

銀河の渦状構造

久野成夫
(筑波大学 宇宙観測)

1. イントロダクション
2. 渦状構造の形成メカニズム
3. 渦状構造形成のトリガー
4. 観測による検証:M51の場合
5. 観測による検証:銀河系の場合

1. イントロダクション

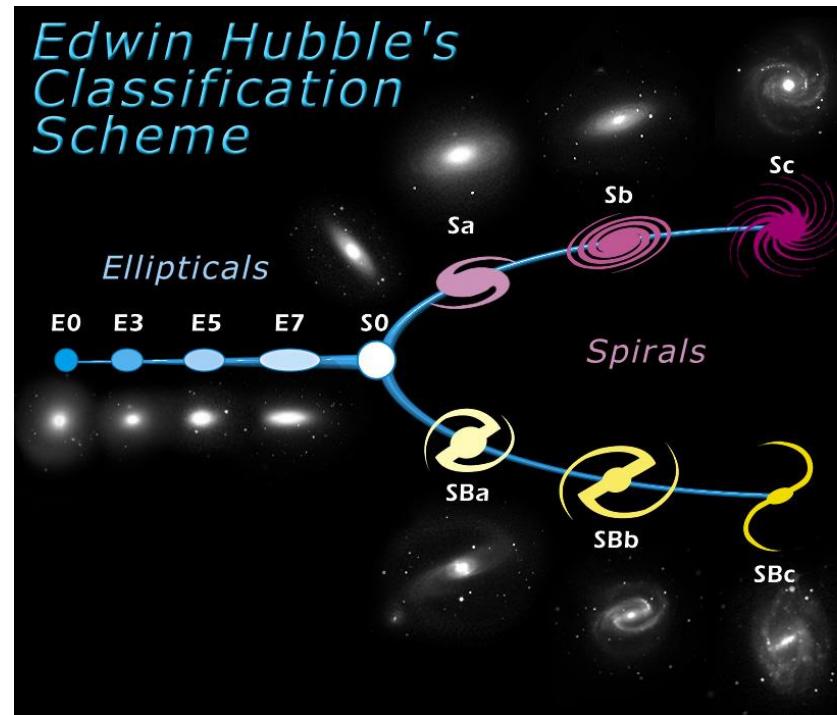
- 銀河の2/3は渦状銀河 活発な星形成



銀河の形態分類

ハッブル分類

- Elliptical galaxies
- Lenticular galaxies S0
ディスクはあるが渦巻構造は見られない
- Spiral galaxies S, SB
通常の渦巻銀河/棒渦巻銀河
 - (1)渦巻き腕の巻き方が緩やか
 - (2)バルジ成分がディスク成分に対して目立たなくなる
 - (3)HII領域などの星形成活動にともなう微細模様が目立つ

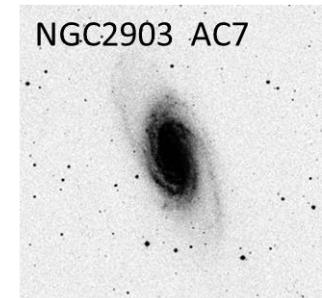
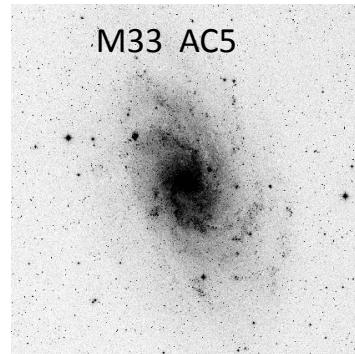
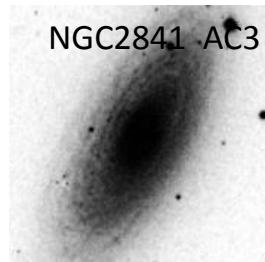
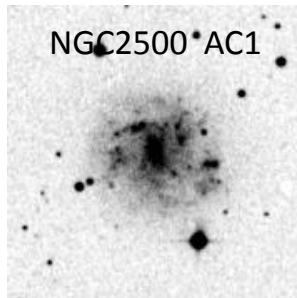


