

# 渦巻銀河ダイナミクス理論の進展と 天の川銀河

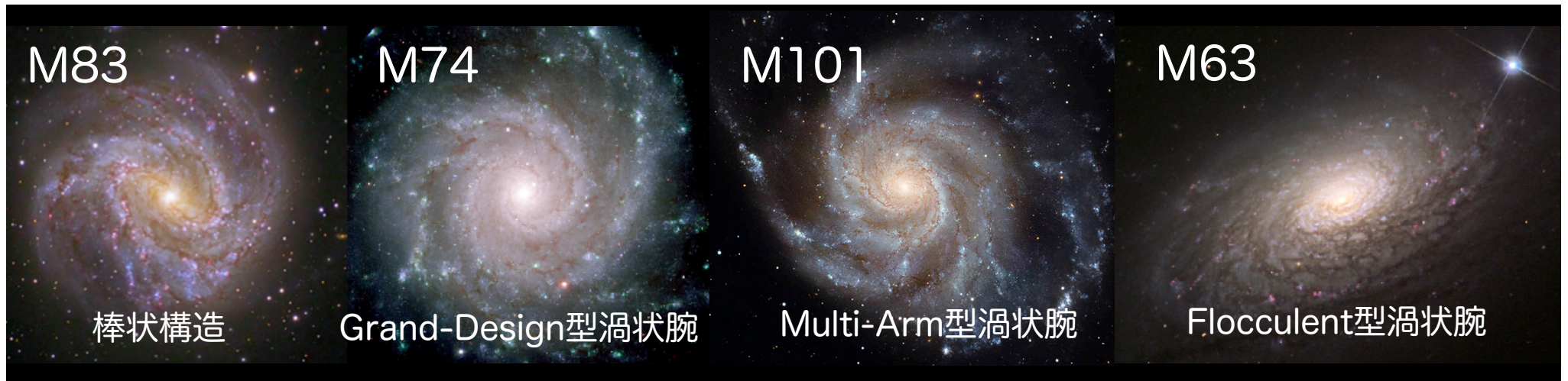
馬場淳一

東京工業大学 地球生命研究所

Earth-Life Science Institute (ELSI)

# 渦状腕の正体，発生・維持メカニズムは？

- どのように回転しているか？
- 持続時間はどのくらいか？
- 渦状腕の本数は何で決まるのか？(多様性の起源)
- ...etc.



# 渦状腕論争(1960's~) : 渦状腕 = 実体? or 準定常波?

Lin & Shu, ApJ, 140, 640, (1964)

ON THE SPIRAL STRUCTURE OF DISK GALAXIES

C. C. LIN AND FRANK H. SHU

Department of Mathematics, Massachusetts Institute of Tech

*Received March 20, 1964*



A. Toomre



C.C. Lin



F. H. Shu

There are at least two possible types of spiral theories. The first alternative is to associate every spiral arm with a *given body of matter*; e.g., such an arm might essentially be a tube of gas primarily constrained by the interstellar magnetic field. The difficulty with the disrupting influence of differential rotation in such a theory is well known. The various issues associated with this point of view have been thoroughly discussed recently by Oort (1962). The second alternative is to regard the spiral structure as a *wave pattern*, which either remains stationary, or at least quasi-stationary, in a frame of reference rotating around the center of the galaxy at a proper angular speed (possibly zero).

Toomre tends to favor the first of the possibilities described above. In his point of view, the material clumping is periodically destroyed by differential rotation and re-generated by gravitational instability. It is somewhat difficult to see how this mechanism alone can account for the *relatively regular spiral pattern over the whole disk* in most of the flat galaxies. The present authors favor the second point of view, i.e., that the matter in the galaxy (stars and gas) can maintain a density wave through gravitational interaction in the presence of the differential rotation of the various parts of

# Spiral Instability and Transient Spiral

Julian & Toomre (1966)

渦状腕 = 自己重力により形成された密度超過領域が差動回転で引き延ばされた構造。

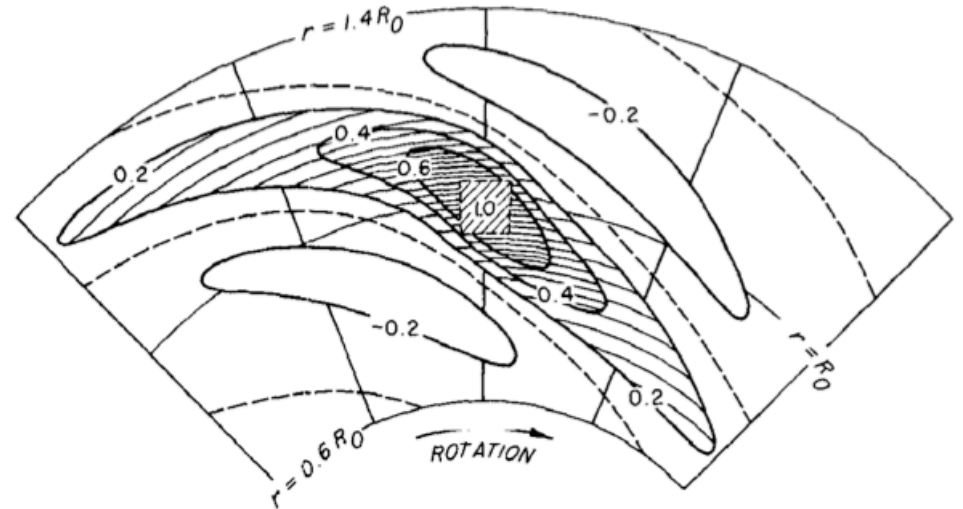
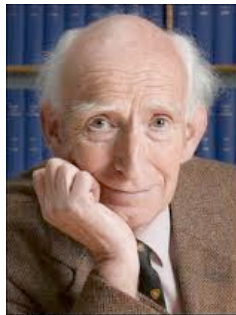


Figure 13 Wavelike ridge of excess density in a  $Q = 1.4$ ,  $V(r) = \text{const}$  disk of stars shearing past a small orbiting mass point (Julian & Toomre 1966). By comparison, that mass itself would yield unit density. **巻き込みの困難 (winding dilemma)** small-amplitude theory, an subsequent return to the original configuration, and by, stars have been neglected here. The same assumption that  $\lambda_{\text{crit}} = R_0$ , made only in the extent of this quasi-steady forced wave.



A. Toomre



D. Lynden-Bell

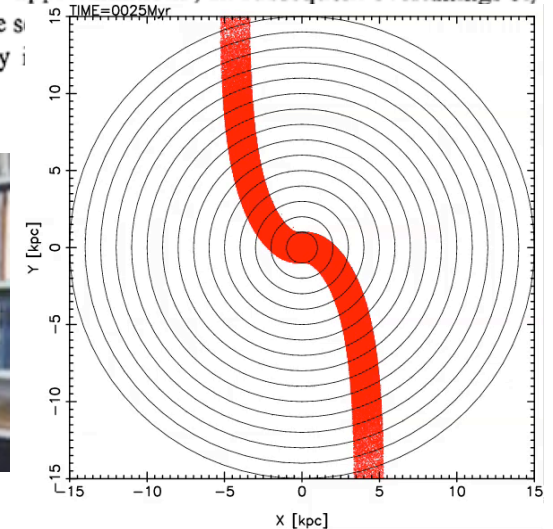


P. Goldreich

渦状腕を実体と考えると現実の渦巻銀河のゆるい巻き込みを説明できない。



J. Oort (1962)





C.C. Lin



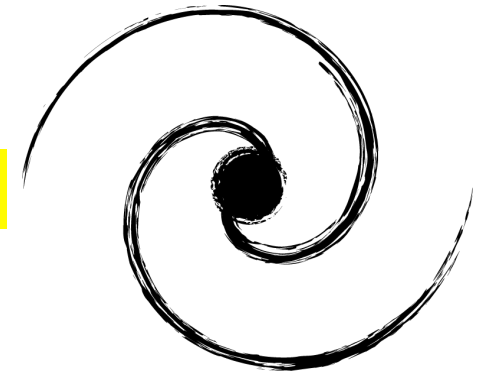
F. H. Shu

# 密度波仮説

Lin & Shu (1964; 1966)

## 渦状腕 = 恒星系円盤を伝わる定常波 (定常密度波)

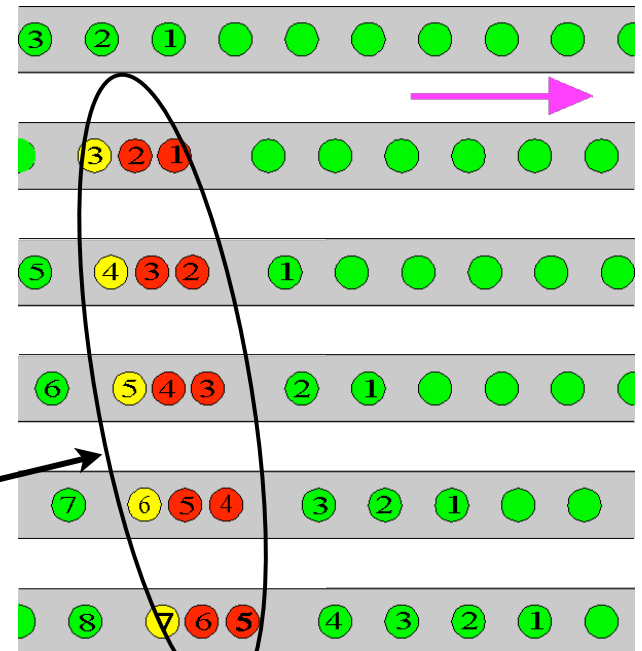
- 星の軌道の渋滞パターン(恒星系円盤を伝わる粗密波)
- 渦状腕を「中立安定 (neutrally stable) な波」と考える.
- self-consistentな分散関係 (振動数と波長の関係式) の導出
  - 銀河回転周期で変化しない”準定常”パターン(剛体回転)
  - 線形解析, 局所解析(Tight-Winding近似)



渦状腕領域の星の密度増加とそれにともなう重力ポテンシャルの変化をself-consistentに考慮した分散関係

$$\begin{array}{ccc}
 \delta\rho \implies (\text{Poisson eq.}) & \implies & \delta\Phi \\
 \uparrow & & \downarrow (\text{eq. motion}) \\
 \delta\rho' \longleftarrow (\text{continuity eq.}) & \longleftarrow & \delta v
 \end{array}$$

高速道路の渋滞(アナロジー)



注) 密度波理論では恒星系円盤を連続体とみなして波の分散関係を導出している. そのため, 渦状腕領域における星の軌道運動に関して定量的理論予言はできない.

