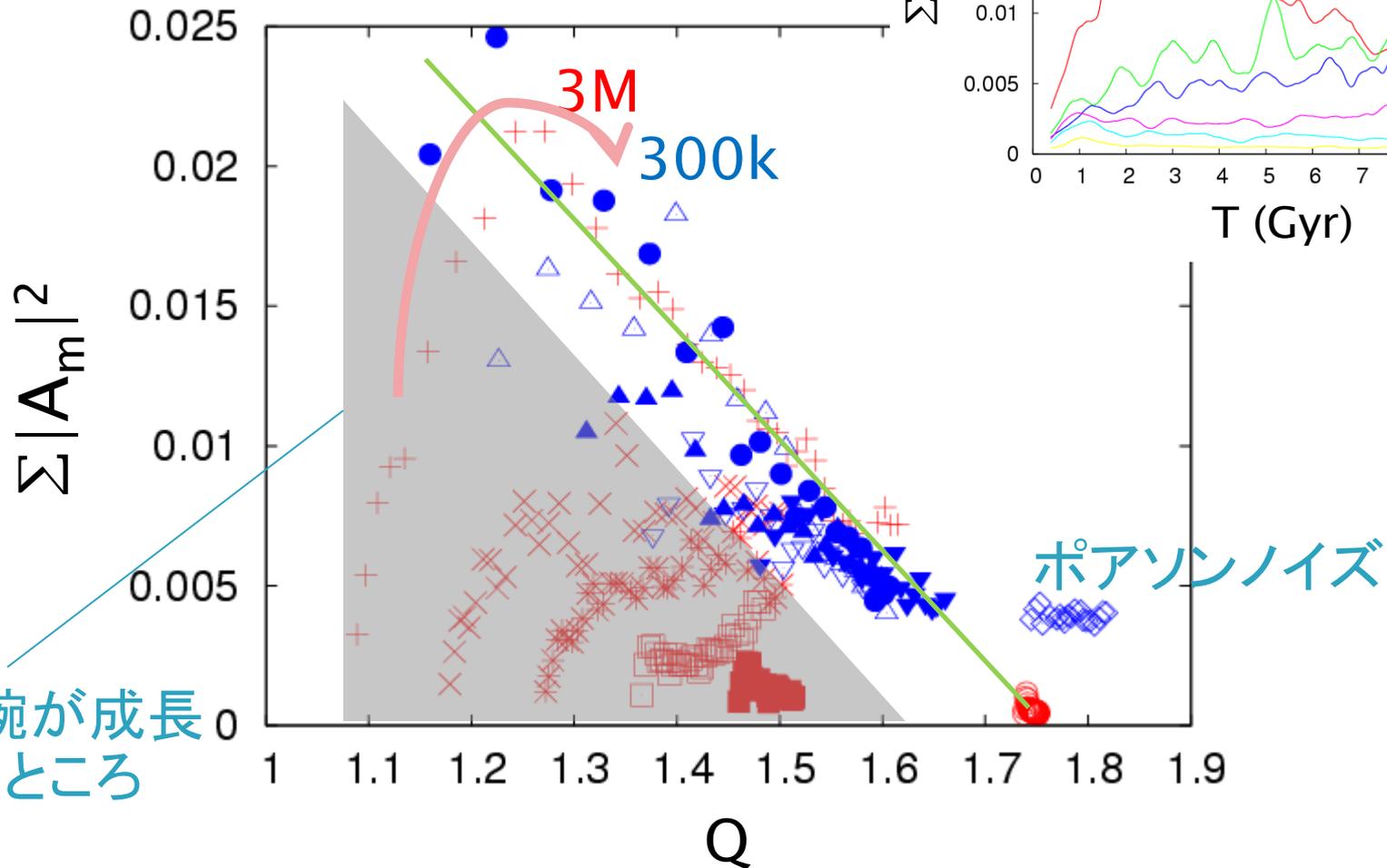
- ▶ Amplitudeが大きいとQの上昇が大きい
- ▶ Qが大きくなるとamplitudeは下がる
- ▶ 300kの場合、成長が早い→減衰も速い