Arm class

(Elmegreen and Elmegreen 1982, MNRAS 201, 1021)

渦状腕の連續性、長さ、対称性を基準にした分類 (12段階)

AC1

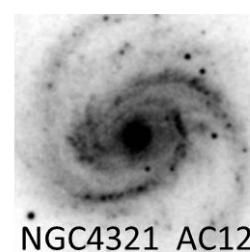
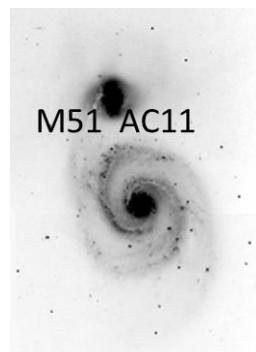
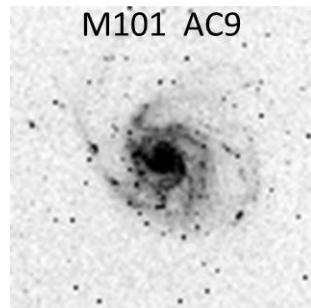


Flocculent

短い多数の腕

Multiple arm

AC12



Grand design
二本腕

銀河の渦状構造

- ・どのように形成され維持されているのか？
 - ・寿命は？
 - 一度形成されば、維持される？
 - 寿命の短い腕が、何度も形成される？
- ⇒円盤部での星形成、角運動量輸送、金属量分布

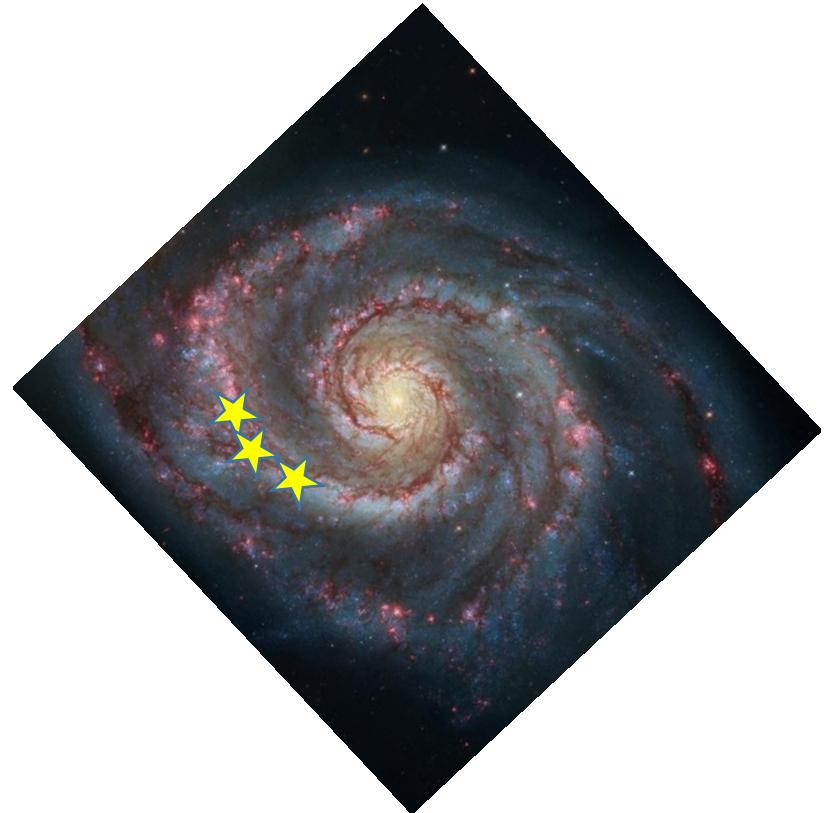
2. 涡状構造の形成メカニズム

- (a) 物質腕 (Material arm)
- (b) 運動学的密度波
(Kinematic density wave)
- (c) 定常密度波
(Stationary density wave)
- (d) 動的平衡渦状腕
(Transient Recurrent Spiral)
- ((e) SSPSF : Stochastic Self Propagating Star Formation)