渋滞箇所(=密度波)は構成する車(=星)が入れ替わりながらゆっくりと伝播する.

# 密度波の伝播と吸収・増幅

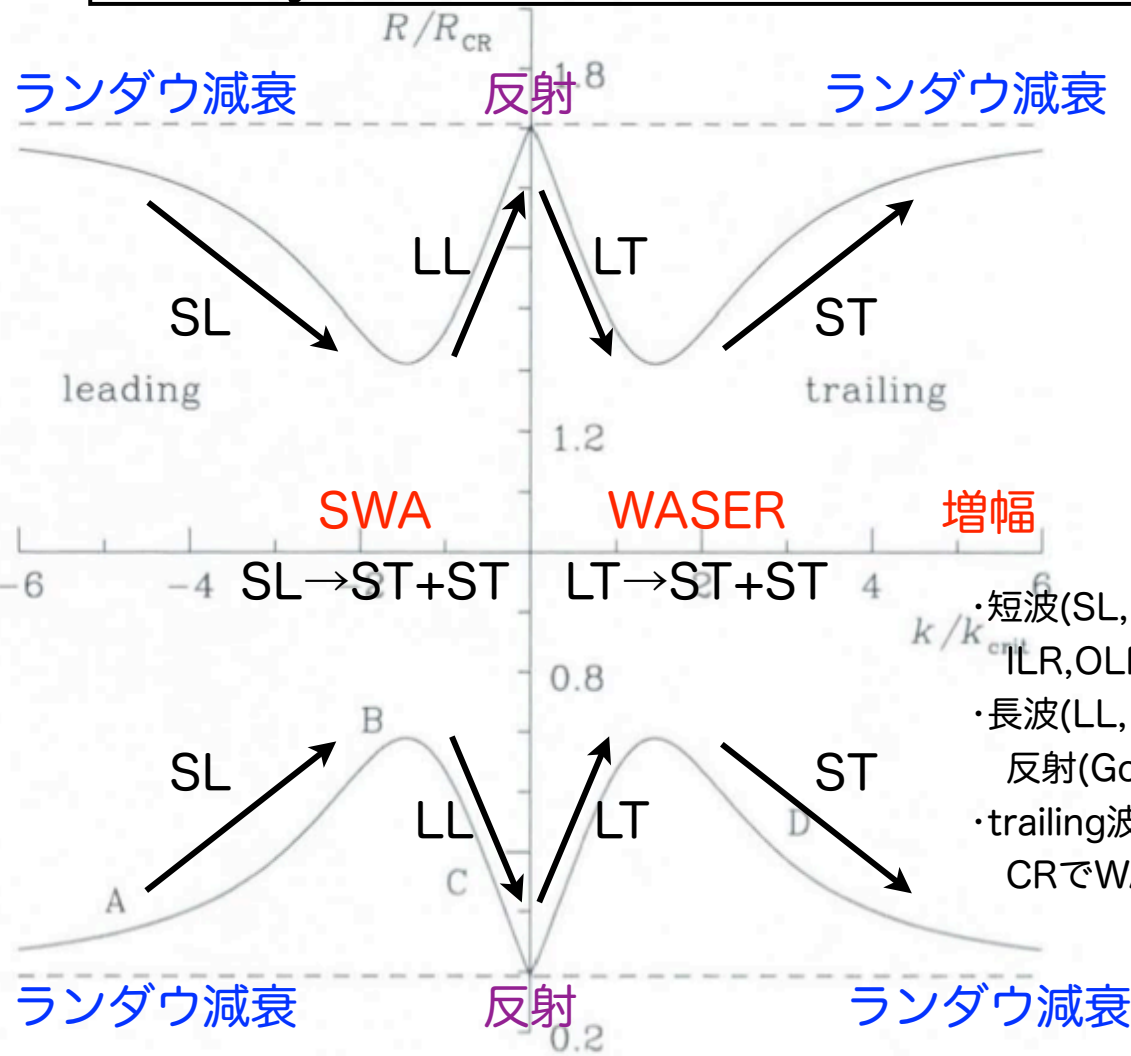
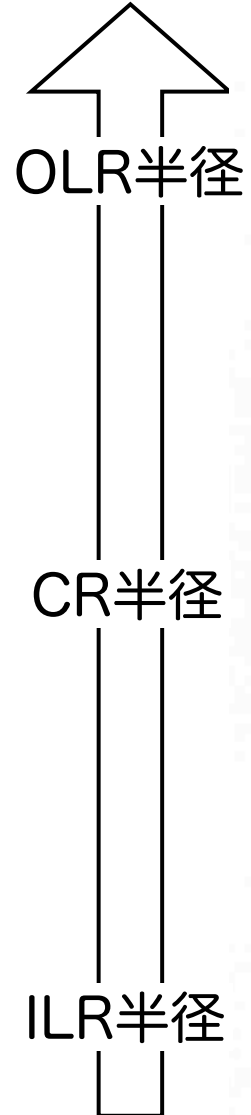
## A. Toomreの反論

Lin-Shuの密度波は銀河円盤内を動径方向に伝播し~1 Gyrで吸収され消える (定常仮定の破綻)



A. Toomre

銀河中心距離



P. Goldreich S. Tremaine

- ・短波(SL, ST) :  
ILR, OLRでランダウ減衰(Mark 1974)
- ・長波(LL, LT) :  
反射(Goldreich & Tremaine 1978, 1979)
- ・trailing波(LT→ST) :  
CRでWASERによる増幅 (Mark 1974)

# 大局振動モード理論 (定常波)

Bertin et al. (1989a,b)

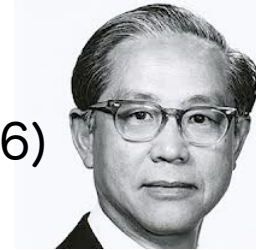
Feedback :

Qバリアによる反射 (Mark 1976; Lau et al. 1976)

→ILRにおける吸収減衰を回避

Overreflection :

CRにおけるWASER増幅 (Mark 1974)



C.C. Lin

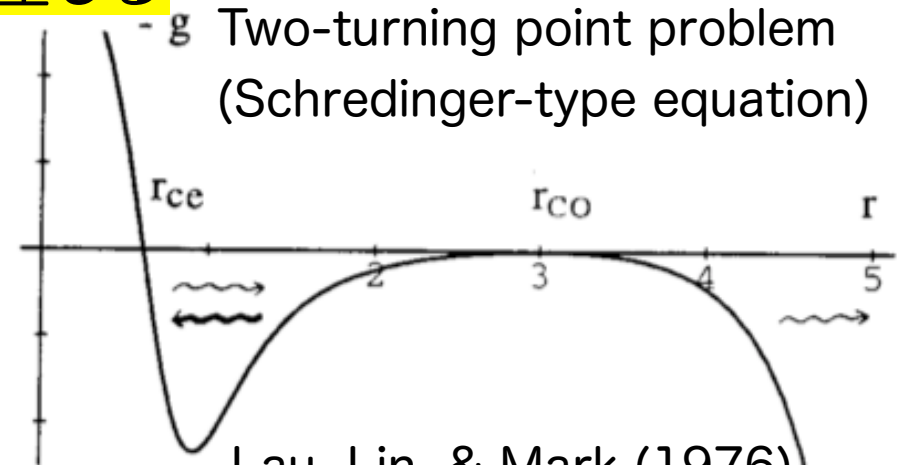
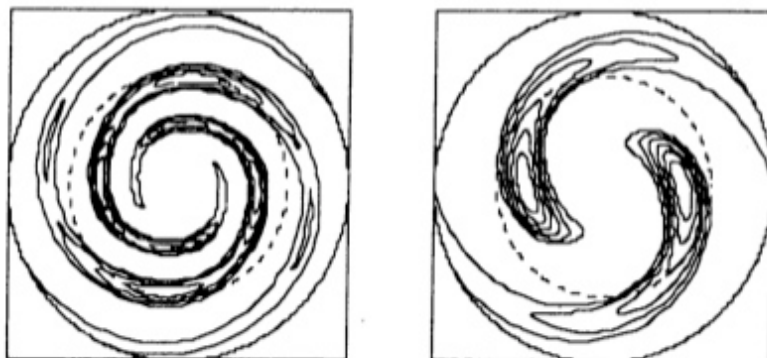
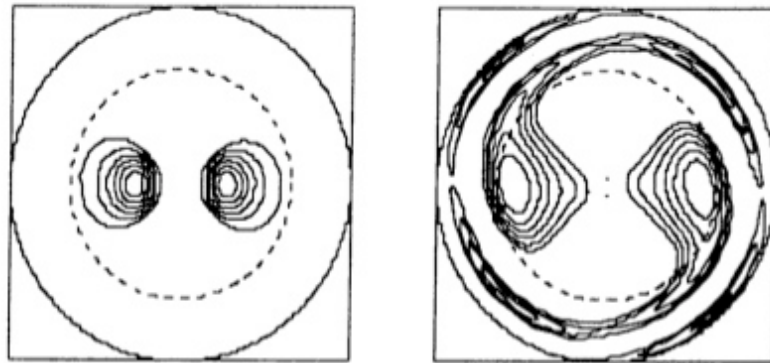


