

渦巻きの新描像： 動的構造とその観測的検証

和田 桂一

鹿児島大学

協力： 馬場淳一（国立天文台）

関連論文

Baba, Morokuma-Matsui, Saitoh (2017) MNRAS 464, 246

**Baba, Morokuma-Matsui, Miyamoto, Egusa, Kuno (2016)
MNRAS 460, 2472**

Dobbs, Baba (2014) PASA 31, 35 レビュー

Baba, Wada, Saitoh (2012) ApJ 763, 46

Wada, Baba, Saitoh (2011) ApJ 735, 1

Fujii, Baba, Saitoh, Makino, Kokubo (2011) ApJ 730, 109

Baba, Saitoh, Wada (2010) PASJ 62, 1413



まずは教科書的な描像

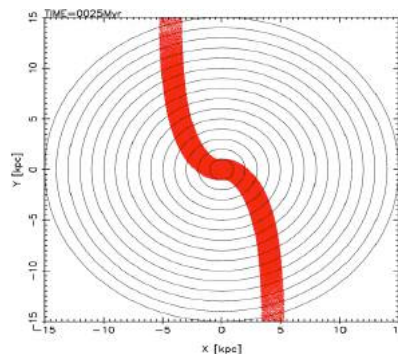
3



曰く、銀河渦巻 = 定常密度波



the “winding dilemma”を避ける事ができる

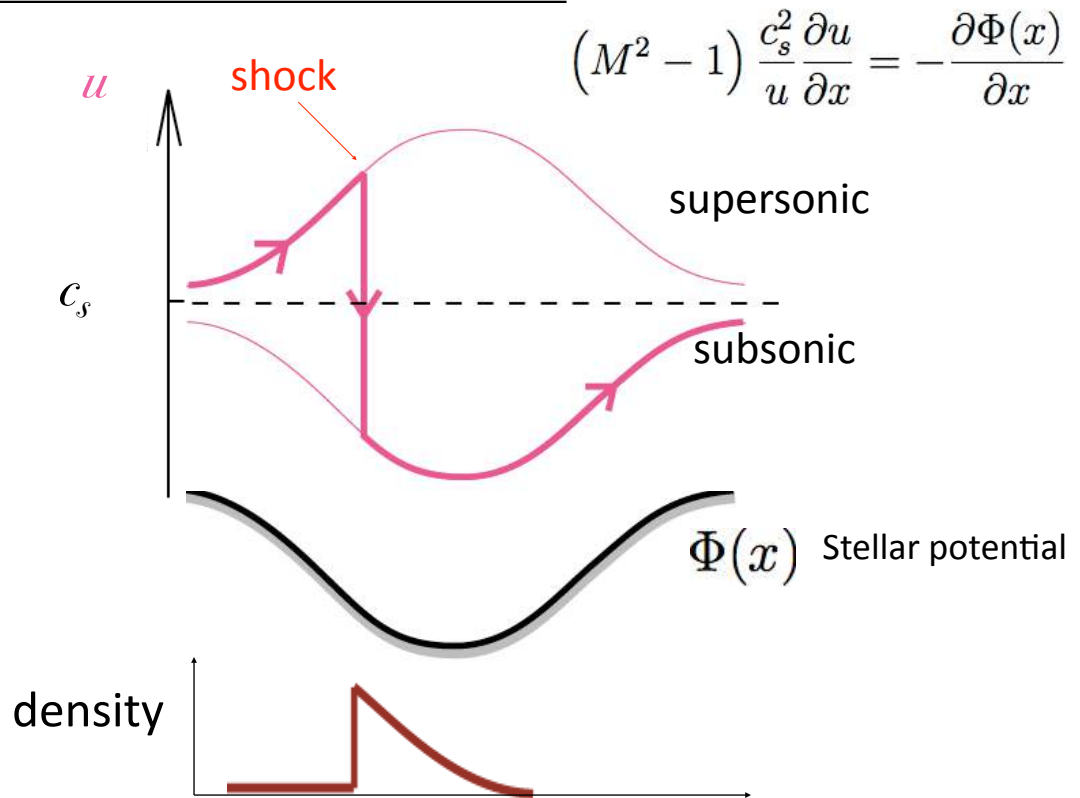


You need a ‘feedback loop’ to get long-lived, stable spiral density waves:

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

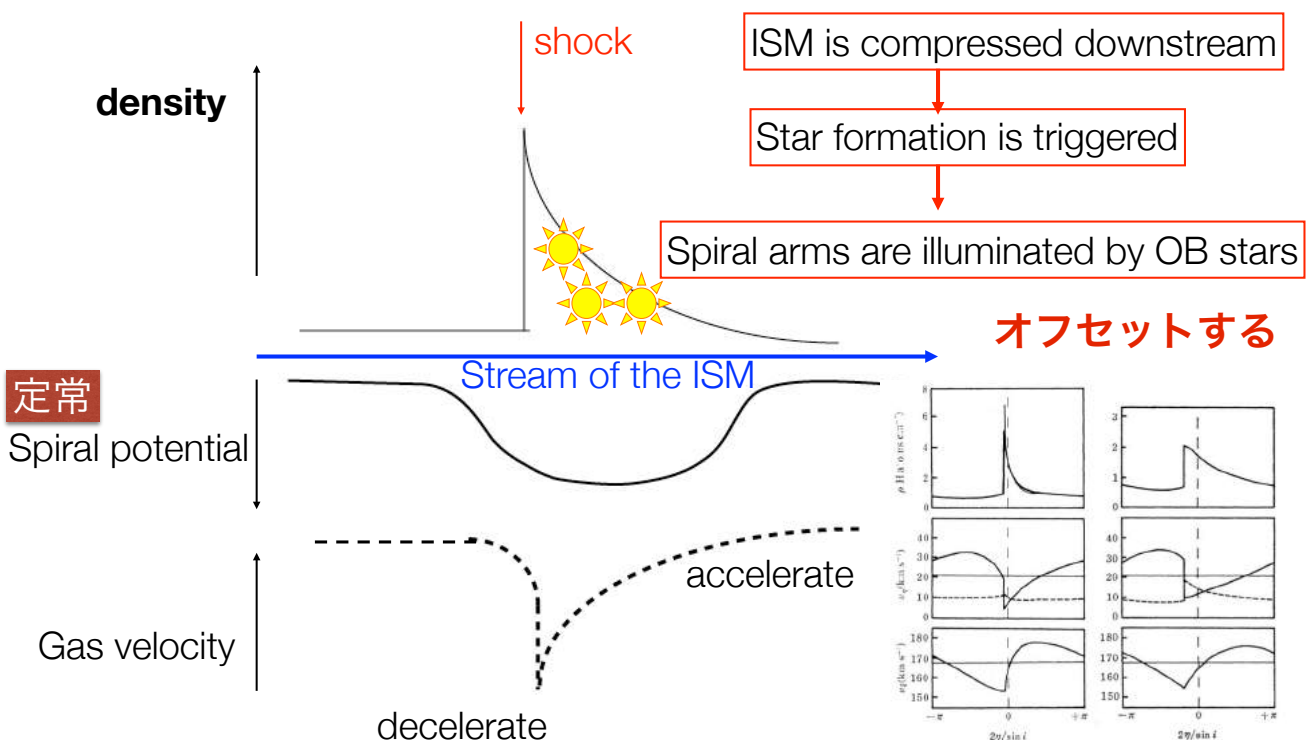
定常密度波が渦状ポテンシャルをつくり、超音速ガスが流れると、、、

Conventional galactic shock



銀河衝撃波 (Fujimoto 1968; Roberts 1969) と星形成

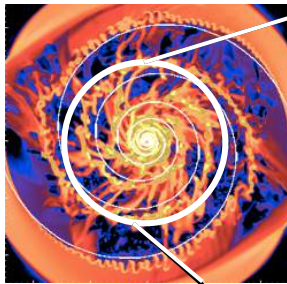
渦巻きが”きつく巻いた近似”で60-70年代いろいろ調べられた



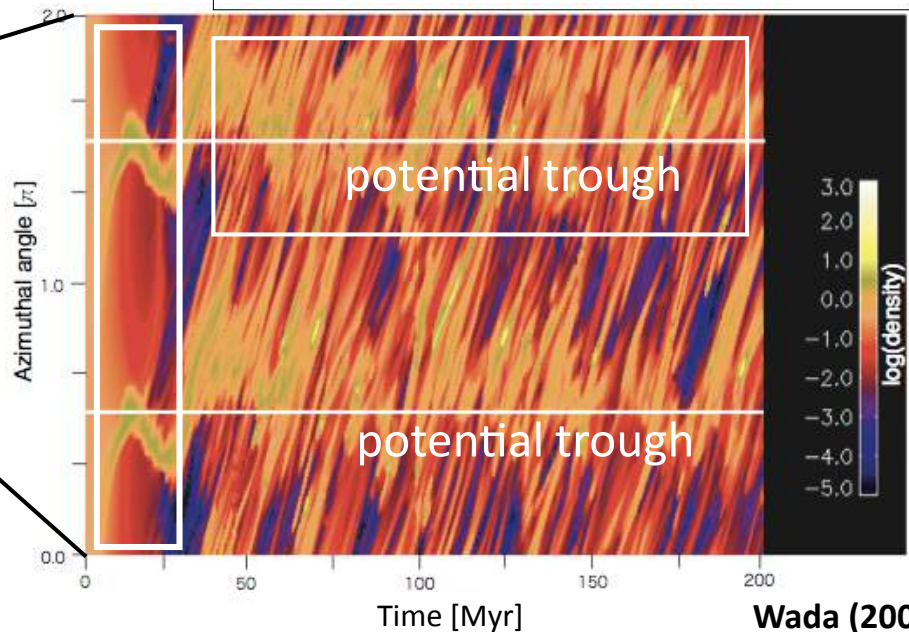
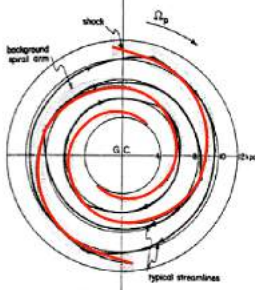
ISMは一様・等温ではない 3D, 自己重力 + cooling/heating

Classic 'galactic shock'

→ inhomogeneous quasi-steady arms
+ inter-arm substructures



Roberts 1969



Inhomogeneous arms are loosely associated with the background spiral potential.