(a) 物質腕 (Material arm)

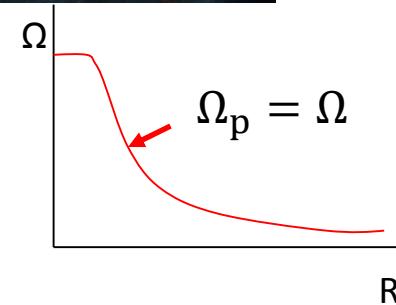
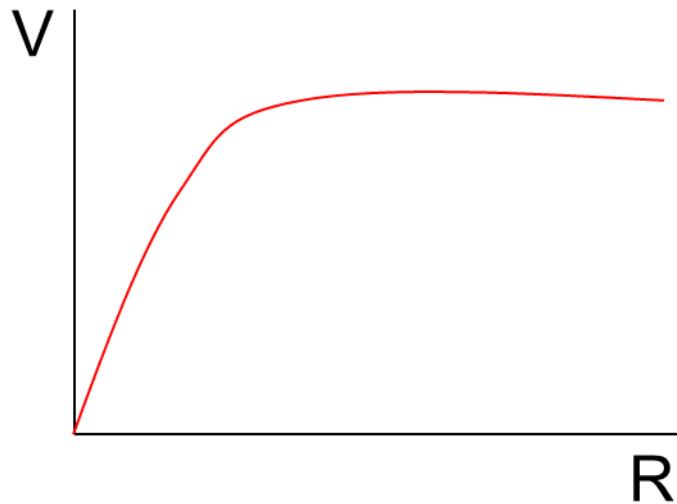
- ・渦状腕のパターン速度 = 銀河回転(星)の角速度

$$\Omega_p = \Omega(R)$$



渦状構造の巻込み問題 (The Winding Problem)

- 渦状銀河の回転曲線の多くは回転速度が一定
⇒ 内側ほど角速度が大きい

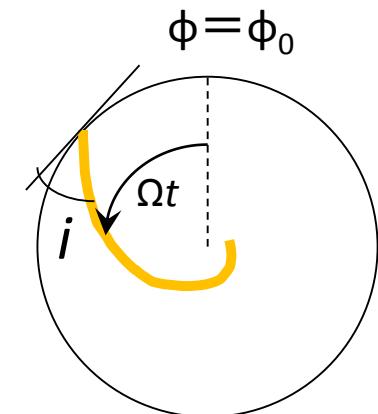


回転速度が 220km s^{-1} で一定の銀河の場合

渦状腕 $\phi(R, t) = \phi_0 + \Omega(R)t$

ピッチアングル i $\cot i = \left| R \frac{\partial \phi}{\partial R} \right| = Rt \left| \frac{d\Omega}{dR} \right|$

$t = 10^{10}\text{yr}$ には $i = 0.25\text{deg}$ @ 10kpc



そのときの渦状腕の動径方向の間隔 ΔR

$$2\pi = \left| \Omega(R + \Delta R) - \Omega(R) \right| t = \Delta R \left| \frac{d\Omega}{dR} \right| t$$