Y.Y. Lau

G. Bertin

J.W.-K. Mark

→ 最終的に $R_{ILR}-R_{CR}$ の領域に「定常波」が生じる



Two-turning point problem  
(Schredinger-type equation)

Lau, Lin, & Mark (1976)

Bertin et al. (1977)

Bertin (1983)

Bertin et al. (1984)

Bertin et al. (1989a,b)

Bertin & Lin (1996)

# 大局不安定モード

渦状腕=銀河円盤の大局的『不安定』振動モード

Iye (1978) ←家さんのD論

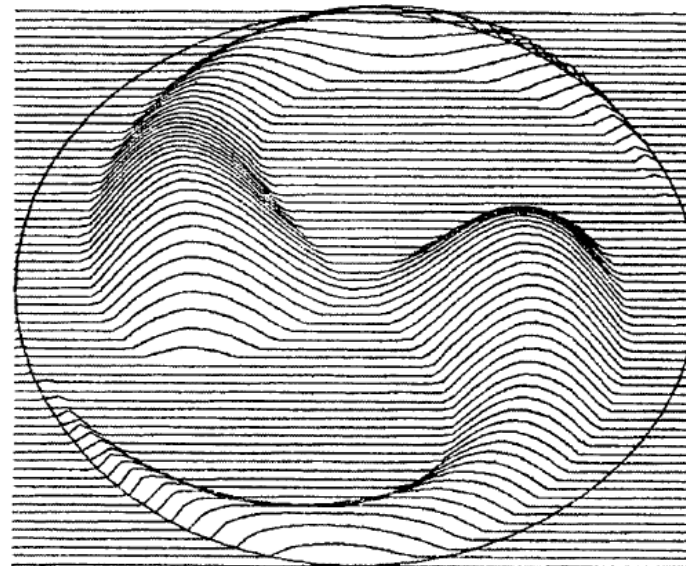
Aoki, Noguchi, & Iye (1979) ←野口さんの修論



M. Iye



M. Noguchi



※家さんは銀河円盤の振動解析から能動光学や補償光学の研究へ

※野口さんはN体シミュレーションによる円盤銀河の形成進化の研究へ



ここまでの論争は線形理論 (解析的理論)  
しかし、実際の渦巻銀河は非線形構造  
定常密度波は実在するのだろうか？  
→ 数値シミュレーションによる検証

# “Self-Excited” Grand-Design?

Thomasson et al. (1990);

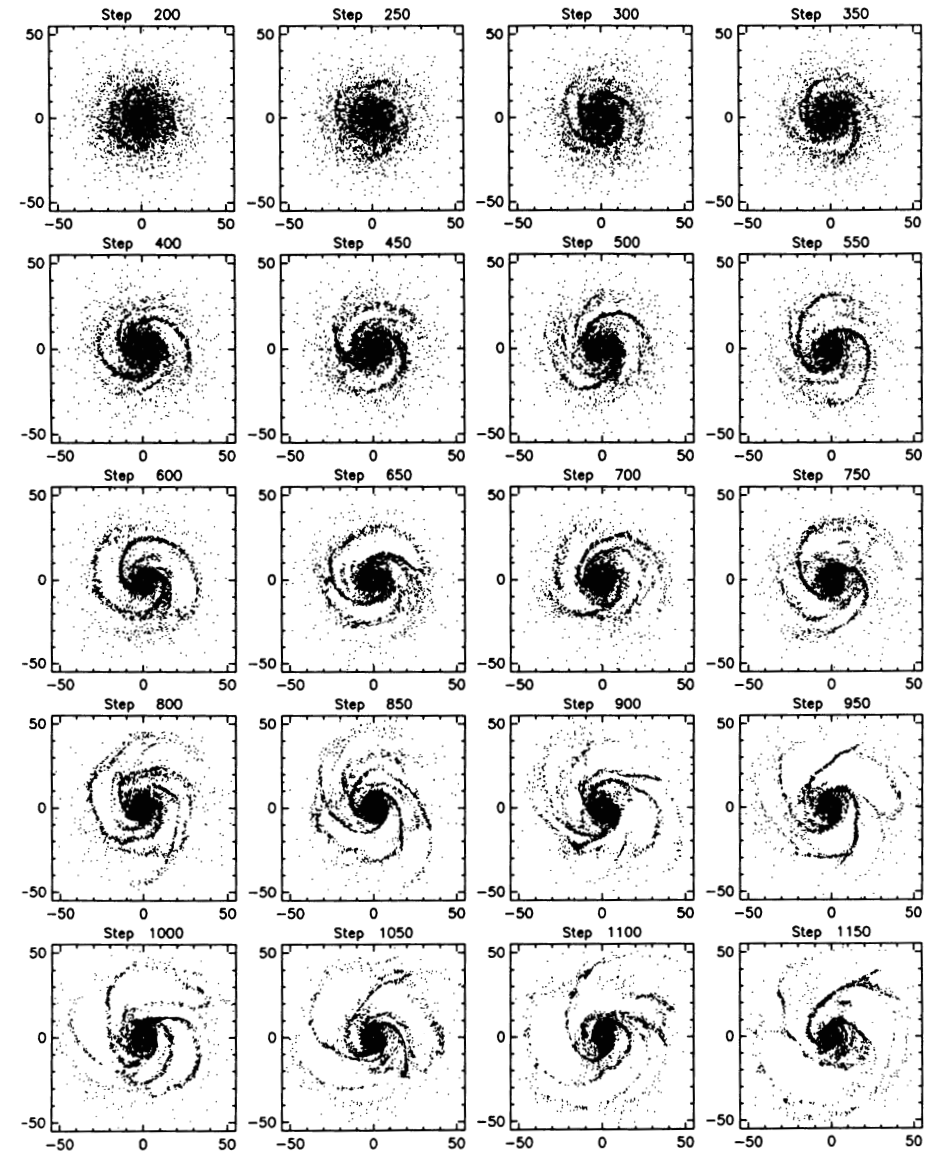
Elmegreen & Thomasson (1993)

数銀河回転の間維持される準定常的な grand-design spiral が再現できた! ?  
(=Lin-Shu-Bertinの密度波理論がシミュレーションで検証された!?)

## J. Sellwoodによる反論

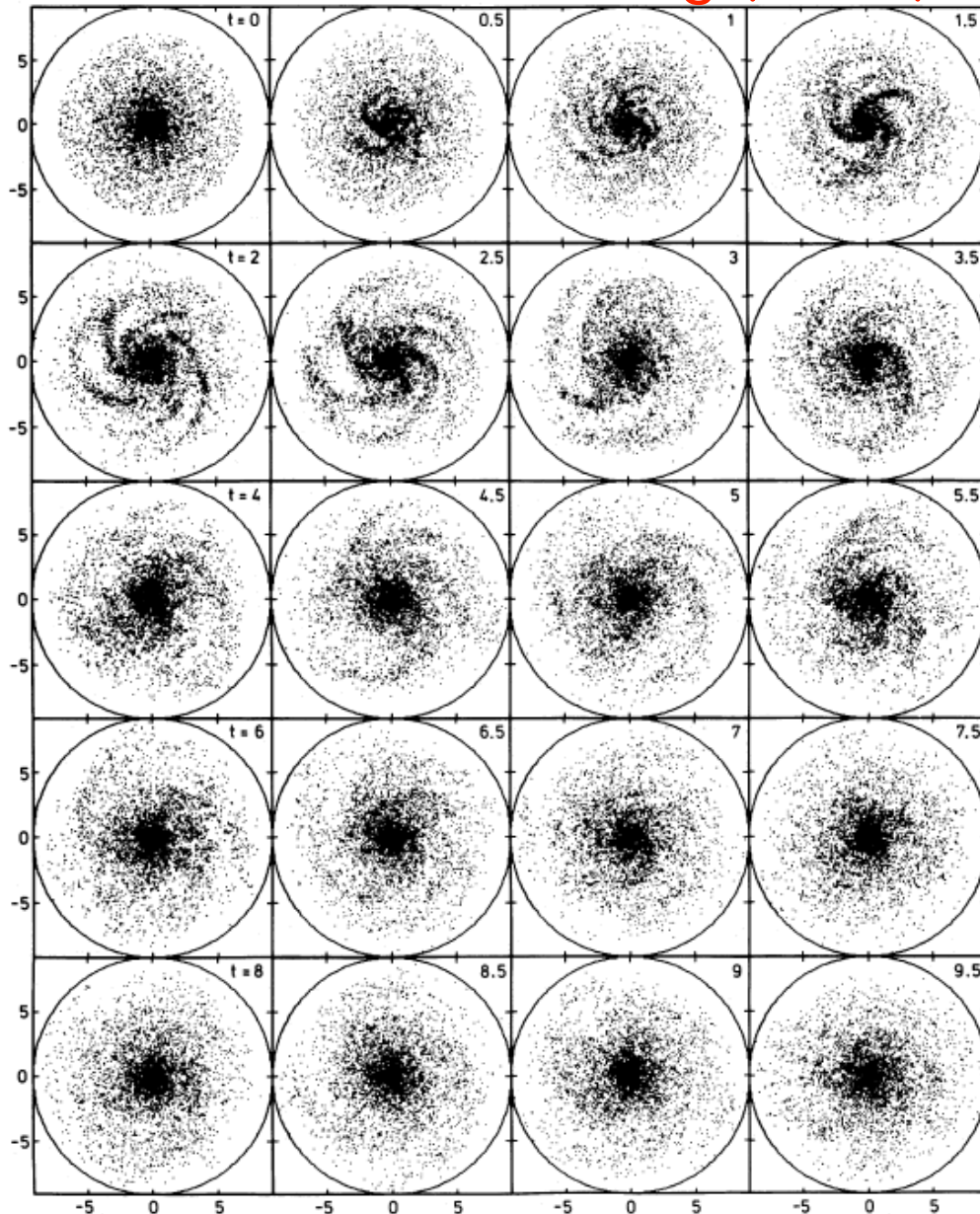
MNRAS. 410, 1637–1646 (2011)

Claims of long-lived spiral waves (e.g. Thomasson et al. 1990) have mostly been based on simulations of short duration. For example, Elmegreen & Thomasson (1993) presented a simulation that displayed spiral patterns for  $\sim 10$  rotations, but the existence of some underlying long-lived wave is unclear because the pattern changed from snapshot to snapshot. Other claims are equally doubtful, as I show next.