7

static spiral potential = 定常密度波

現実的なのか？

半世紀前の論争

ApJ 140, 640 (1964)



ON THE SPIRAL STRUCTURE OF DISK GALAXIES

C. C. LIN AND FRANK H. SHU

Department of Mathematics, Massachusetts Institute of Technology

Received March 20, 1964



Toomre: spiral = 実体、差動回転によって壊され、重力不安定で再生される

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

Lin&Shu: disk 全体でregularなspiralをつくるのは難しい → density wave

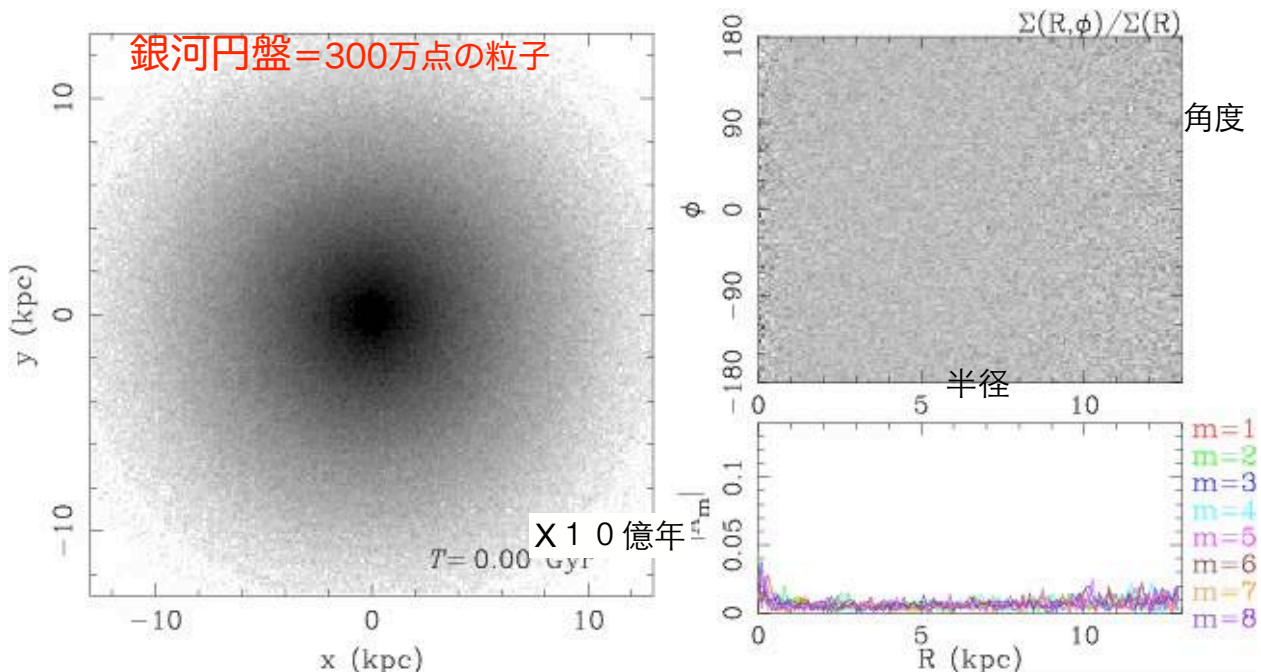
Toomre(1969) : 動径方向に波のエネルギーが輸送され、レゾナンスで吸収、減衰する (Toomre 1969) → 定常性維持には別の機構が必要

N-body disk (Fujii et al.2011)