A_m : Fourier amplitude $m=1-10$

$\Sigma |A_m|^2$



Qとamplitudeの関係

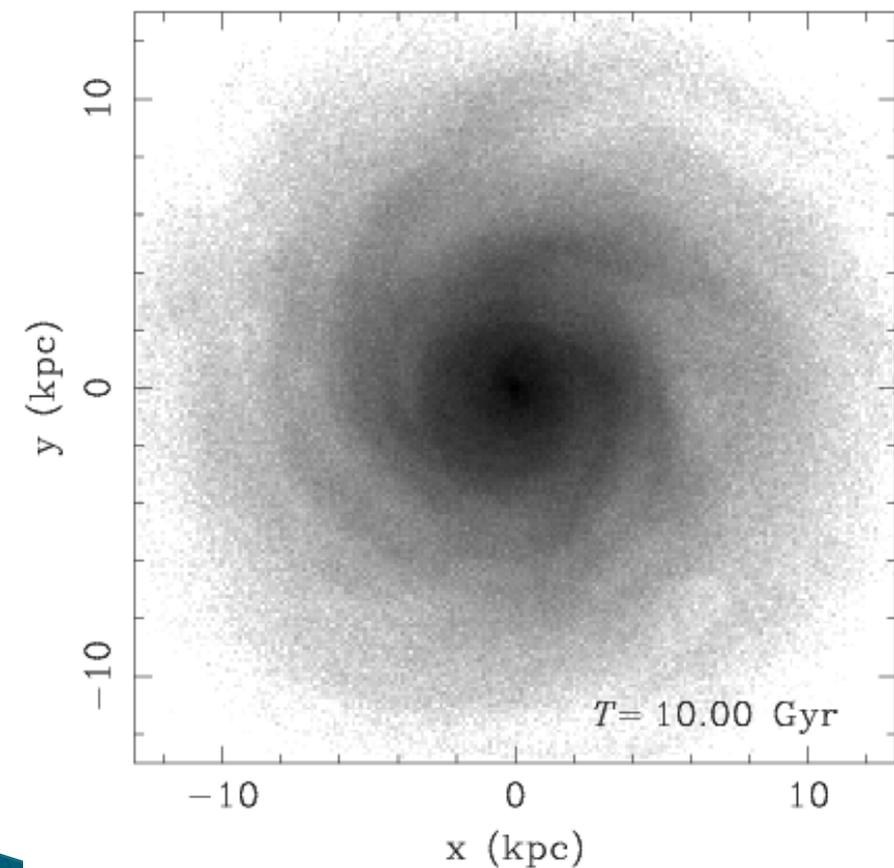


初期に腕が成長しているところ

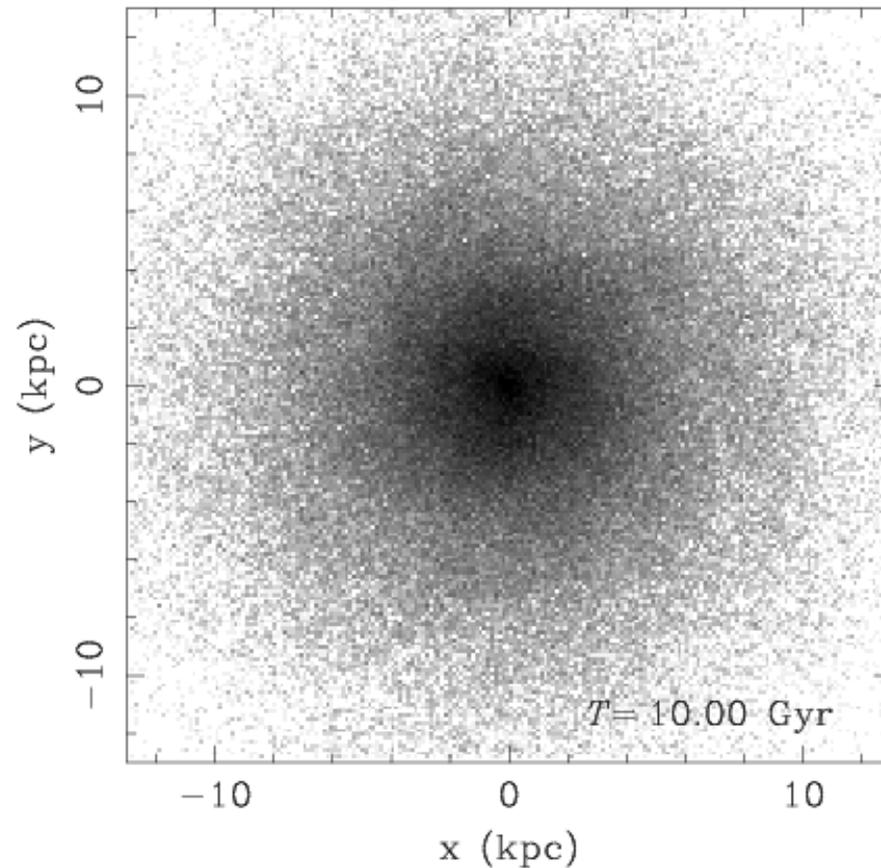
- ▶ Q によって成長できる最大amplitudeが決まっている

粒子数による違い

$N=3M$



$N=300k$



▶ 300kだと腕が消えてしまう。

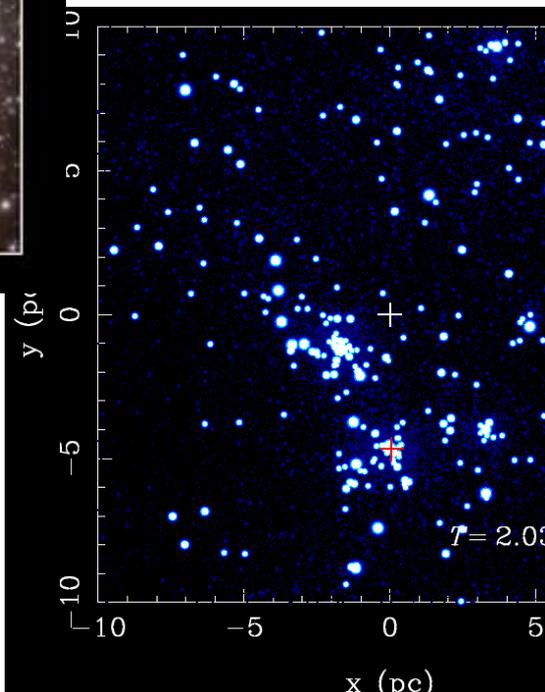
ここまでのまとめ

- ▶ 恒星のみの円盤でも腕は消えない
 - 粒子数が少ないと数値的加熱で消える
- ▶ 腕はself-regulating
 - Q値の応じた強度の腕が立つ
 - 腕の強度に応じて円盤を加熱＝Q値が上昇
- ▶ 腕の発生はswing amplification
 - スムーズな円盤から始めると、ポアソンノイズから発達

星団形成シミュレーション



- ▶ より現実に近い初期条件から星団の進化のシミュレーションを行いたい



星形成領域から星団へ

▶ 観測

- 星形成領域: フィラメント状構造
- 若い星団: クランプを持つ (R136, NGC3603, Wd1 etc...)

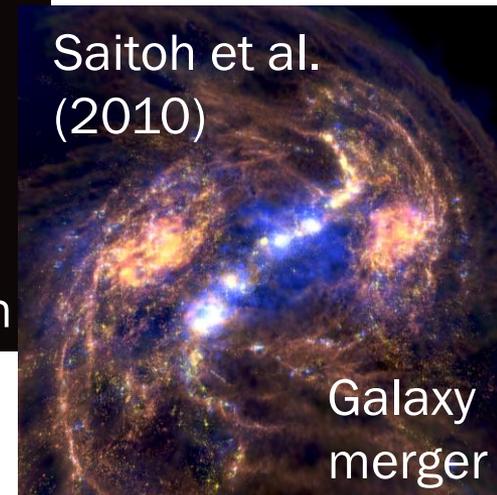