# Transient Recurrent Spiral

Sellwood & Carlberg (1984)



- 2D N-body,  $N=3k$
- Pure Stellar Disk.



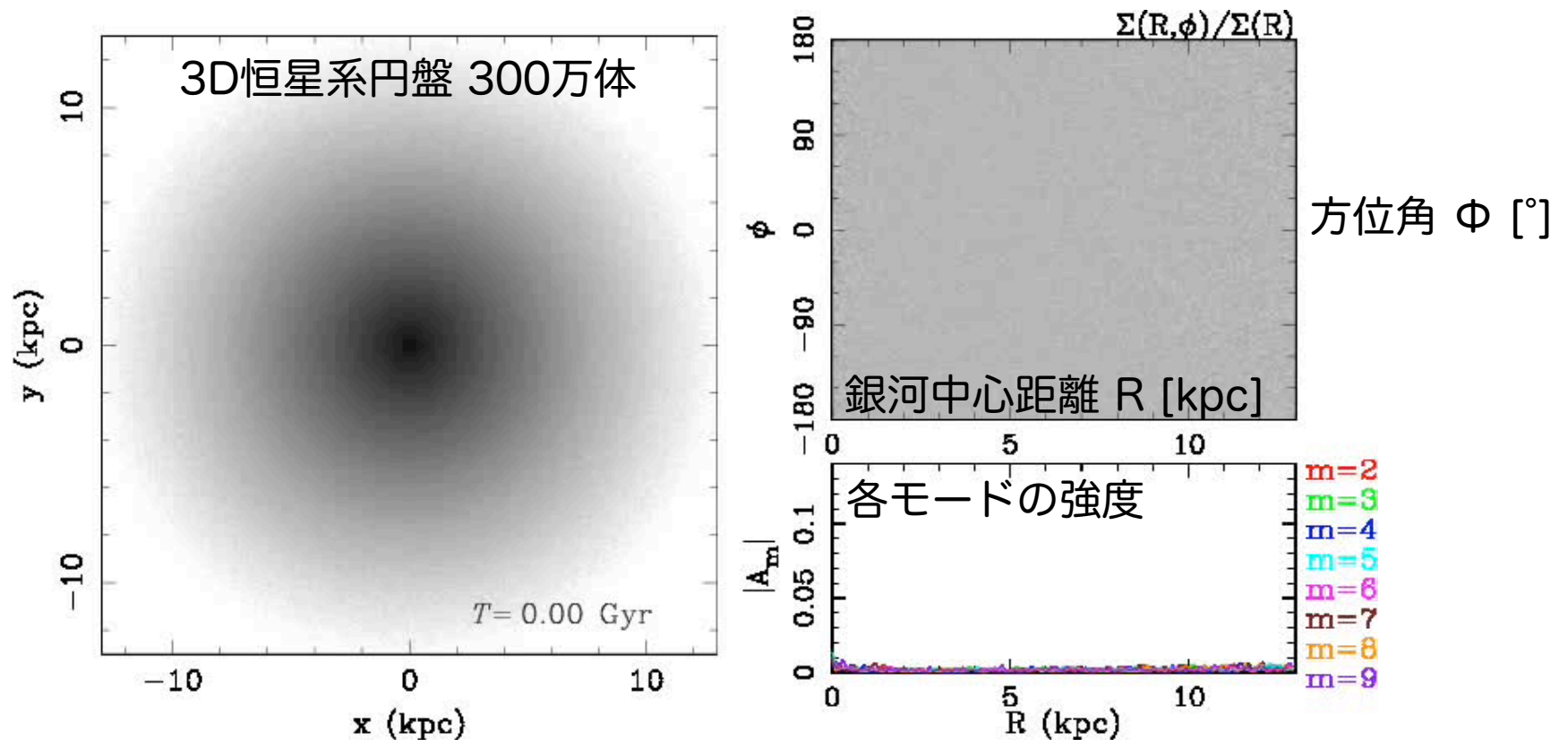
J. Sellwood

- multiple armは恒星系円盤の重力不安定に関連して自然に現れる構造.
- spiralは形成・破壊を繰り返す.
- しかし、その変動性は $\sim 10$ 回転程度で終わる.
- 渦状腕維持には恒星系円盤を力学的に冷やす”散逸成分 (ISM)” が必須.

# 恒星系渦状腕の変動性

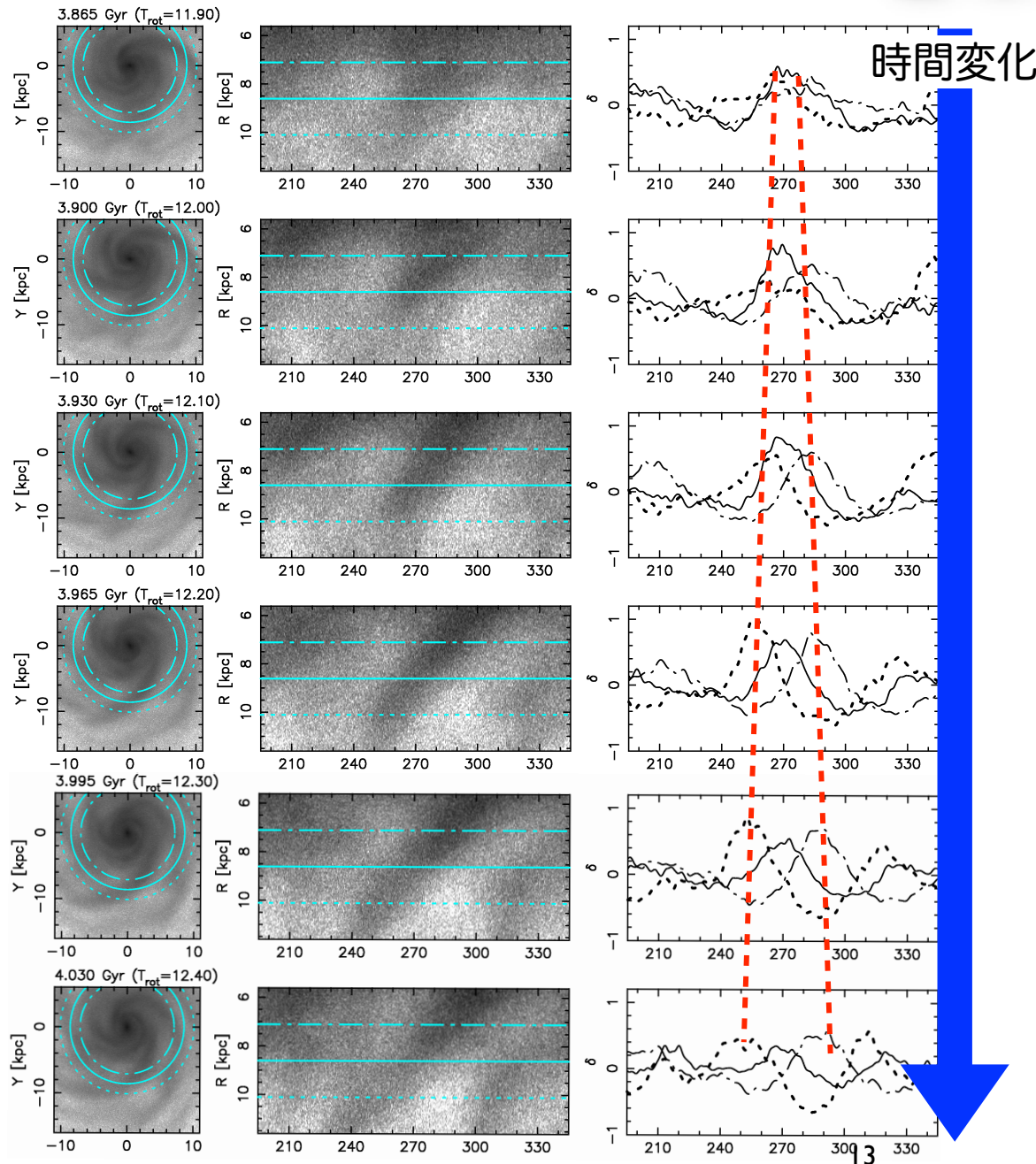
Fujii, Baba, et al., ApJ, (2011)

- 自己重力により自発的に渦状腕が発生.
- 個々のスパイラルは銀河回転周期(～数100Myr)で合体-分裂を繰り返す.
- しかし, 変動性は10Gyr以上維持される (←3D・大粒子数が必須).