⇒ **非定常spiral**、全体では10Gyr以上**常に存在**
銀河渦巻きが自発的に生成 ⇒ 巻き込む ⇒

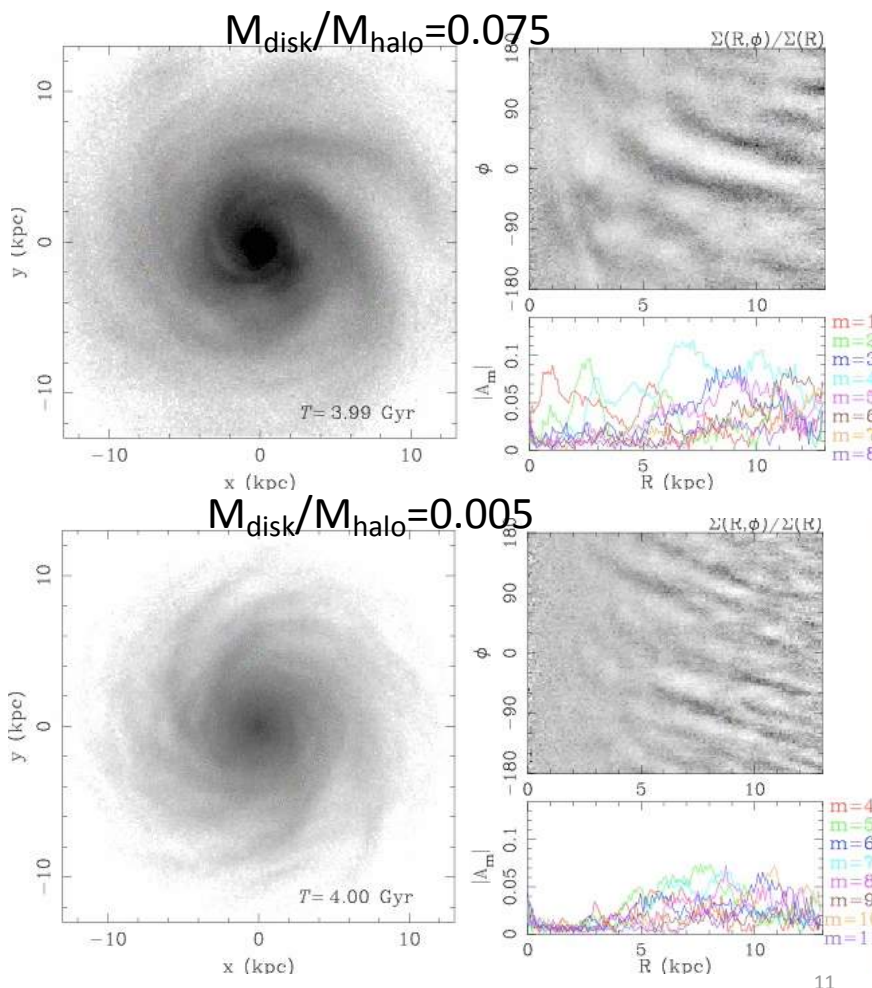
壊れる & 合体 ⇒ 再生成

各モードは常に変動



円盤が軽くなる ⇒
スパイラルの数は
増え、弱くなる

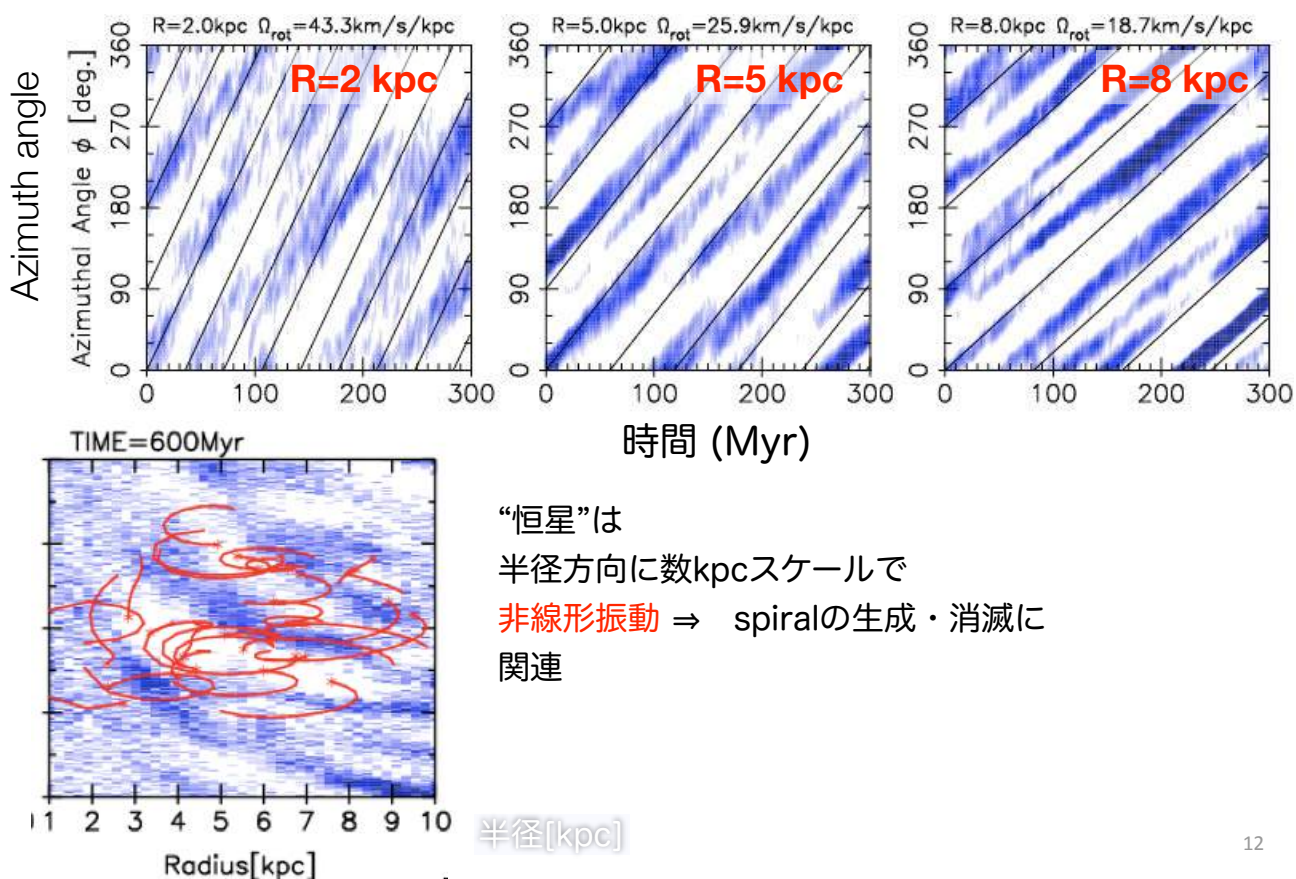
しかし、やはり非定常



tight-windingで、定常な
「密度波」
は再現できない

Moving velocity of Stellar Spirals \sim rotational speed

⇒”実体的”



“恒星”は
半径方向に数kpcスケールで
非線形振動 ⇒ spiralの生成・消滅に
関連

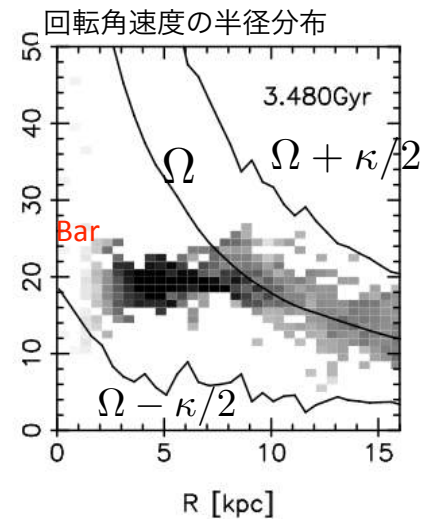
spiralが準平衡的に維持される理由

•spiralによる散乱(Linden-Bell&Kalnajs 1972)
が限定的で星の速度分散があまり上がらない

→ 自己重力が効く

1) spiralの振幅が小さくなるので、散乱効果が弱まる (*Fujii et al. 2011*)

2) spiralは、銀河回転と共回転 → 共回転
共鳴(CR)による散乱は速度分散を増さない
(*Sellwood, Binney 2002; Baba+2012*)



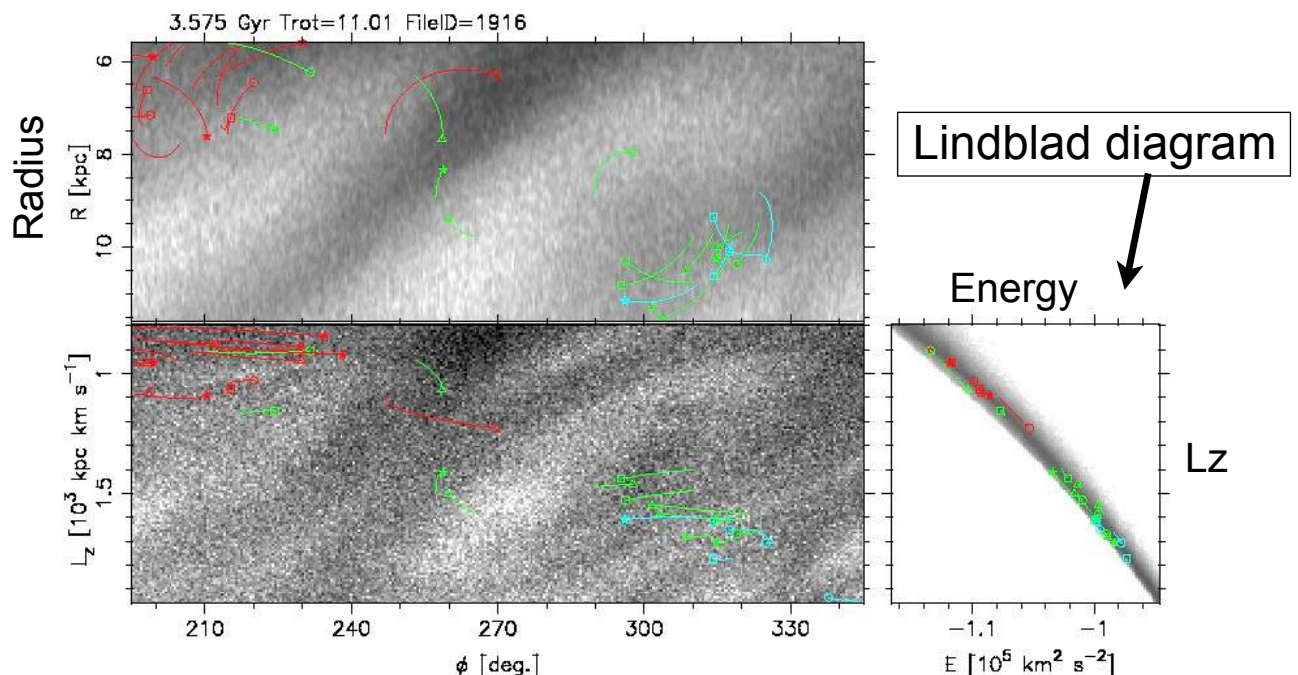
13

非定常渦巻きと構成粒子の運動 [非線形段階]

Baba, Wada, Saitoh (2012)