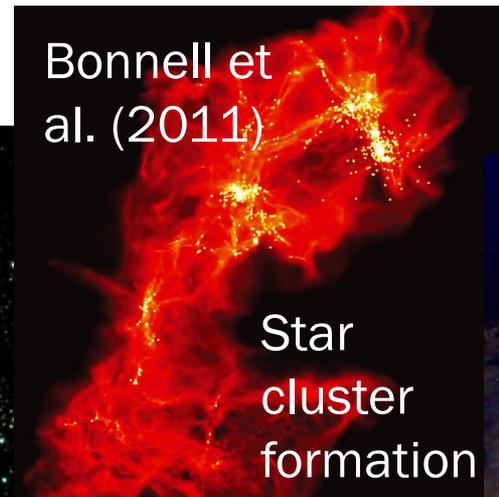
▶ シミュレーション

- 星形成シミュレーション: フィラメント+クランプ
- 銀河形成シミュレーション: 複数の星団が形成



Westerlund 1
(Brandner+ 2008)

This image shows a dense field of stars, likely a young star cluster, with a mix of colors from blue to red, set against a dark background.



手法

- 星形成シミュレーションよりお手軽
- より大きな領域を計算できる

- ▶ Step1: 乱流を持つ分子雲のシミュレーションをSPH法で、分子雲のfree-fall time(t_{ff})まで
 - 質量分解能: $1 M_{\odot}$ 、空間分解能: 0.1 pc
- ▶ Step2: ガス粒子を星粒子に置き換える
 - 密度の平方根に比例した星形成効率(SFE)を仮定 (cf. Krumholz 2012)
 - 星の質量はSalpeter IMF、位置はランダム
 - 残りのガス粒子は取り除く (instantaneous gas expulsion)
- ▶ Step3: 星粒子のみN体で10 Myr まで計算
 - 高精度、星の合体、星の寿命あり