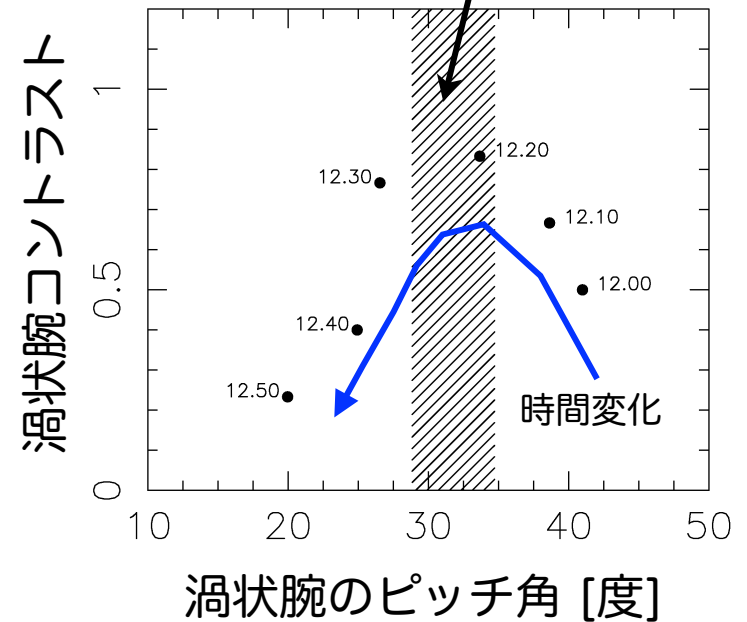
# 恒星系渦状腕の巻き込みと増幅

Baba et al., ApJ, (2013)



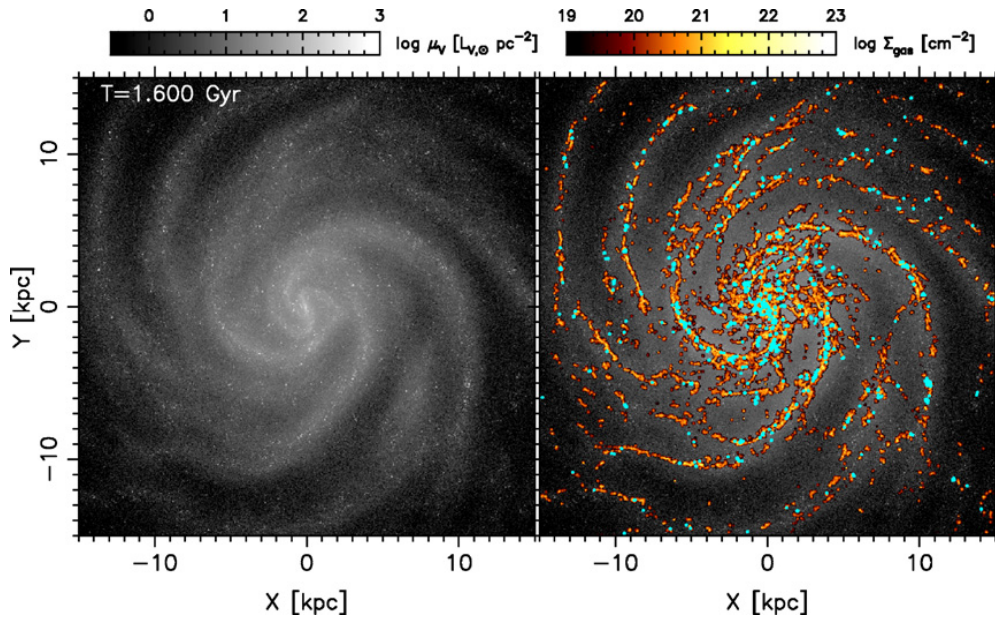
渦状腕は巻き込まれながら一時的に強く ( $T_{\text{rot}} \sim 12.2$ ) なり、その後減衰する ( $T_{\text{rot}}=12.4$ ).

Swing amplification理論  
が予言するピッチ角の値



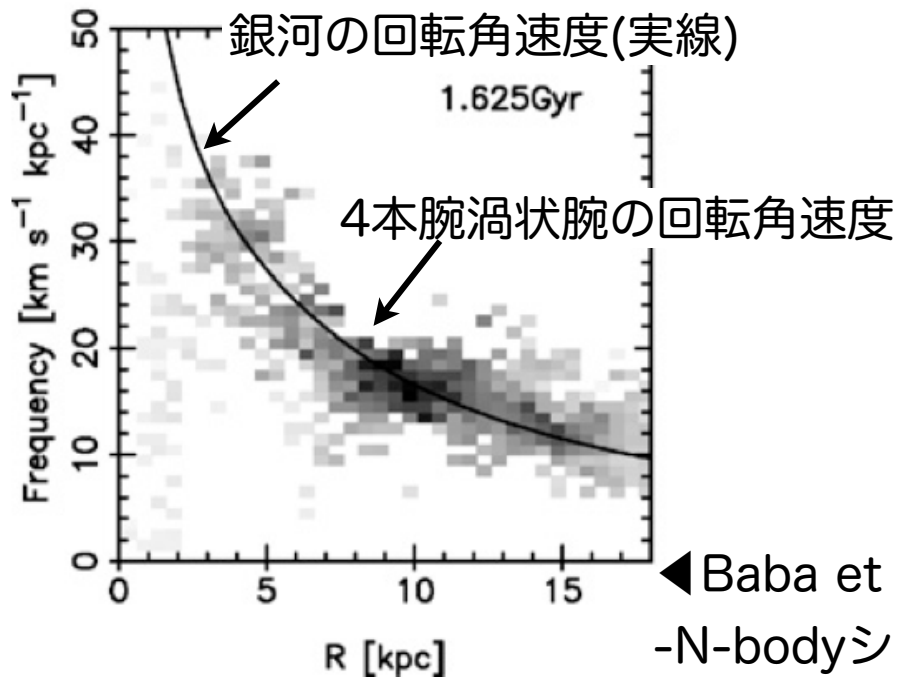
銀河回転のシア強度に依存して渦状腕の最大強度となるピッチ角が決まる。

# 渦状腕の差動回転



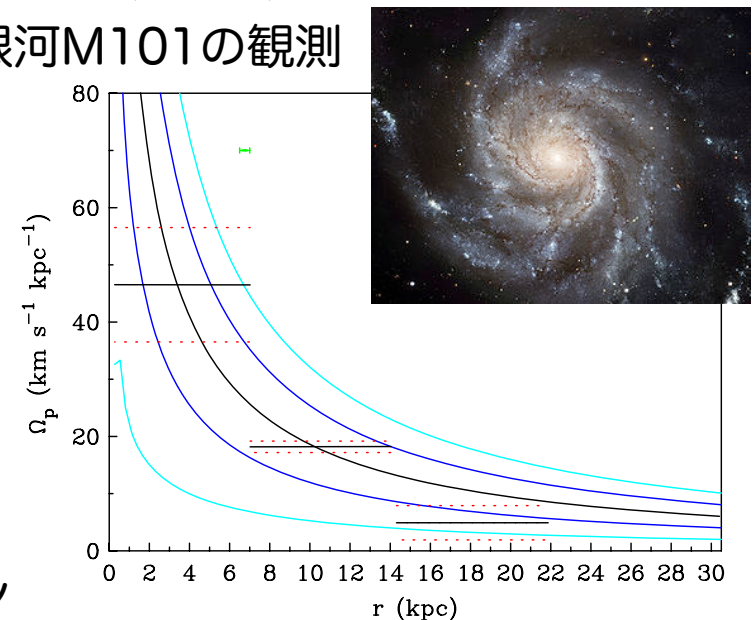
渦状腕は銀河回転角速度に沿うように差動回転している。

- ◀ Wada, Baba & Saitoh (2011)
  - N-body/SPHシミュレーション with ASURA
  - 重力相互作用・多相星間ガス・星形成・超新星爆発



- ◀ Baba et al. (2013)
  - N-bodyシミュレーション

- ▼ Meidt et al. (2009)
  - 渦巻銀河M101の観測

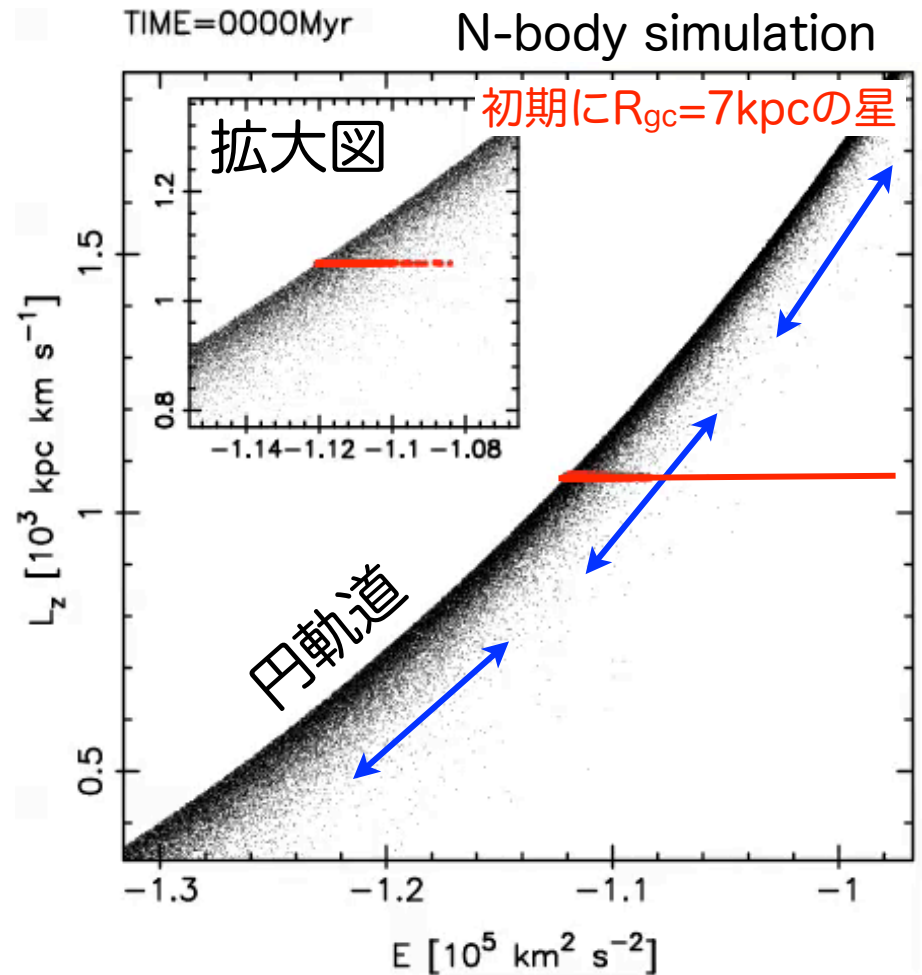
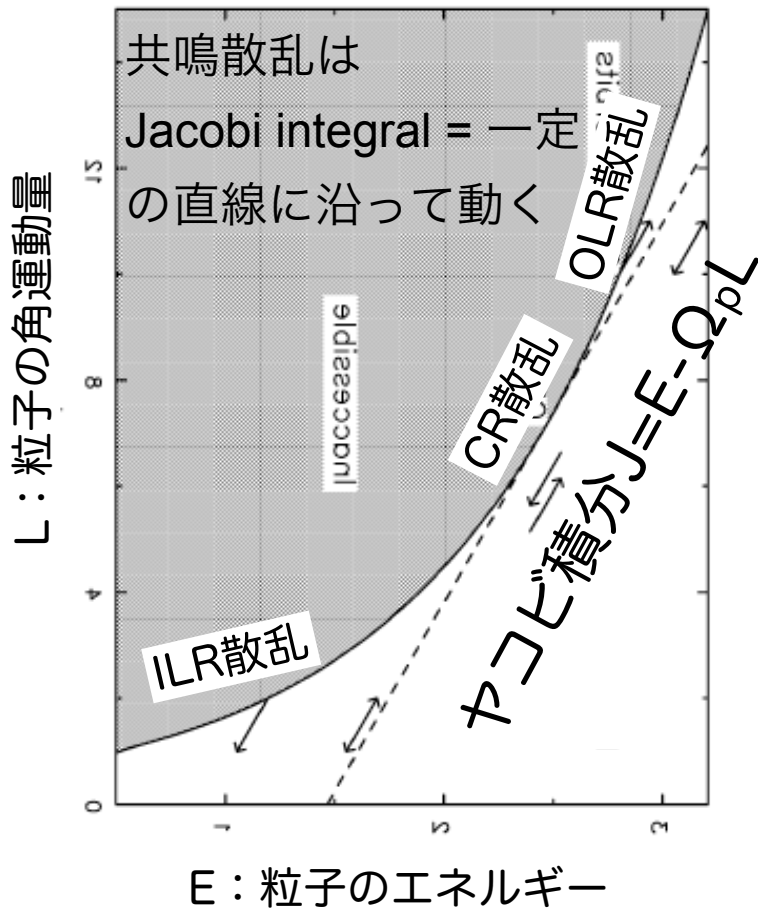