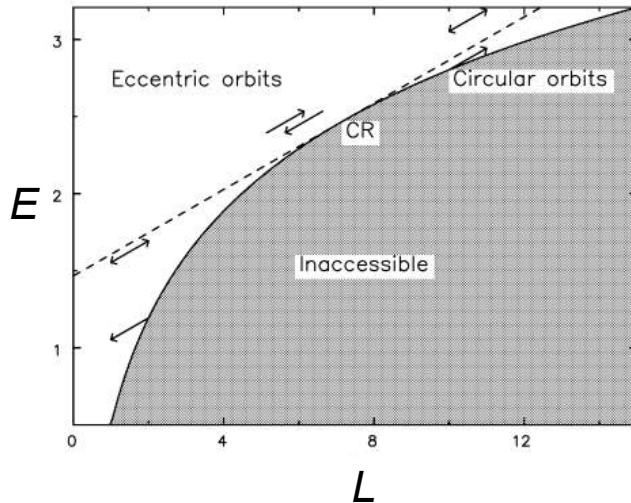
実空間でエピサイクル運動(kpcスケール)、角運動量空間で振動

⇒ 非線形段階では、guiding centerが動く(L, Eが変化) ⇒ spiralの変動の原因



14

Lindblad diagram: spiral potential中の粒子軌道



resonanceによる散乱は、
Jacobi integral = 一定の直線に
沿って動く

$$E_J \equiv E - \Omega_p L$$

銀河渦巻きは銀河回転に乗っている

どこでも CR

速度分散を増さない

CRによる散乱は、円軌道
に対するcritical curveの
接線方向に動く

15

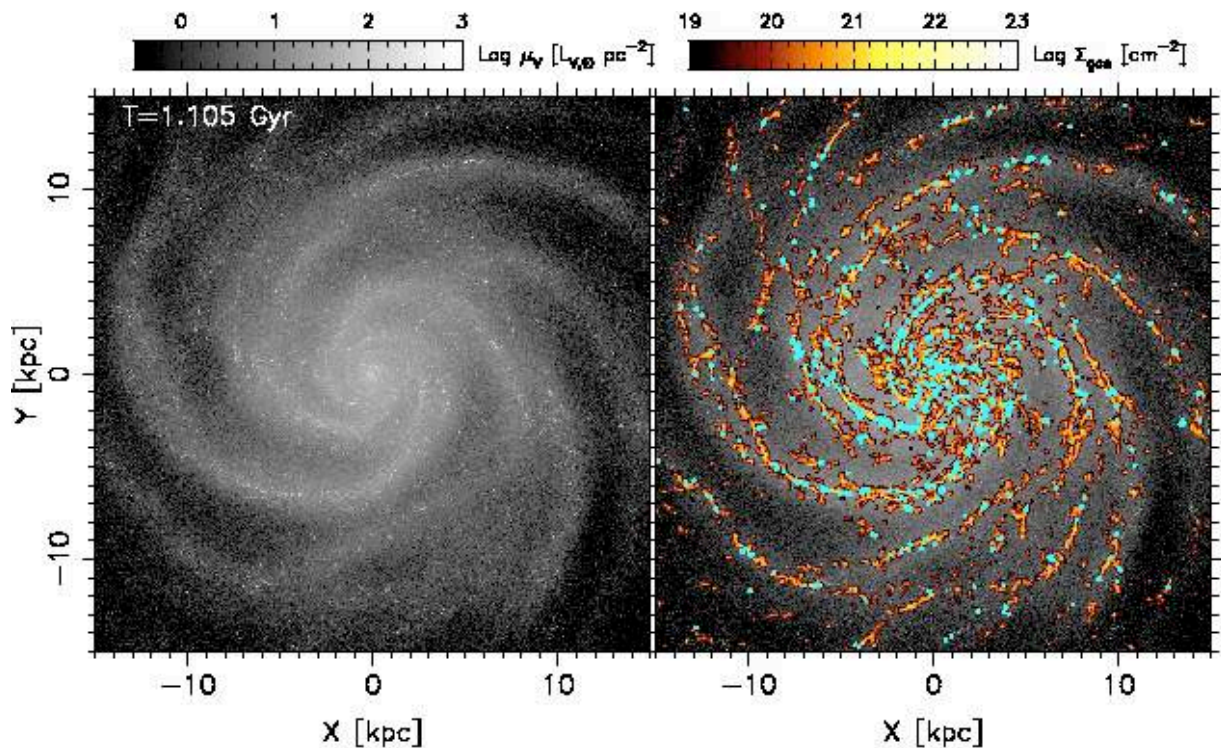
stellar spiral potentialが非定常なら、

星間ガスはどうなる？

銀河衝撃波ってあるの？

V-band surface density

Gas surface density + young stars



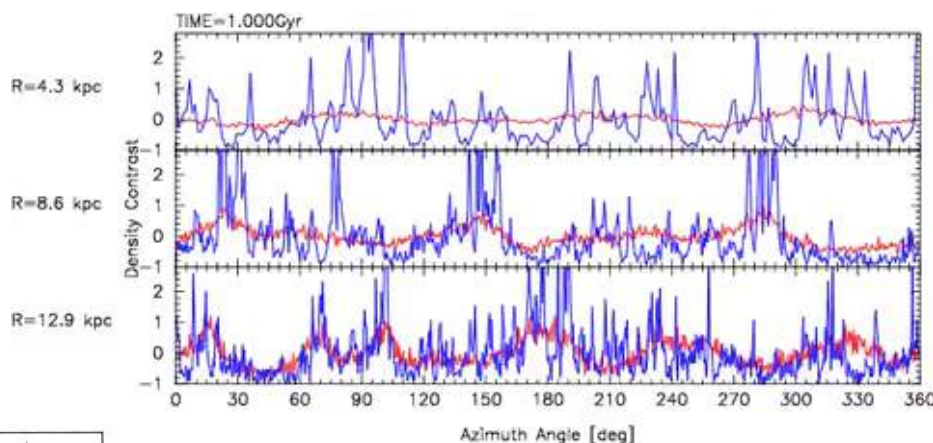
Spirals are wound (not 'pattern') → recurrently formed
 Non-stationary: stretching/bifurcating/merging
 Gas arms are associated with stellar arms with substructure

Wada, Baba, Saito 2011

17

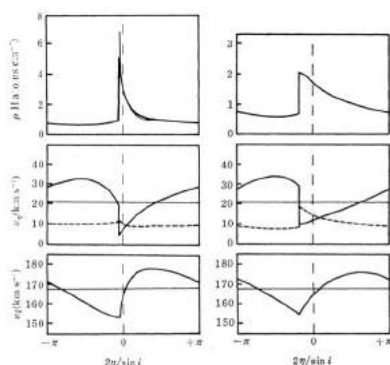
Amplitude of stars and gas at different radii on their rotating frames

Gas clouds are associated with non-steady stellar arms, without systematic offset.



Stellar density

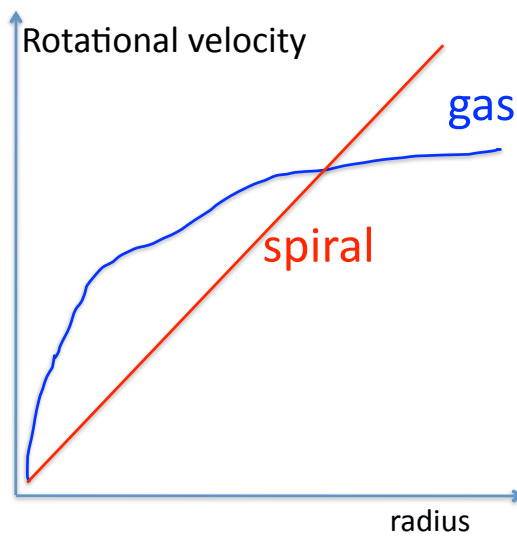
Gas density



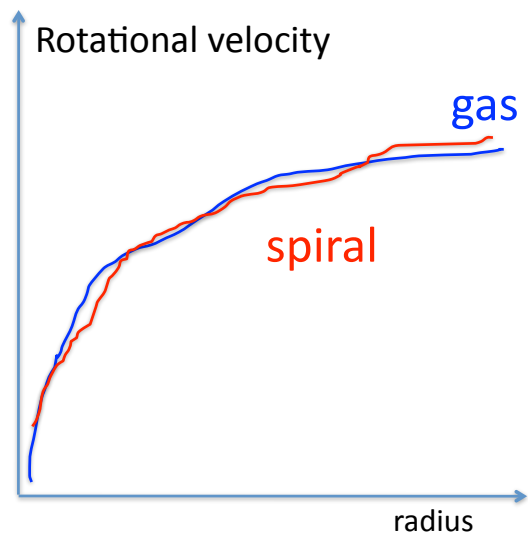
KW, Baba, Saitoh (2011)

← 定常Galactic Shock (Ishibashi & Yoshii 1984)

Grand-design density waves vs. N-body spirals



Gas can be 'supersonic' for the spiral potential

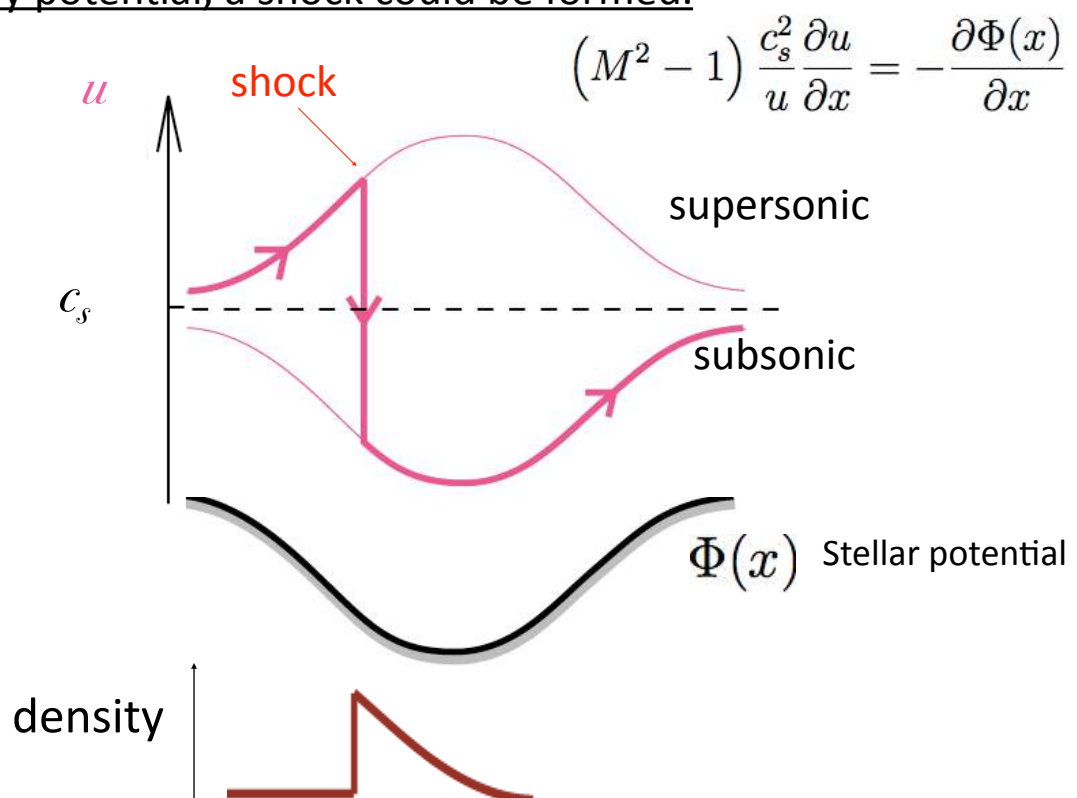


Gas is 'subsonic' (random velocity \sim relative velocity to the stellar potential).