SPH シミュレーション

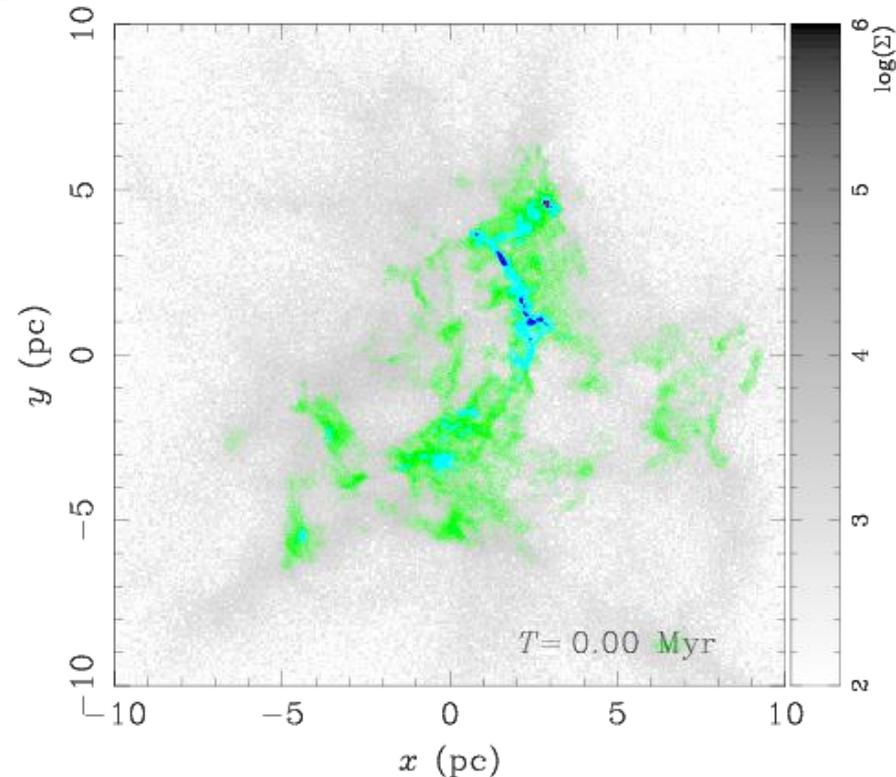
▶ Code: Fi in AMUSE

- Isothermal
- 分解能
 - $m_{\text{gas}} = 1 M_{\text{sun}}$
 - $\text{eps} = 0.1 \text{ pc}$

▶ Homogeneous sphere

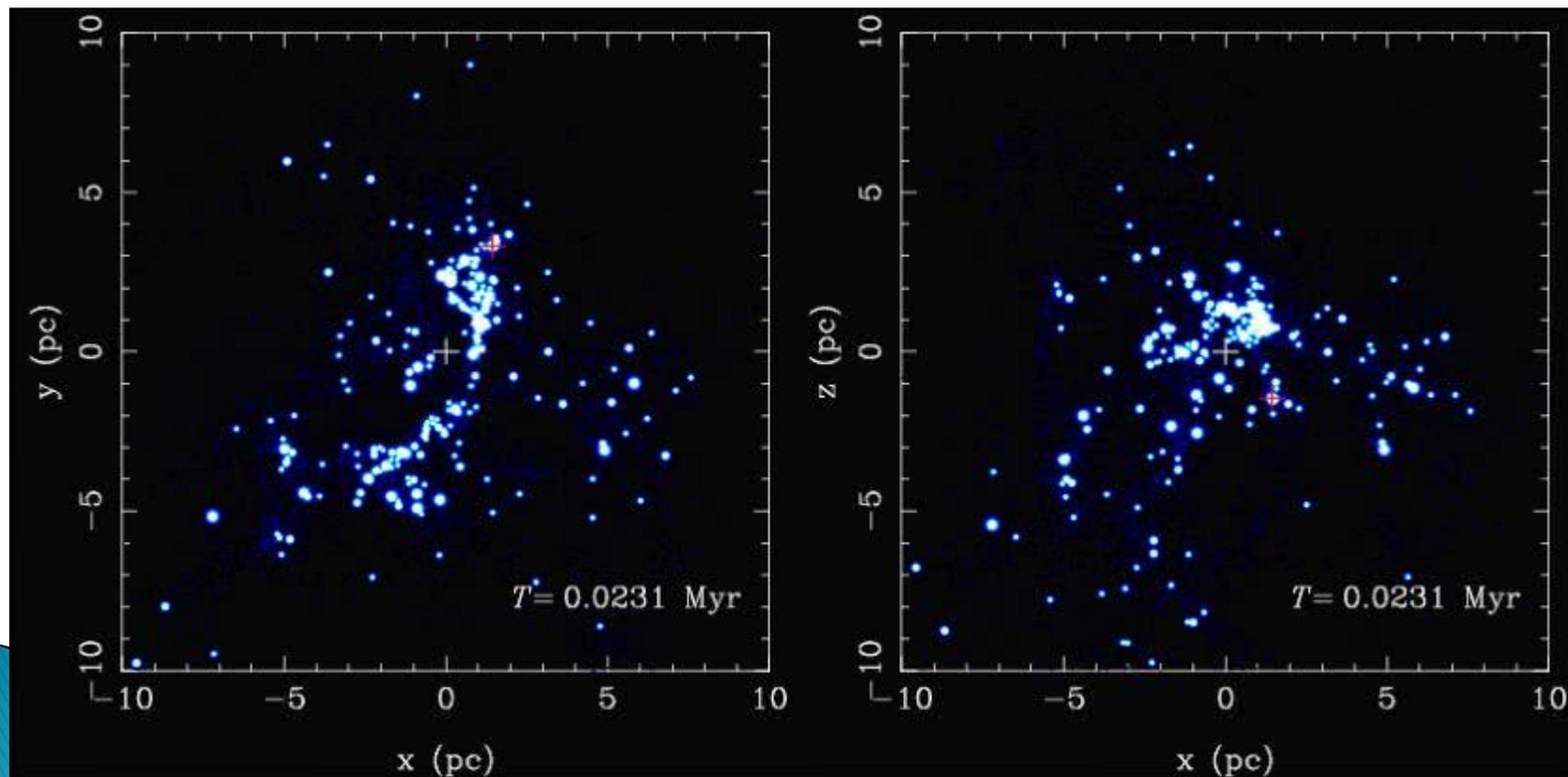
- 乱流 $Pv(k) = k^{-3}$
- 密度 $100/10 M_{\text{sun}} \text{ pc}^{-3}$
- 質量 $M_{\text{cloud}} = 4 \times 10^5, 10^6, 5 \times 10^6 M_{\text{sun}}$