# なぜ差動回転渦状腕が維持されるのか？

渦状腕は $\Omega_{sp} \sim \Omega_{rot}$ なので、広い半径範囲で星の散乱はCR共鳴  
 → 散乱後にランダムエネルギー(Q)をあまり増さない。

Lynden-Bell & Kalnajs (1972)  
 Sellwood & Binney (2002)

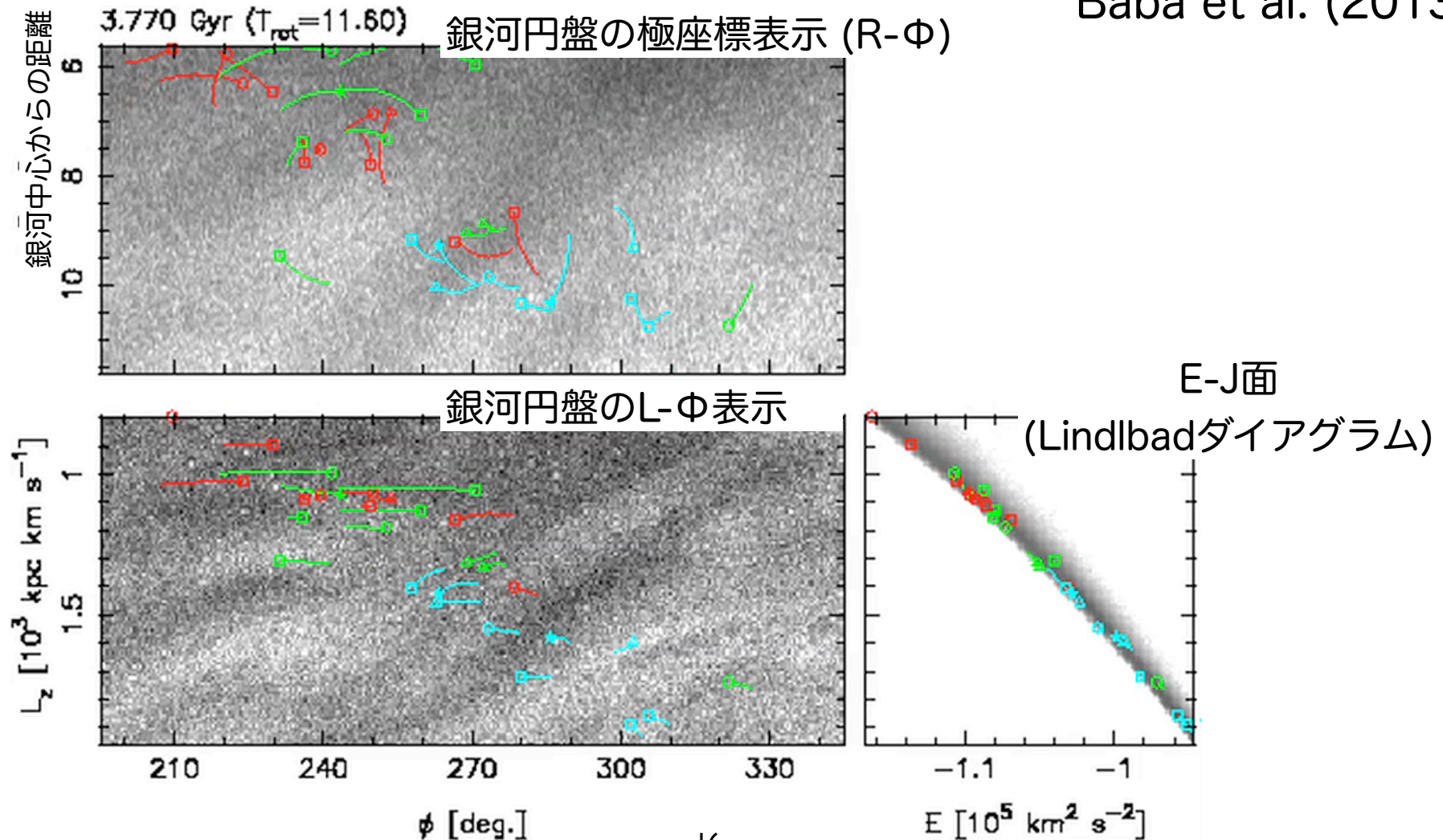
Baba et al. (2013)  
 N-body simulation



# 渦状腕を構成する星の集団運動 (協同現象)

星が集団で収束・拡散することで渦状腕は形成・破壊を繰り返す (非線形物理・協同現象) → 動的平衡構造

Baba et al. (2013)





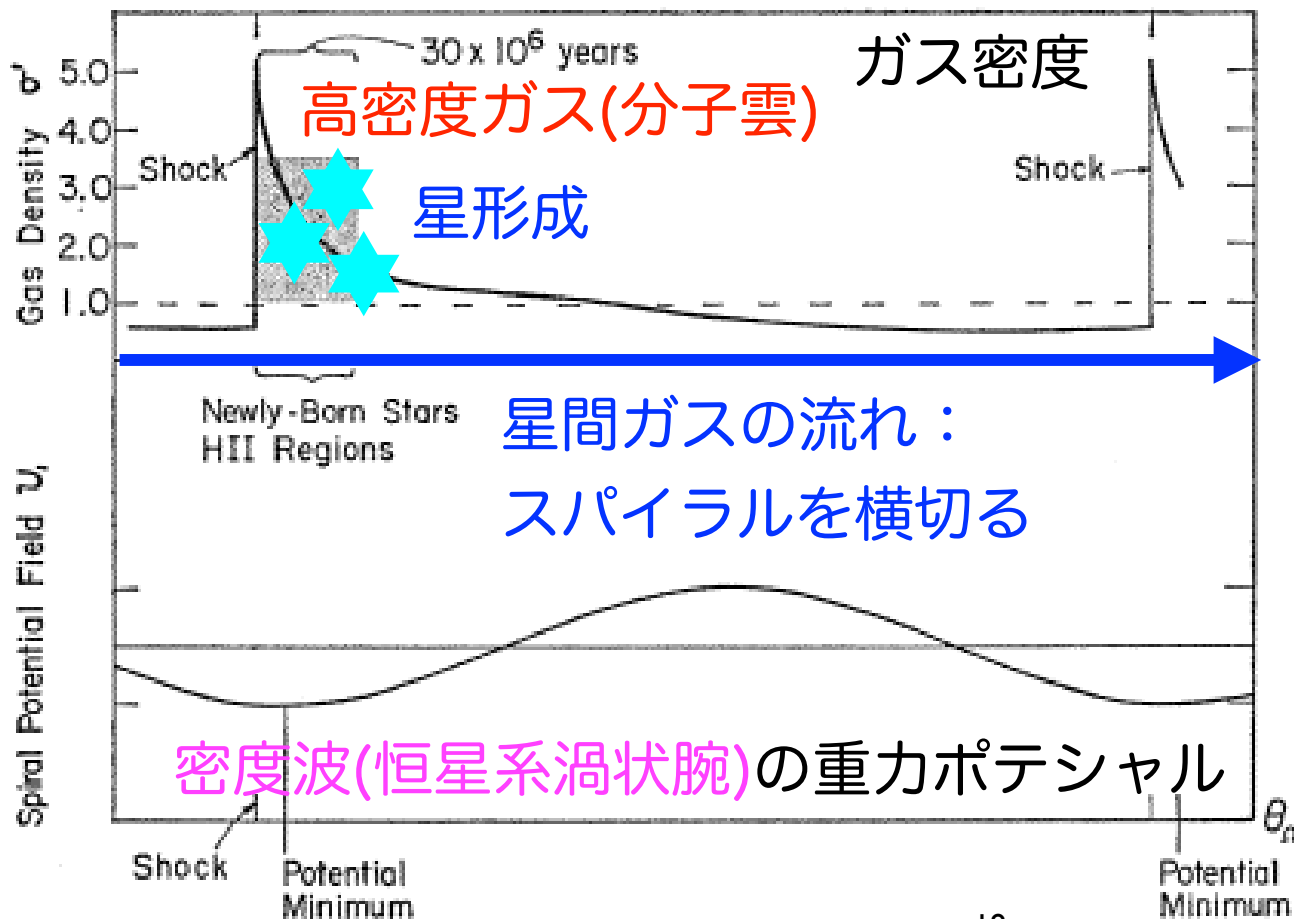
動的平衡渦状腕の場合、  
星間ガスはどのように振る舞うのか？  
銀河衝撃波は実在するのか？  
どのように観測的に検証できるか？