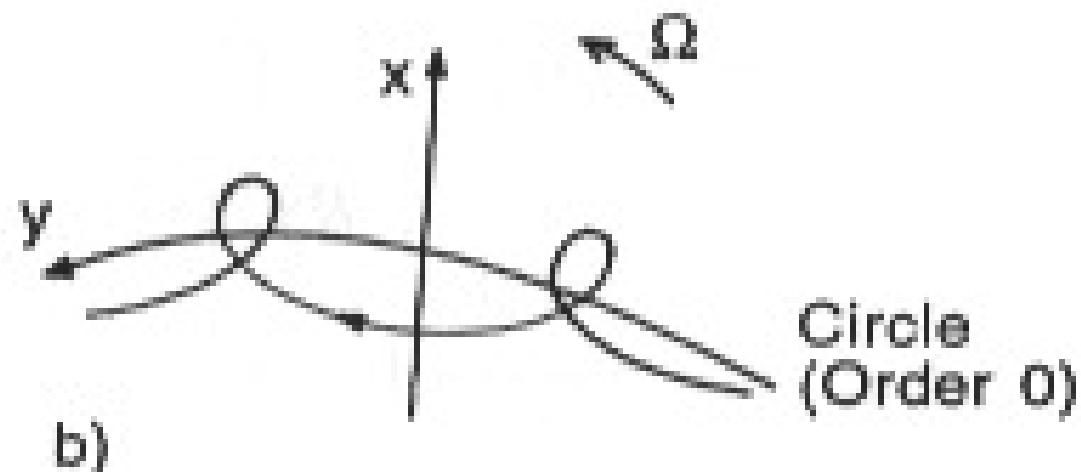
$$\Delta R = \frac{2\pi R}{\cot i} \quad \underline{\Delta R = 0.28\text{kpc}}$$

渦状構造がmaterial armであった場合、銀河年齢内で巻き上がってしまう

(b) 運動学的密度波 (Kinematic density wave)

(Kalnajs 1973, PASAu 2, 174)

周転円運動 (Epicyclic motion)



Epicyclic frequency

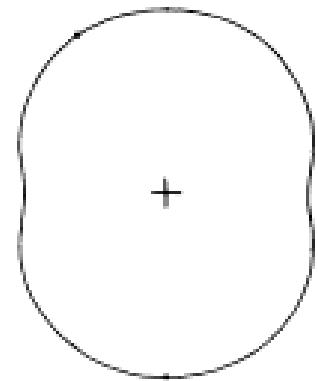
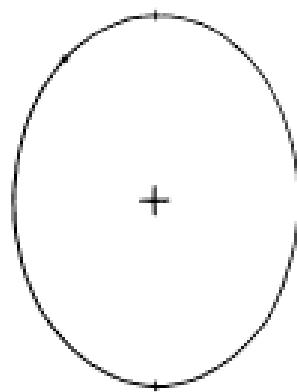
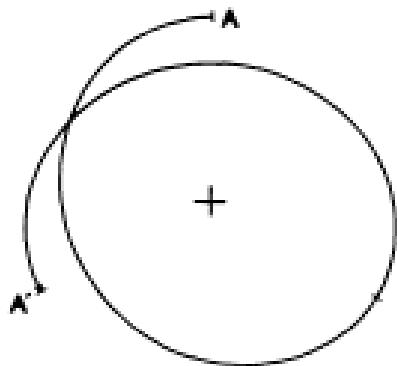
$$\kappa^2 = R \frac{d\Omega^2}{dR} + 4\Omega^2$$