- ## ▶ ガスの初期の free-fall time で計算を止めて、星形成を仮定
- Salpeter IMF $0.3-100 M_{\text{sun}}$ 位置はランダム

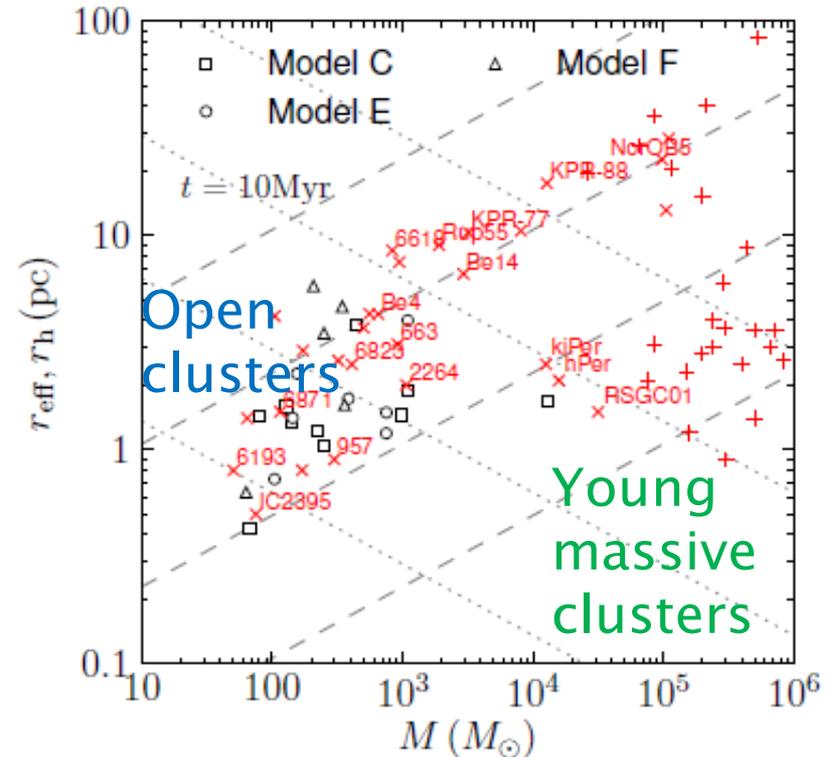
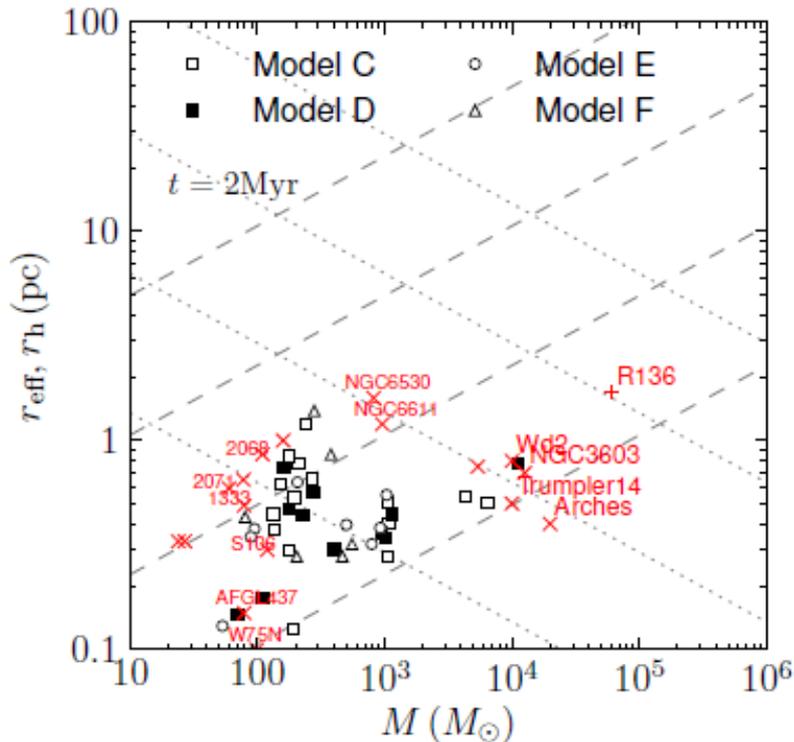