# 密度波と銀河衝撃波

藤本光昭 (1968); Roberts (1969)

渦状腕を横切る方向に星間ガスの速度場や熱相,  
星年齢が変化

## 銀河衝撃波



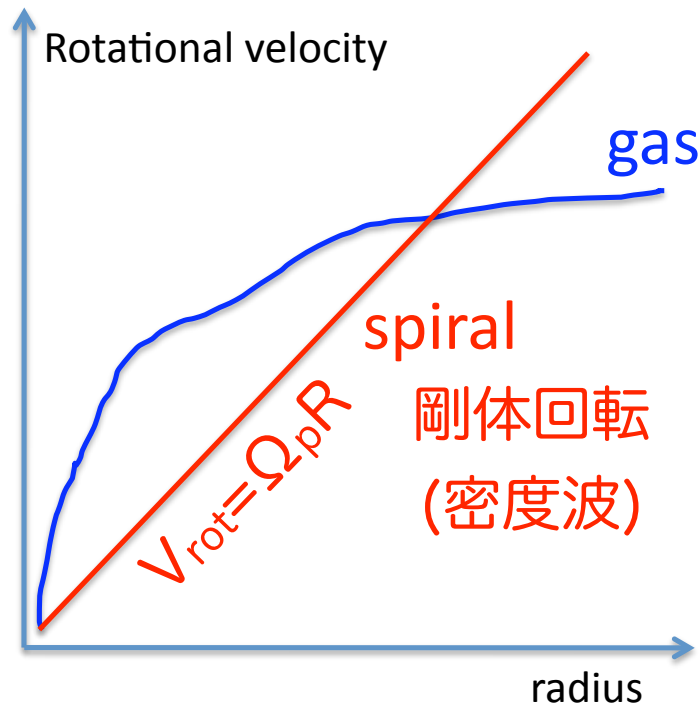
渦状腕の重力ポテンシ  
ヤルにより運動が乱れ  
る(銀河衝撃波)

銀河衝撃波の下流で星  
間ガスが圧縮(分子雲)

渦状腕に沿った星形成

# 銀河回転と恒星系渦状腕

## 伝統的描像(密度波)

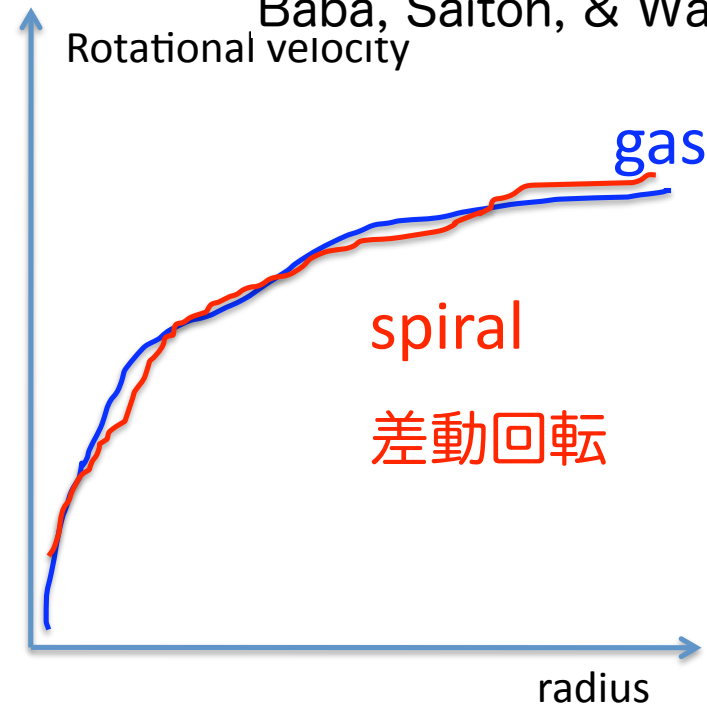


ガスは渦状腕に対し  
超音速

## 新たな描像

Wada, Baba, & Saitoh (2011)

Baba, Saitoh, & Wada (2013)