19

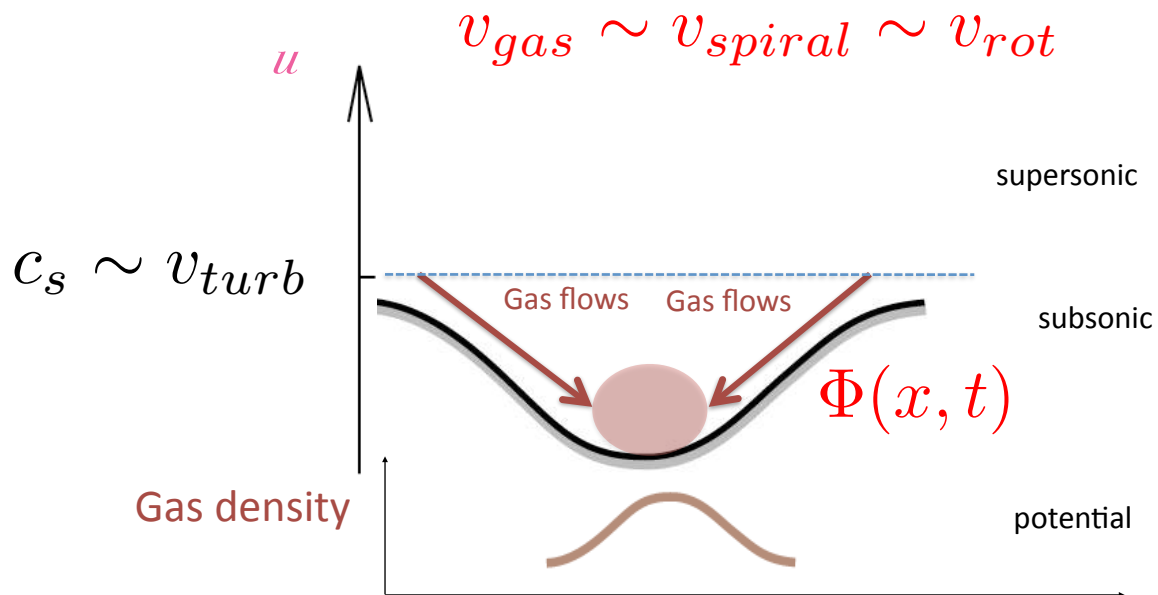
If ISM is supersonic relative to a stationary potential, a shock could be formed.

Conventional galactic shock



new picture of galactic spiral

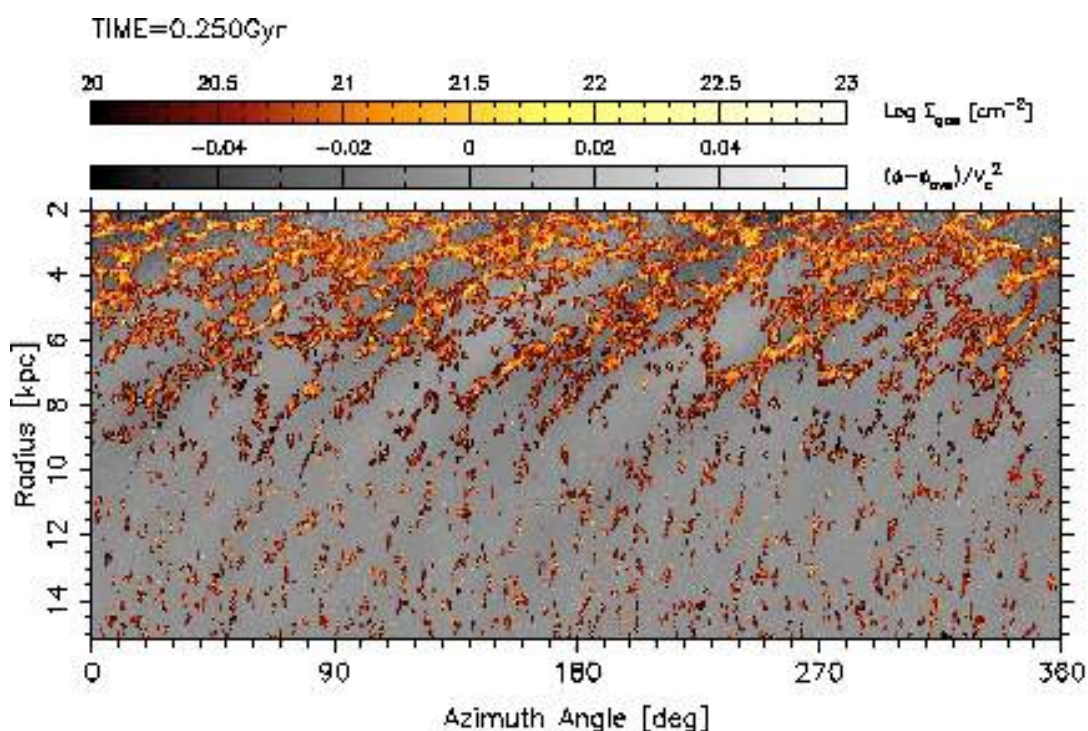
Both ISM and spiral potential follow galactic rotation



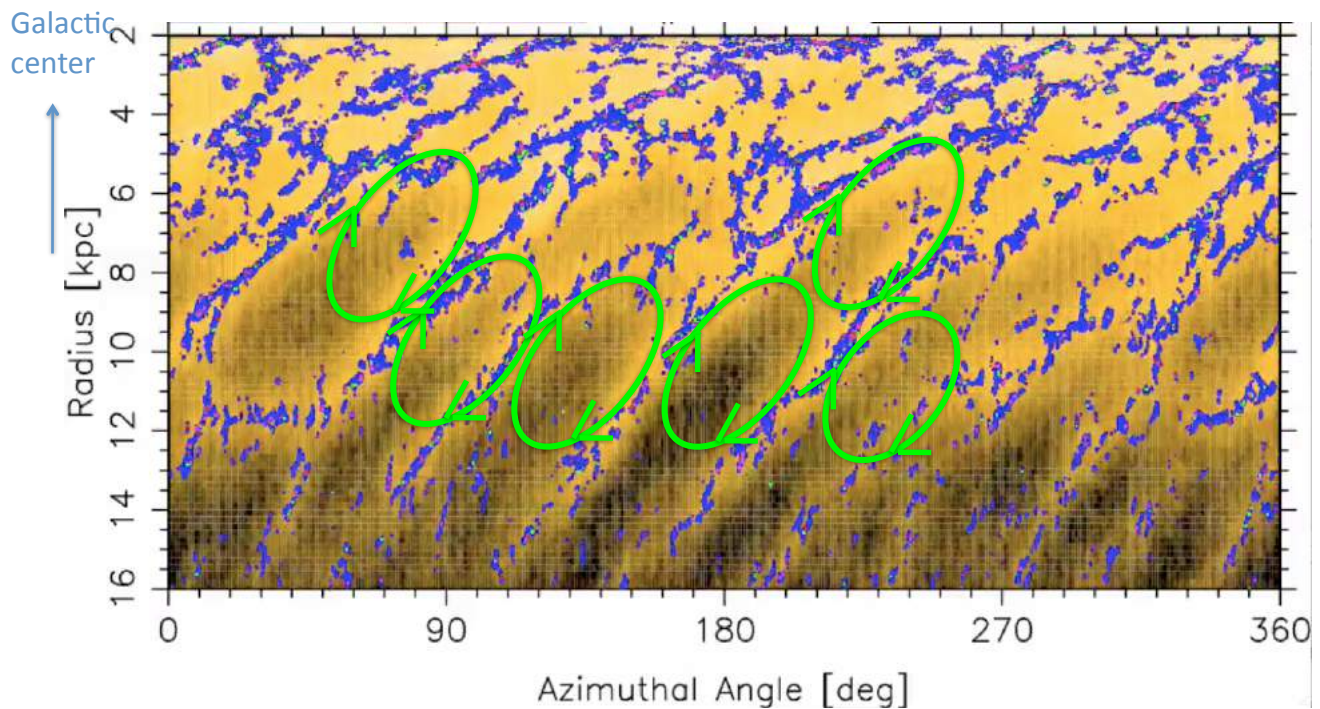
Spiral potential itself is **time-dependent**
 → This makes the bound-clouds **unbound**.