Ω : angular velocity

R : radius

角速度 Ω 、epicyclic frequency κ で運動する星の軌道

Ω_p で回転する系から見ると



$$\Omega_p = 0$$

$$\Omega_p = \Omega - \frac{\kappa}{2}$$

$$\Omega_p = \Omega$$

$$\Omega_p = \Omega + \frac{\kappa}{2}$$

$$\Omega_p = \Omega \pm \frac{\kappa}{2} \quad : \text{閉じた軌道になる}$$

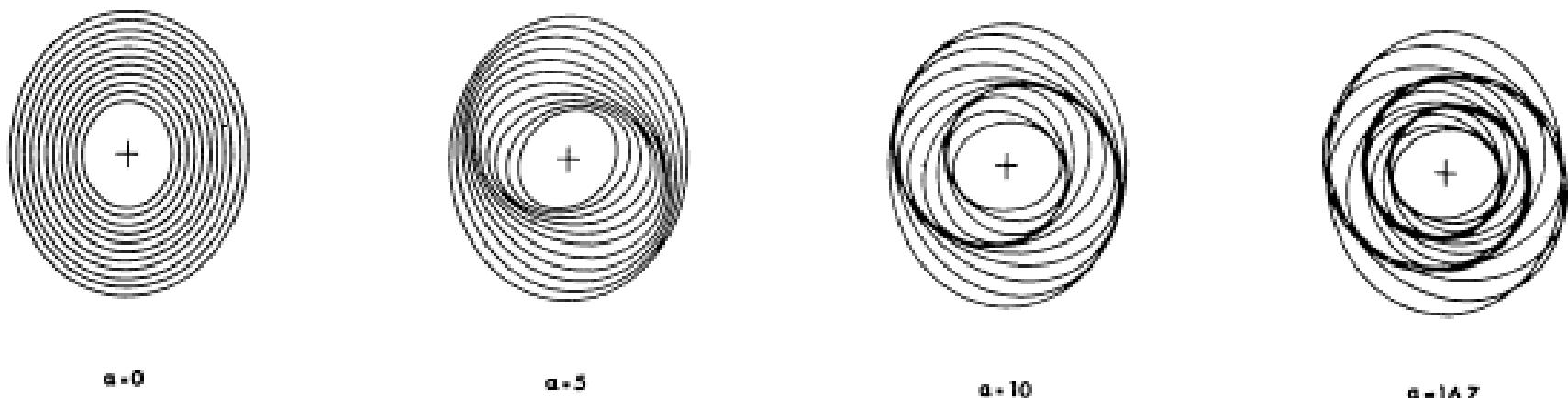
橍円軌道の向きが半径によって回転

⇒ 軌道が混む領域

(渦状腕の滞在時間が長くなり、密度が高くなる)

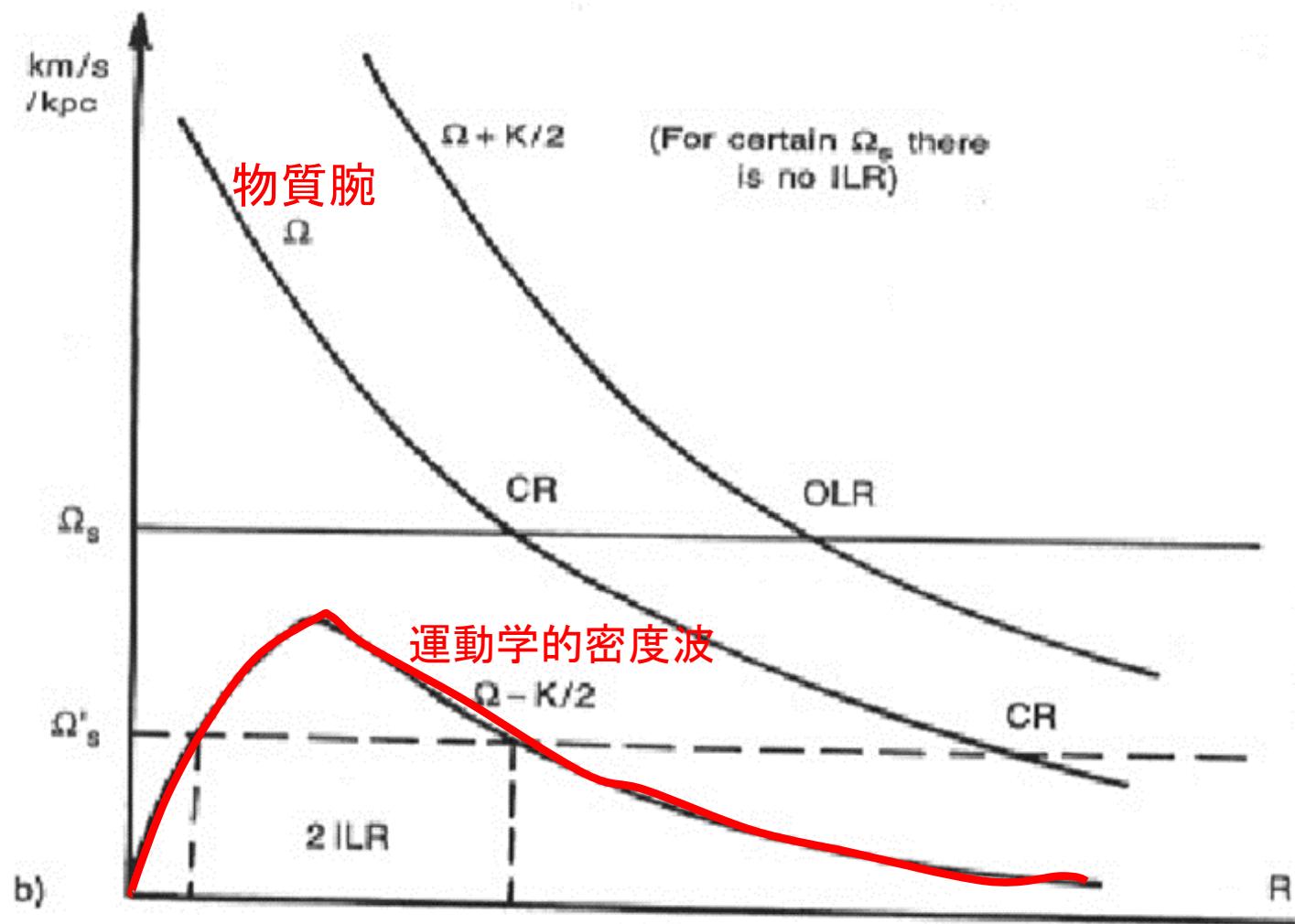
⇒ 運動学的密度波 kinematic density wave
自己重力を考慮していない