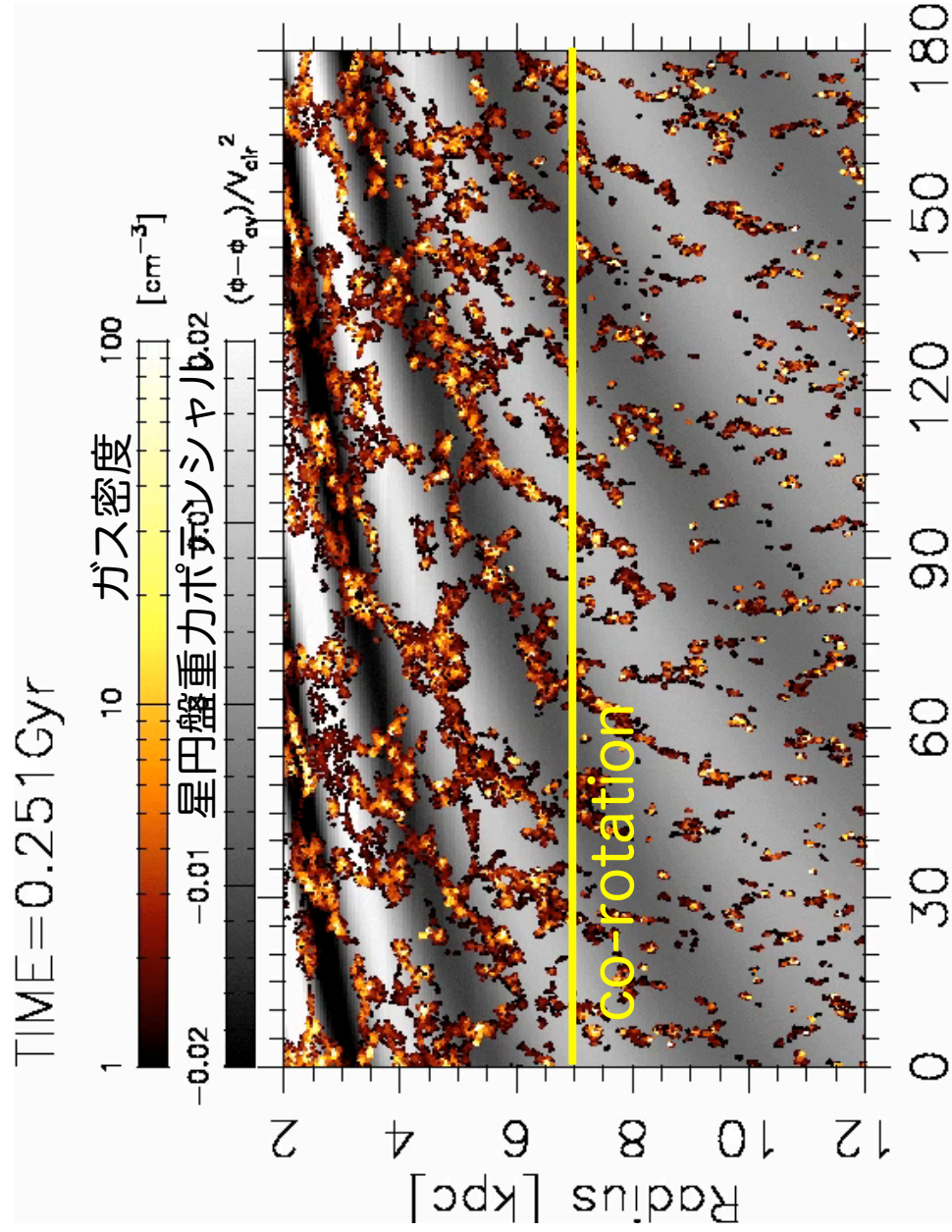


ガスは渦状腕に対し  
亜音速

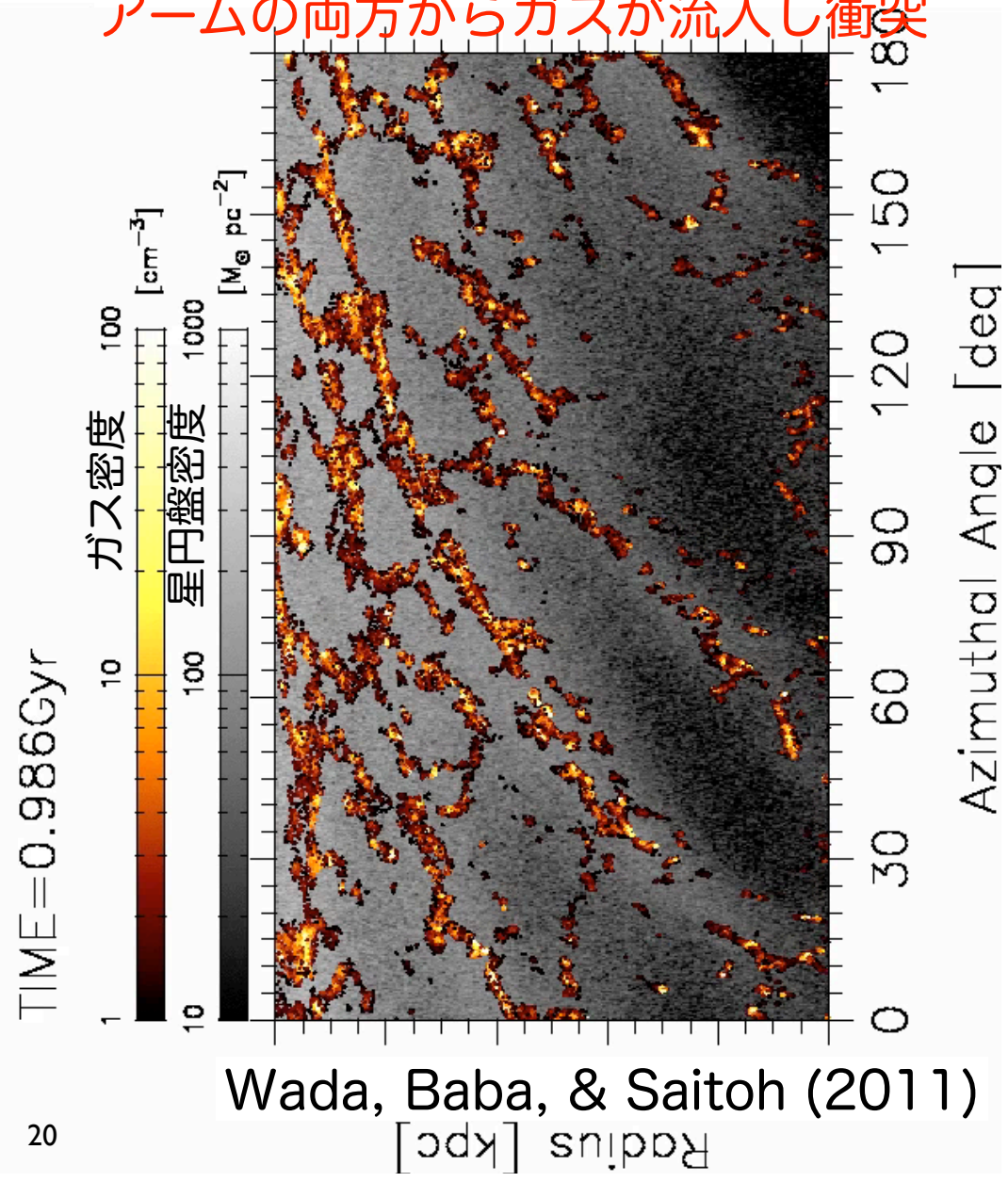
# 非定常渦状腕におけるガスの運動：二次元

定常密度波

動的平衡渦状腕



アームの両方からガスが流入し衝突



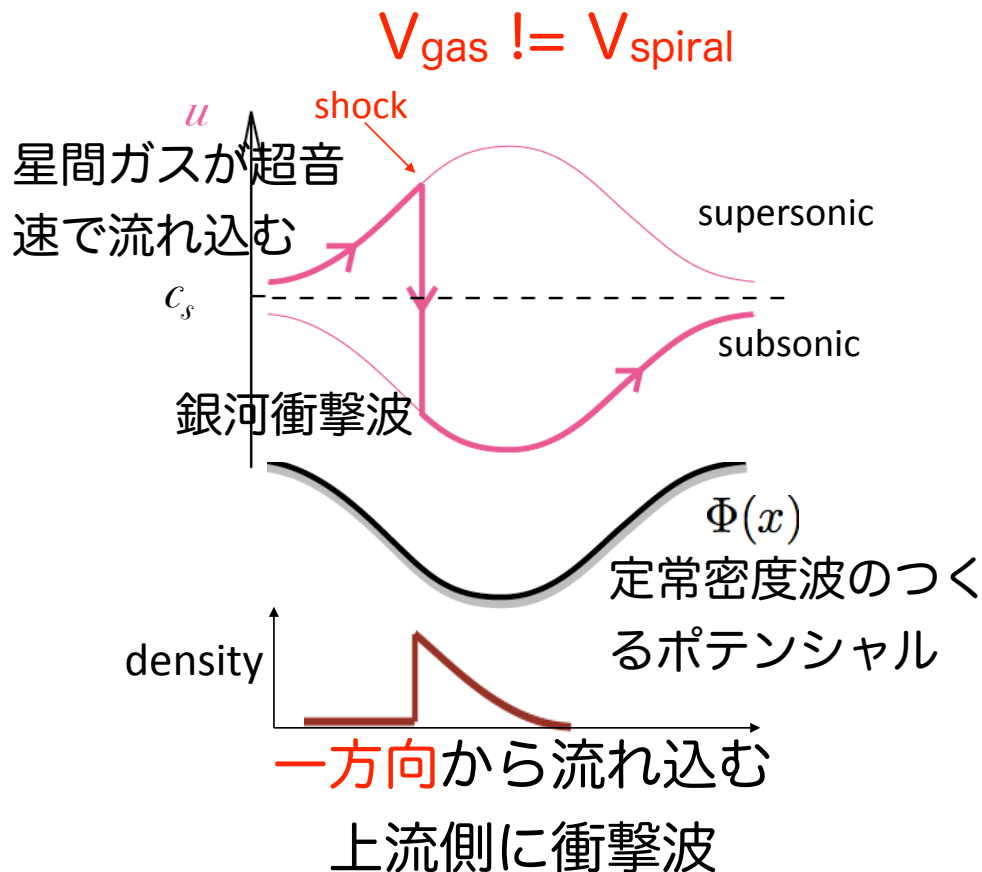
Wada, Baba, & Saitoh (2011)

# 非定常渦状腕におけるガスの運動：一次元

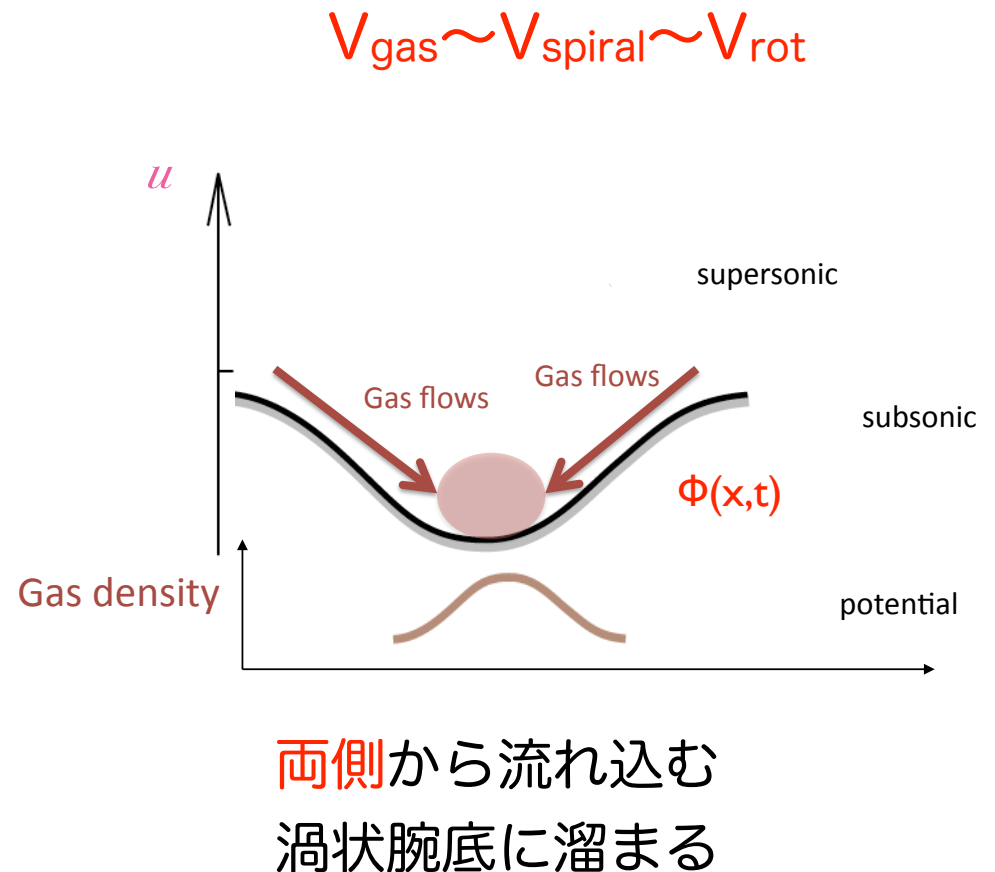
Wada, Baba, & Saitoh (2011)

渦状腕の起源によって周辺ガスの運動が異なるはず

伝統的描像(銀河衝撃波)



新たな描像



# まとめ：孤立系/unbarred銀河渦巻=動的平衡構造

## ◆渦状腕構造論：半世紀の論争

密度波理論 (定常渦状腕) vs.

Lin, Shu, Bertin, Lau

↓ N体/SPHシミュレーションによる支持

Baba+2009

transient recurrent spiral

Fujii, Baba+2011

Toomre, Lynden-Bell, Sellwood

Wada, Baba, Saitoh 2011

Baba+2013

Grand+(2012a,b)

## ◆動的平衡渦状腕の特徴

-散逸成分(星間ガス)がなくとも長期的に続く (Fujii, Baba+2011)

-Sellwood & Carlberg (1984)の結果は小粒子数・2Dが問題か(?)

→渦状腕ダイナミクスの理解には3次元大粒子数シミュレーション必須

-Swing増幅機構 + stellar radial migrationが重要 (Baba+2013)

-「巻き込まれる」ことが本質的に重要！

-渦状腕による散乱は星の速度分散をあまり上昇させない。

## ◆残された課題 see レビュー論文：Dobbs & Baba (in prep.)

-星の集団運動の起源 → 非線形結合する振り子の同期現象 (非線形物理)

-動的平衡渦状腕理論の観測的検証 → 渦状腕周辺のガスの運動状態の違い

-渦状腕進化におけるISMの役割

-tidal-induced spiral, barred spiralのダイナミクス