Dynamics of cold gas and stellar spirals

- * Cold gases collide near the stellar arms on the rotating frame
- * Kpc scale radial motions



On a **local** galactic rotating frame,
Cold gas clouds have **large (2-3 kpc) “epicycle” motions**,
collide near the stellar spirals, and form massive associations.

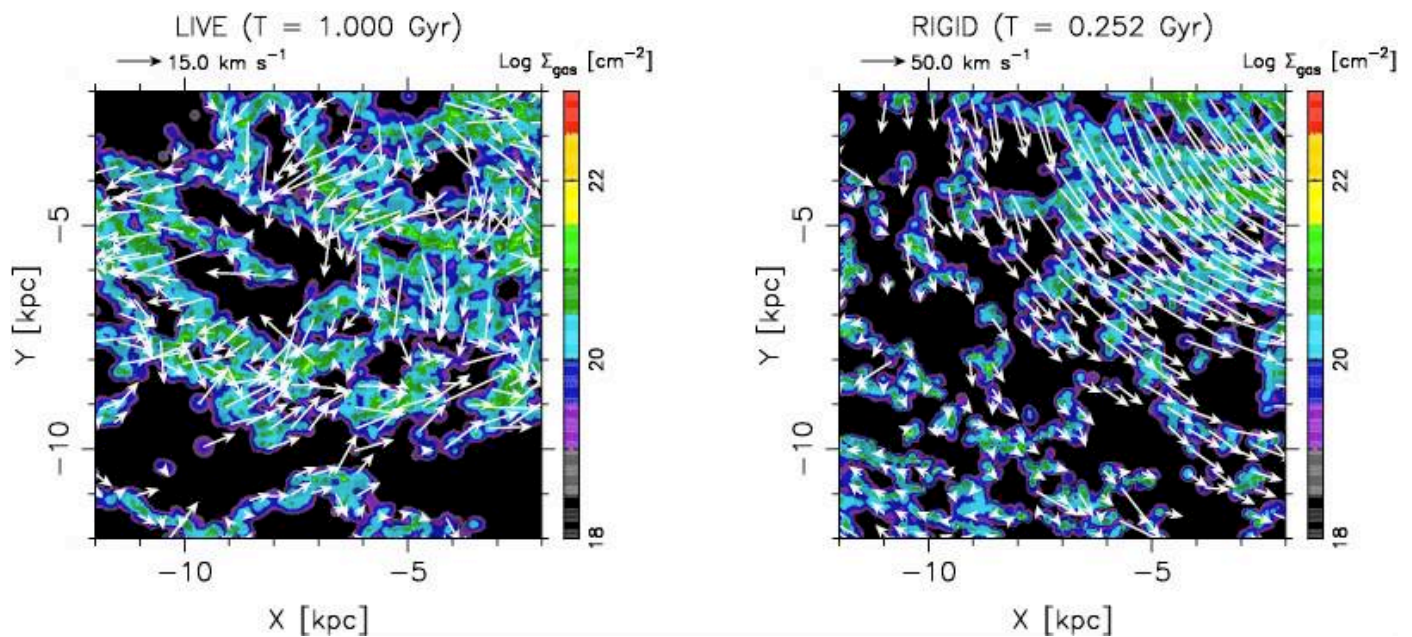


‘GMAs’ show strong shear motion. → source of turbulence?

23

非定常stellar spiralは観測(速度) から判別できるか？

Gas velocities: Live vs. Rigid spiral



Random or converging flows

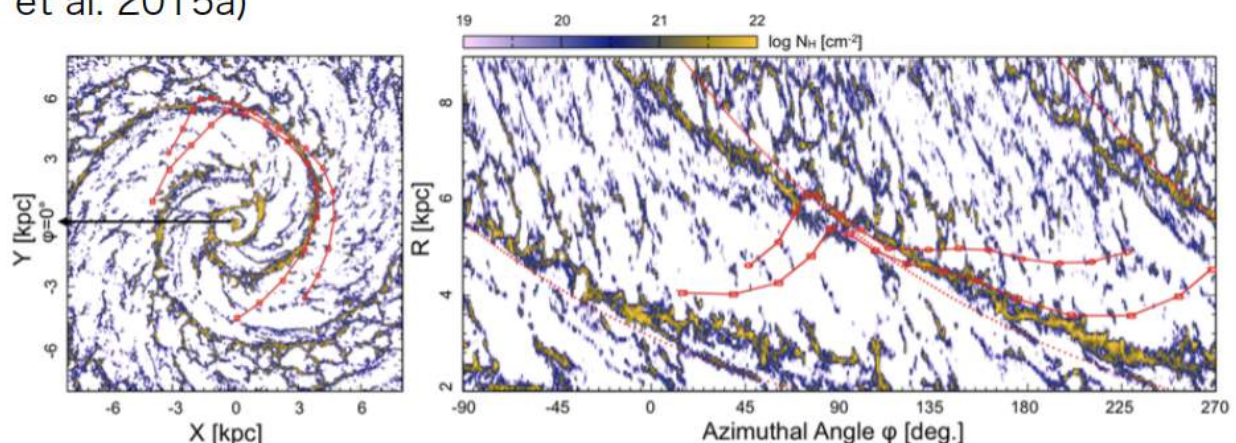
Regular flows typically seen in galactic shock

25

馬場提供

ガスの流れ：密度波モデル (Fig.1)

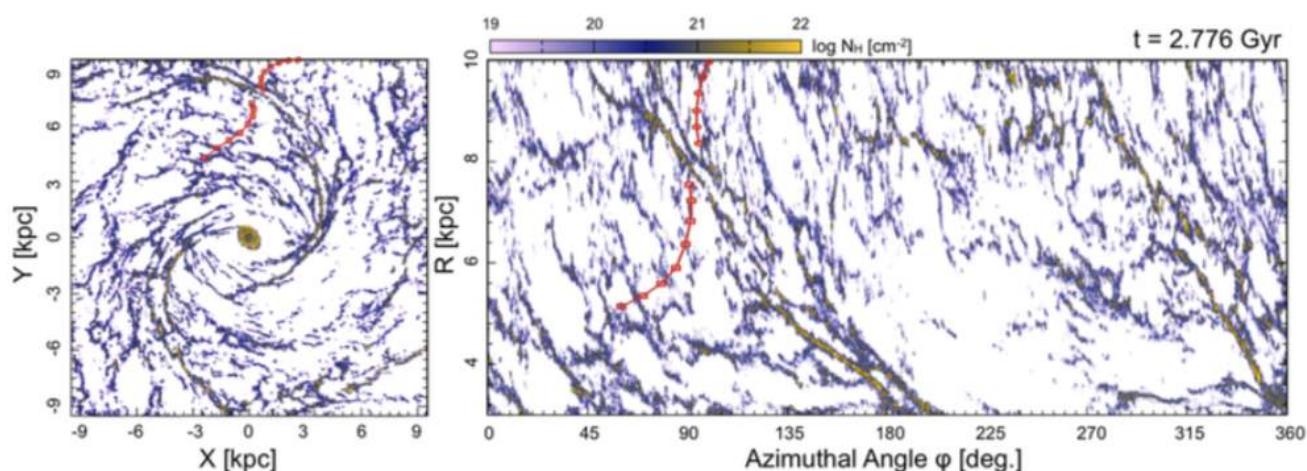
- ガスは渦状腕を追い越す (c.f. Fujimoto 1968; Roberts 1969)
 - 追い越す時に“銀河衝撃波”を経験し、進行方向が急激に曲がる
 - CRから内側ほどMach数が大きく（突入前から超音速）、渦状腕を出る時に減速 (c.f. 車の渋滞) でガスが下流に溜まる（はず）
- arm-gas offsetの大きさは半径 (<- Mach数の半径依存) に依存 (Baba et al. 2015a)



26

ガスの流れ：動的渦状腕 (Fig.2)

- ・アームの前面/後面からガスが流れ込む (c.f. Wada et al. 2011)
- ・流れ込みの方向は(非線形)エピサイクル運動に由来する
- ・アームは $\sim 100\text{Myr}$ で増幅/減衰 (Fig.3; Baba 2015c)