N体シミュレーション

- ▶ 6th-order Hermite scheme
- ▶ XC30 at CfCA, NAOJ

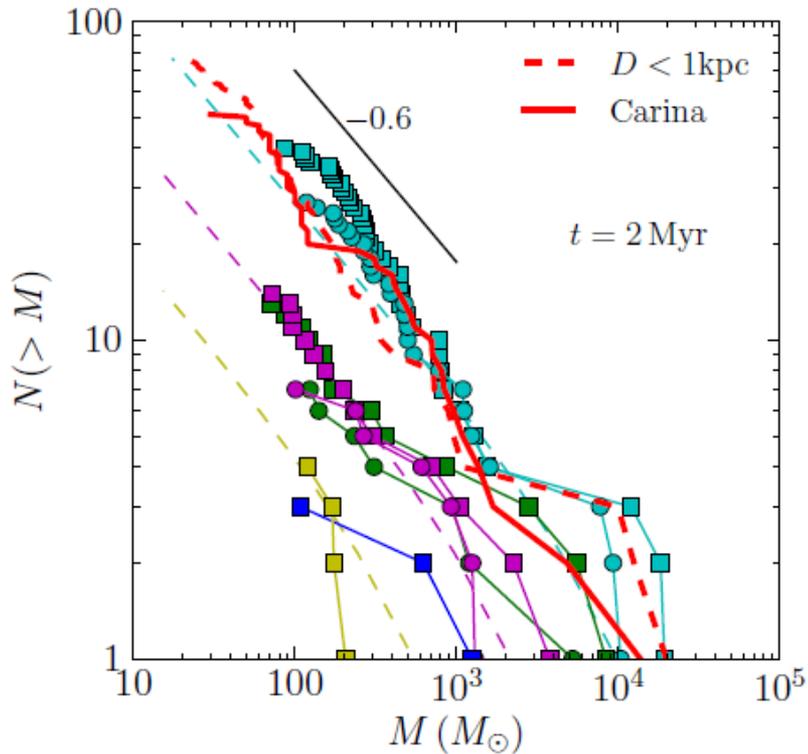


星団の質量-半径図



- ▶ 星団の半径と質量を観測と比較
 - Clump finding using HOP (Eisenstein and Hut 1998) in AMUSE
- ▶ 散開星団とYMCは同様に形成する

星団の質量関数



- ▶ 観測(赤線):
 - Carina star cluster complex (Feigelson 2011)
 - 太陽から1 kpc以内 (Pisunov+2008)
- ▶ フィッティング(破線)
- ▶ シミュレーション(点)