閉じた軌道の位置角によって、いろいろなピッチアングルの渦状腕になる



静止系から見ると渦状腕は Ω_p で回転

- それぞれの半径で、 $\Omega_p = \Omega - \frac{K}{2}$



通常は、 $\Omega_p = \Omega - \frac{K}{2} = \text{const.}$ ではないので、巻込み問題は残る

(c) 定常密度波 (Stationary Density Wave)

(Lin and Shu 1964, ApJ 140, 646)

- 銀河の渦状構造は定常的な密度波(剛体回転)

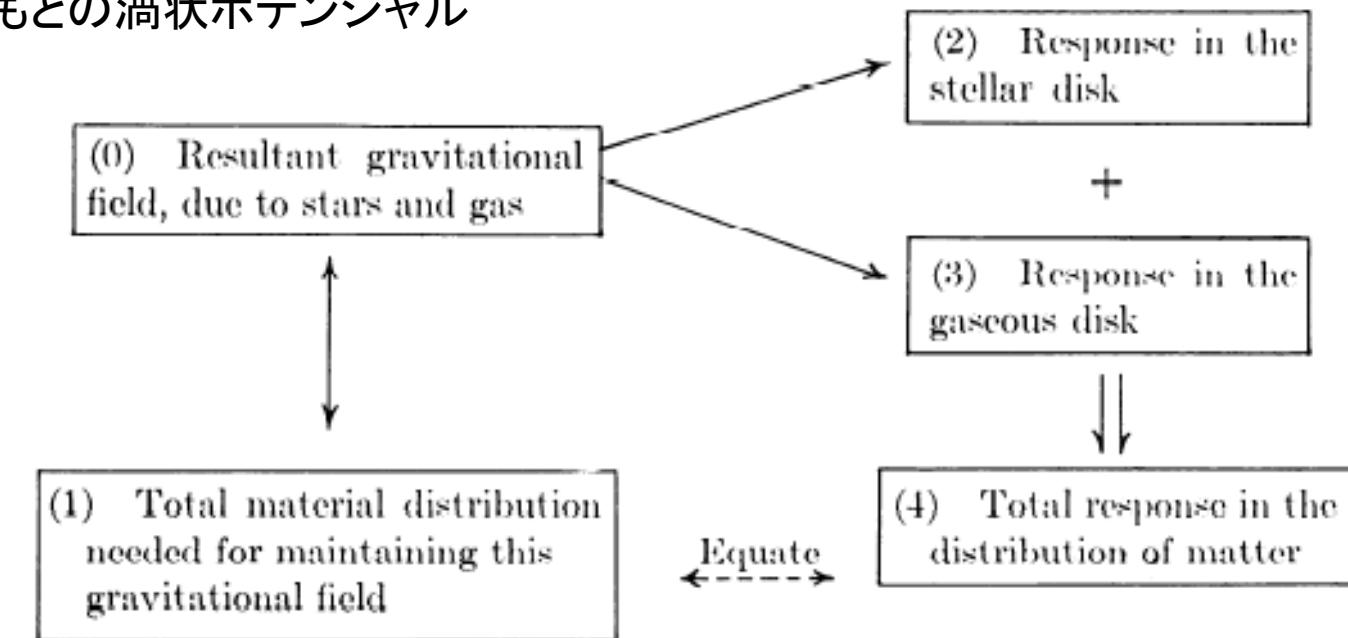
密度波による渦状ポテンシャル



星、ガスの反応