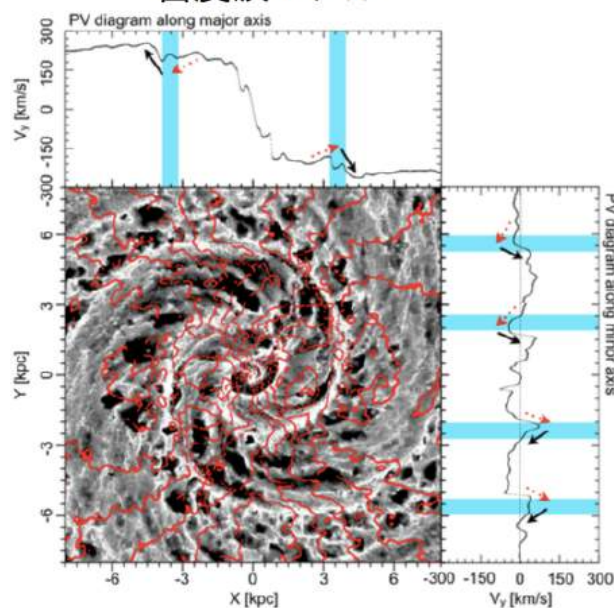
27

馬場提供

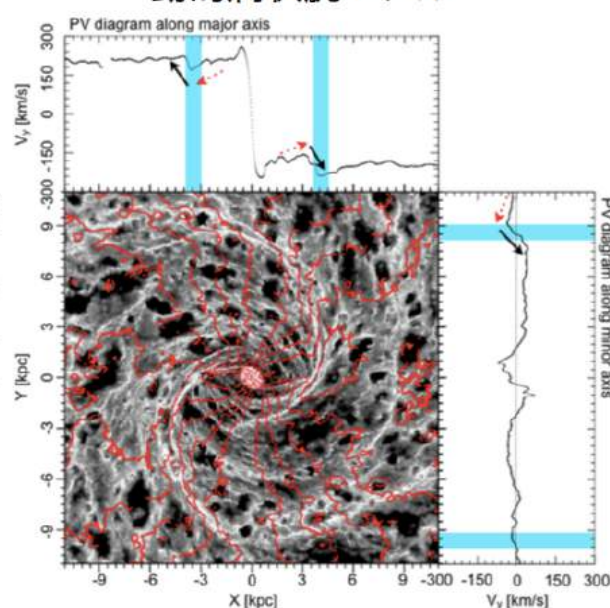
wiggles in isovelocity contours

どちらのモデルでも isovelocity map に wiggle が見られる

密度波モデル



動的渦状腕モデル

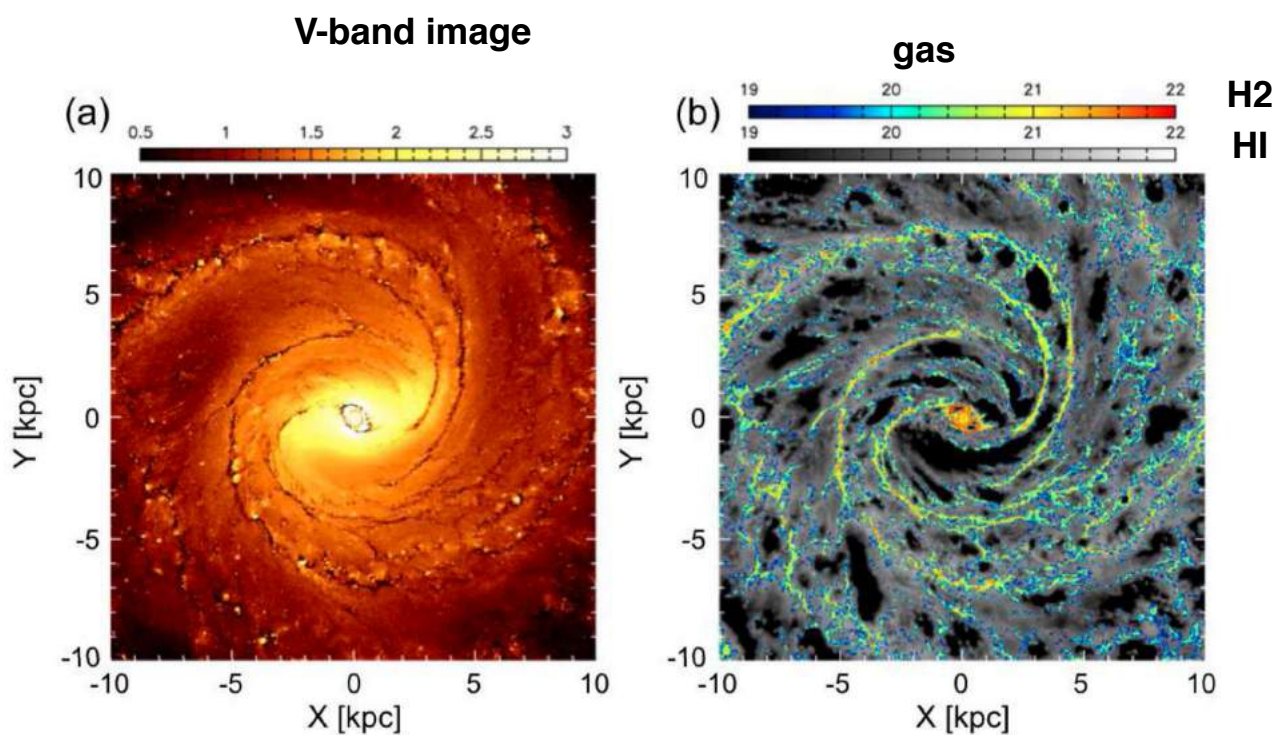


28

非定常stellar spiralは観測(分子雲の性質)から判別できるか？

29

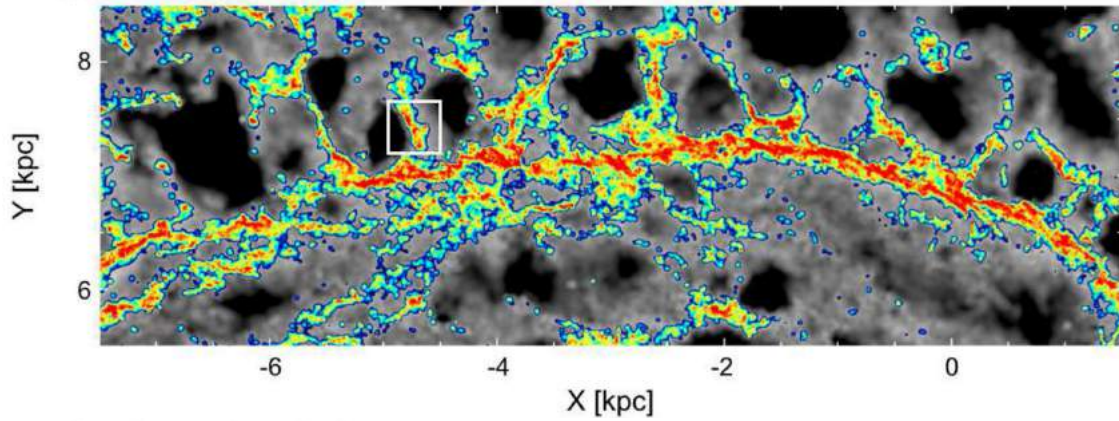
Baba+2017



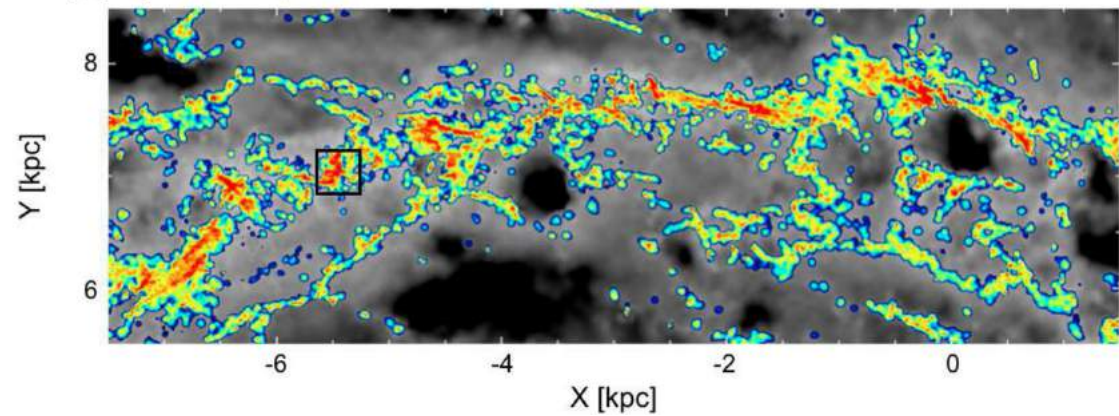
f_{H_2} Gnedin & Kravtsov (2011)