- ▶ 星団の最大質量

$$M_{c,\max} = 1.7 M_{\text{g}}^{0.6}$$

- ◉ Schechter functionでフィッティング

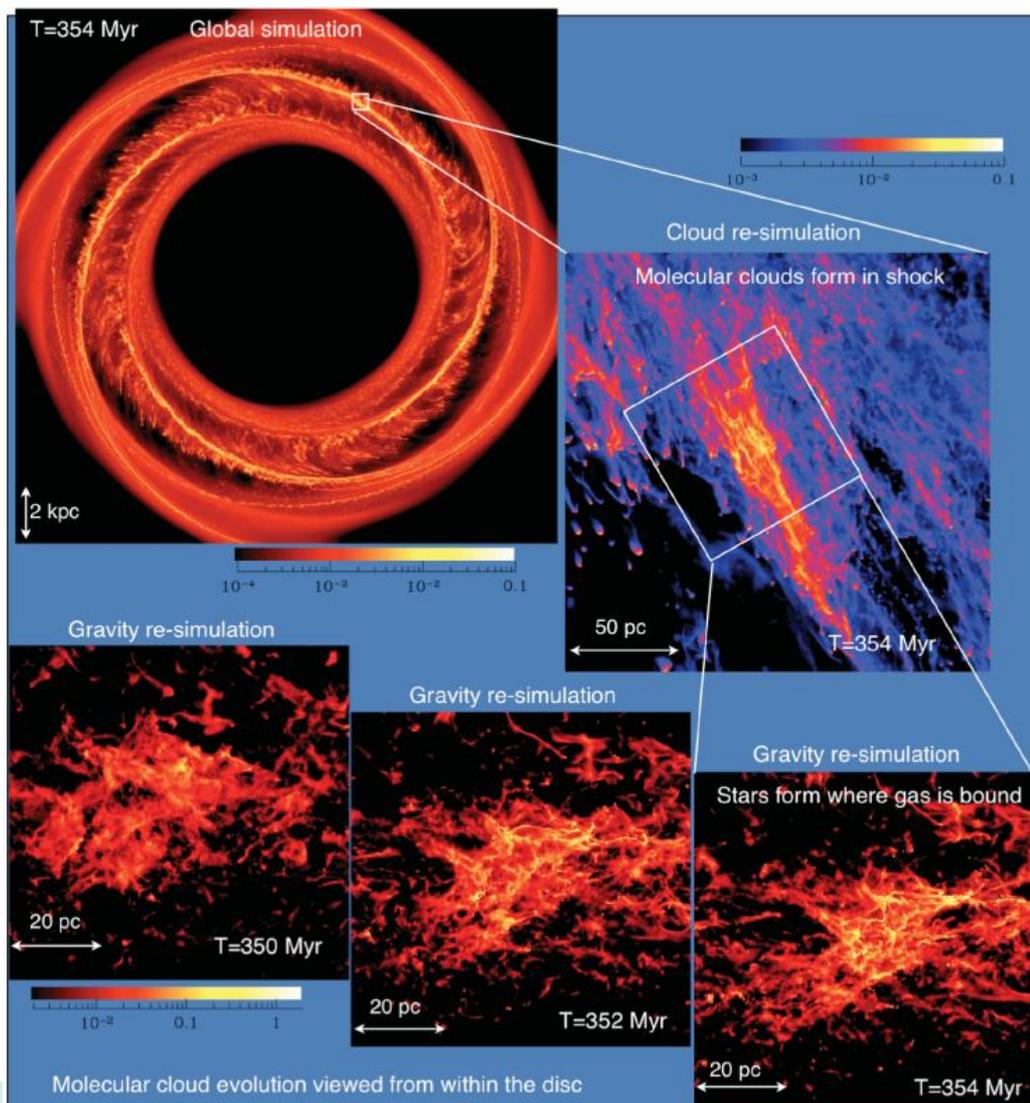
$$N(>M) \propto M^{\beta+1} \exp\left(-\frac{M}{M_{\text{cut}}}\right)$$