30

(d) fixed spiral

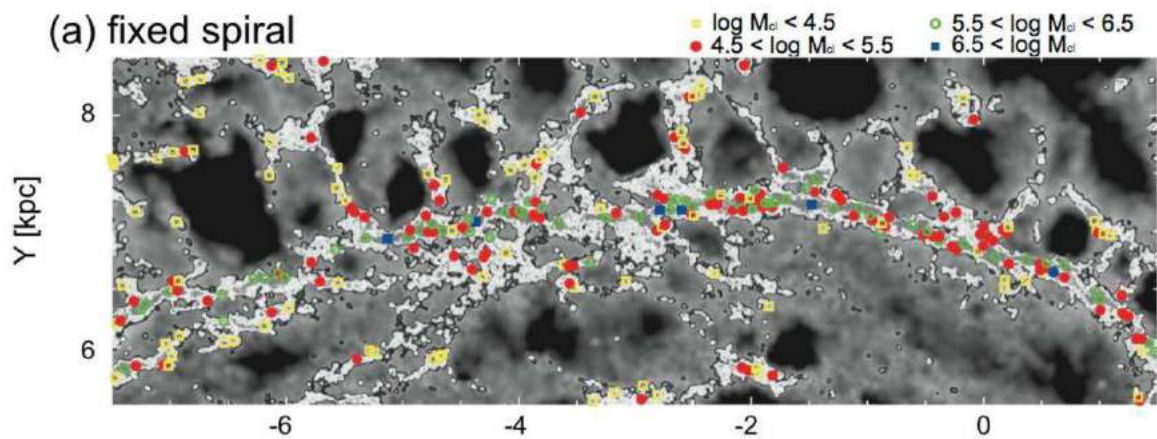


(c) dynamic spiral

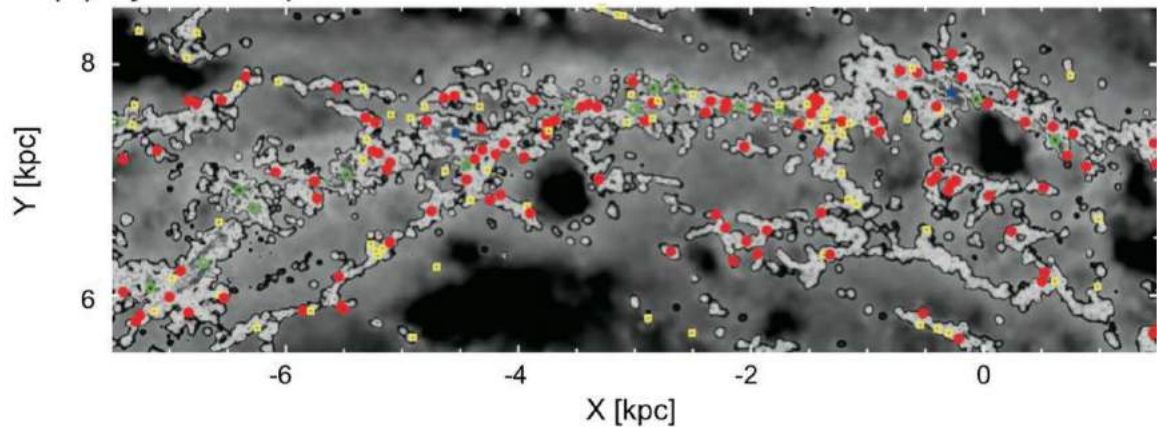


31

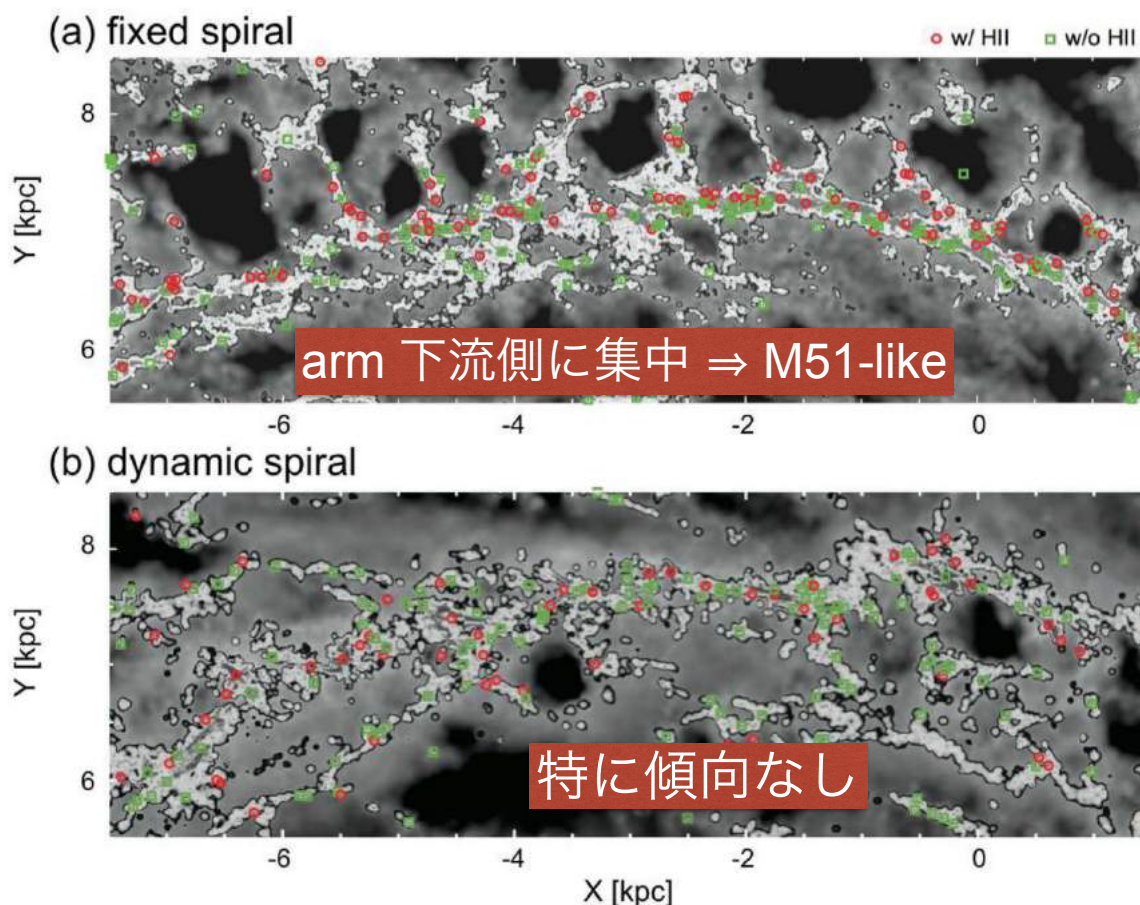
(a) fixed spiral



(b) dynamic spiral

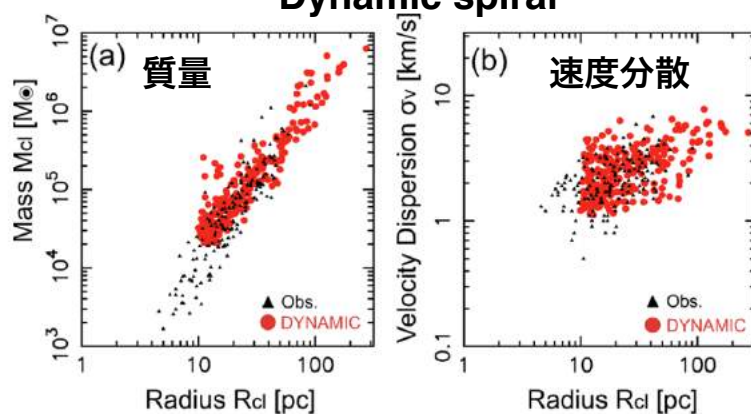


32



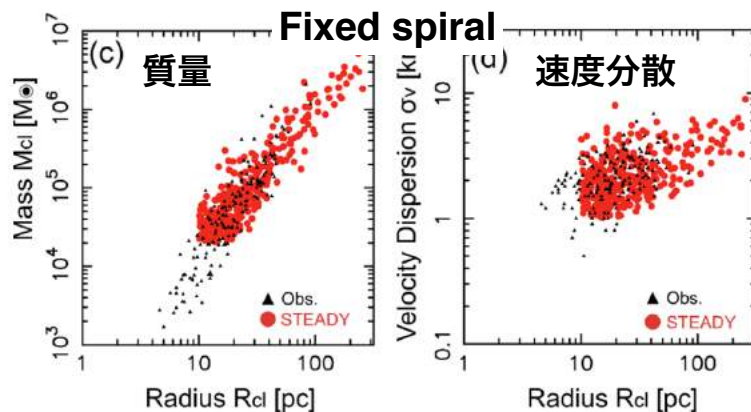
33

Dynamic spiral



dynamic/steady
spiral共に
観測を再現

Fixed spiral



GMC の個々の性質
にspiralの成因は
無関係？

34

M51, central region

spiral arm = galactic shock

35

まとめ：spiral structureの新描像

(レビュー Dobbs & Baba 2014
Wada+2011, Baba+ 2016)

■ 銀河の渦巻き構造

= 自己重力恒星円盤中の動的平衡構造

鍵となる物理： 恒星系の非線形エピサイクル振動+銀河との共回転

■ 恒星系渦巻き&星間ガスは一体で運動 ⇒ 巻き込む

⇒ ガスはポテンシャルに両側から落ち込んで高密度領域を作る ⇒ポテンシャルの変動とともに、inter-armに移動 ⇒ 新たな渦巻き腕をつくる

■ 渦状腕は「大局的な定常銀河衝撃波」ではない

■ 速度場から非定常スパイラルを見分けるのは難しい (Gaiaに期待?)

■ 定常的 (銀河衝撃波的) armもある(e.g. M51)

■ 分子雲は非常にダイナミックな構造。spiralの成因にはあまり影響受けない

36