$$\beta = -1.55 \pm 0.11$$

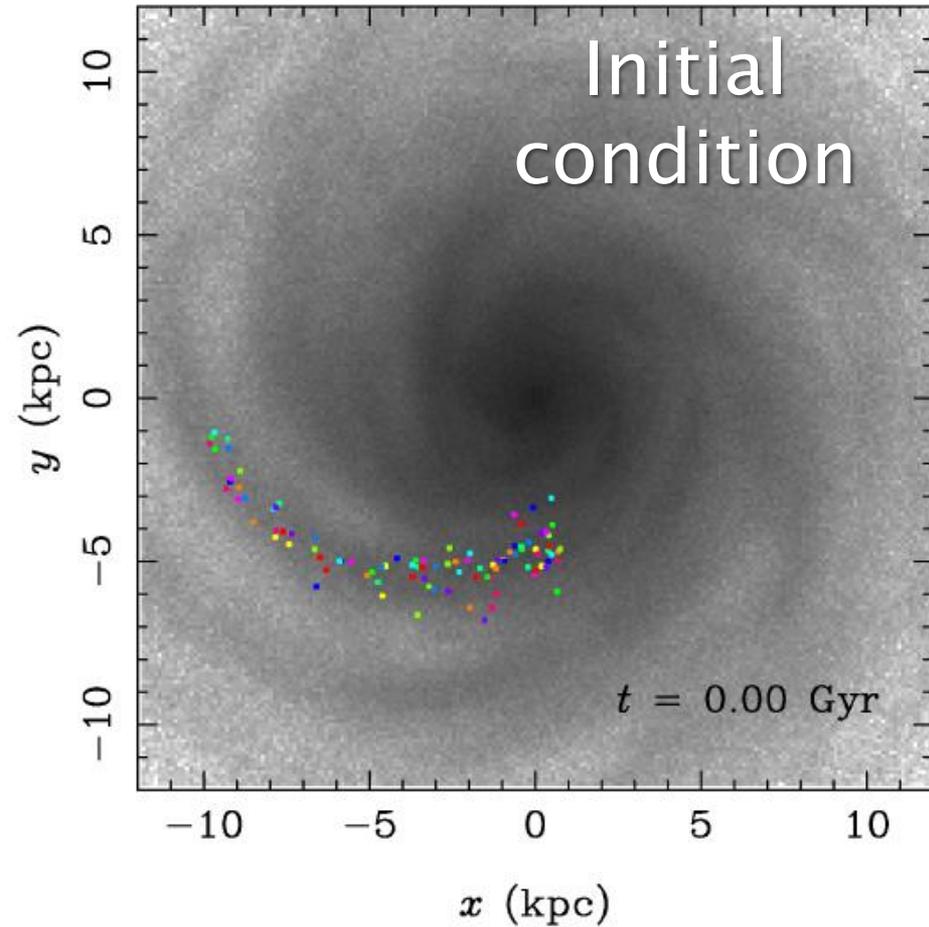
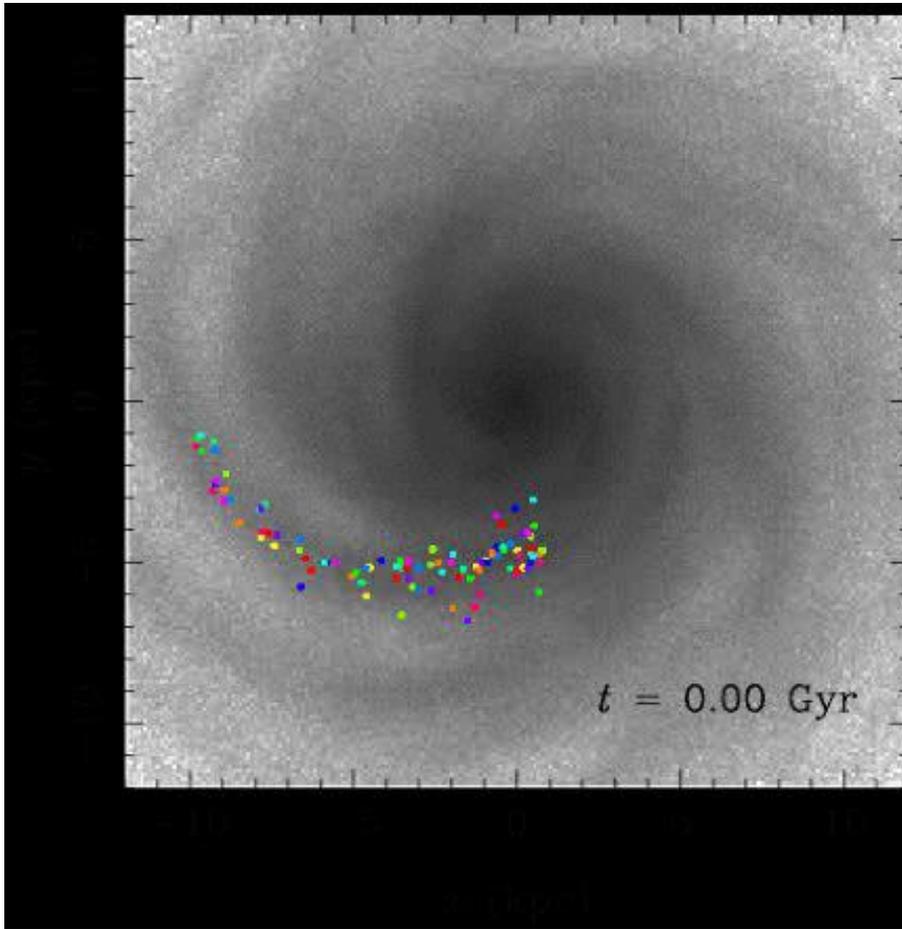
今後やりたいこと

Bonnell et al. (2013)

- ▶ 分子雲の初期条件をより現実的に
→ 銀河のシミュレーションを初期条件に
 - Live disk
- ▶ 星形成領域の力学的進化をきちんと解く
- ▶ 銀河の力学進化と星形成の関係を解明



銀河内での星団の破壊シミュレーション



- ▶ ツリー法(銀河)とダイレクト法(星団)のハイブリッド

Fujii and Baba (2012)

まとめ

- ▶ 銀河円盤シミュレーション
 - 銀河の渦状腕はself-regulatingで長生き
 - 十分な粒子数が必要
 - ただし、live haloの場合、まだわからないことが多い
- ▶ 星団形成シミュレーション
 - 今までより少し簡素な方法でも、観測されている星団が形成される
- ▶ 今後の展望
 - 星団形成シミュレーションを銀河円盤シミュレーションの中で
 - 銀河の渦状腕が分子雲や星形成に与える影響(分子雲衝突?)
 - 星がどのように銀河内に広がっていくか