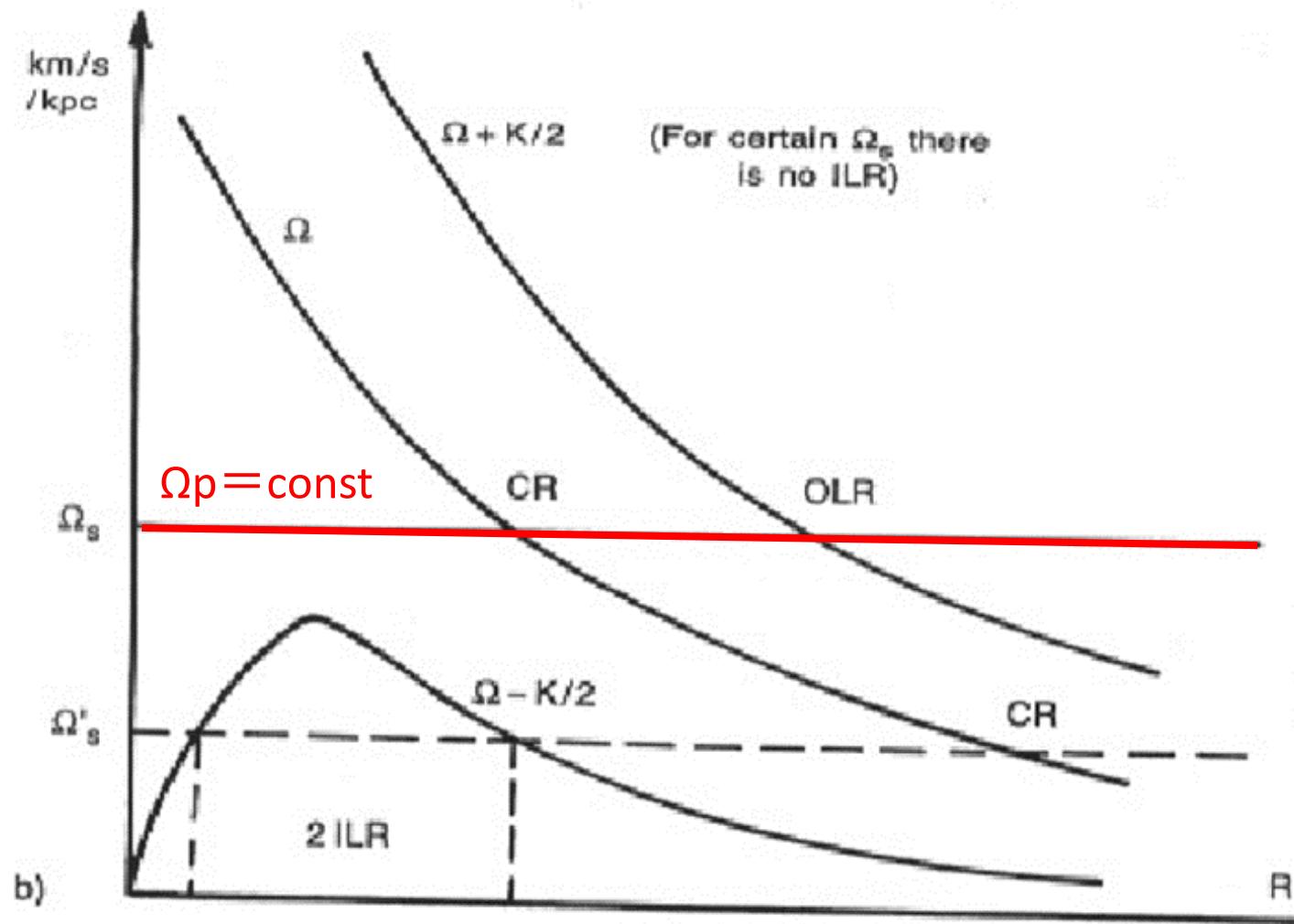


もとの渦状ポテンシャル



- 渦状構造は剛体回転

⇒ パターン速度=一定 $\Omega_p = \text{const}$



定常密度波理論からの予想

銀河衝撃波

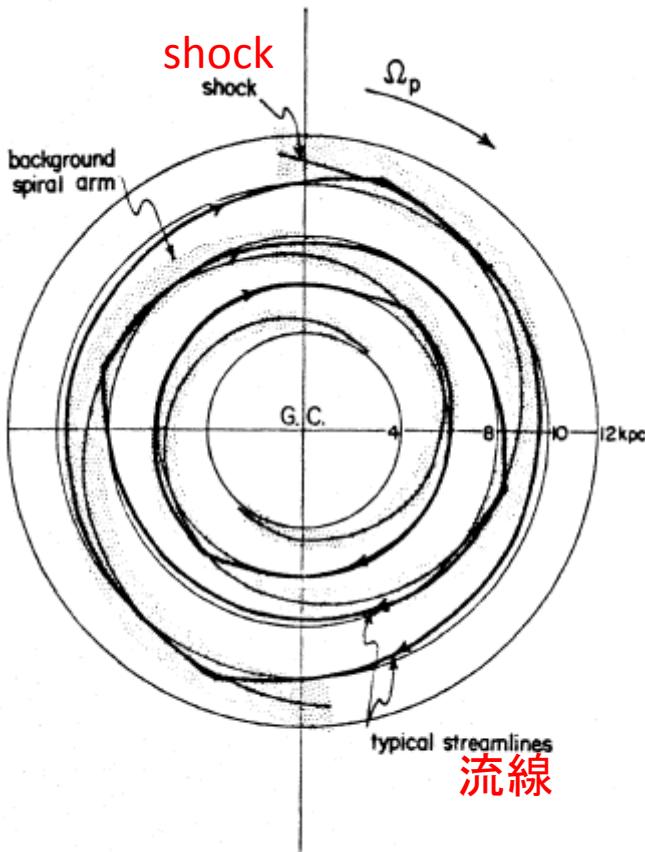
Fujimoto 1968, IAUS 29, 453

渦状ポテンシャル中のガスの運動

- ⇒ 渦状腕に垂直方向の速度 > 音速
- ⇒ 渦状腕に沿って衝撃波が発生

Roberts 1969, ApJ 158, 123

- 2本腕の渦状ポテンシャル中のガス(連續流体)の運動
- 渦状腕での銀河衝撃波の発生を仮定
- 安定したガスの流れ(閉じた流線)を作れるか?



ガスの密度

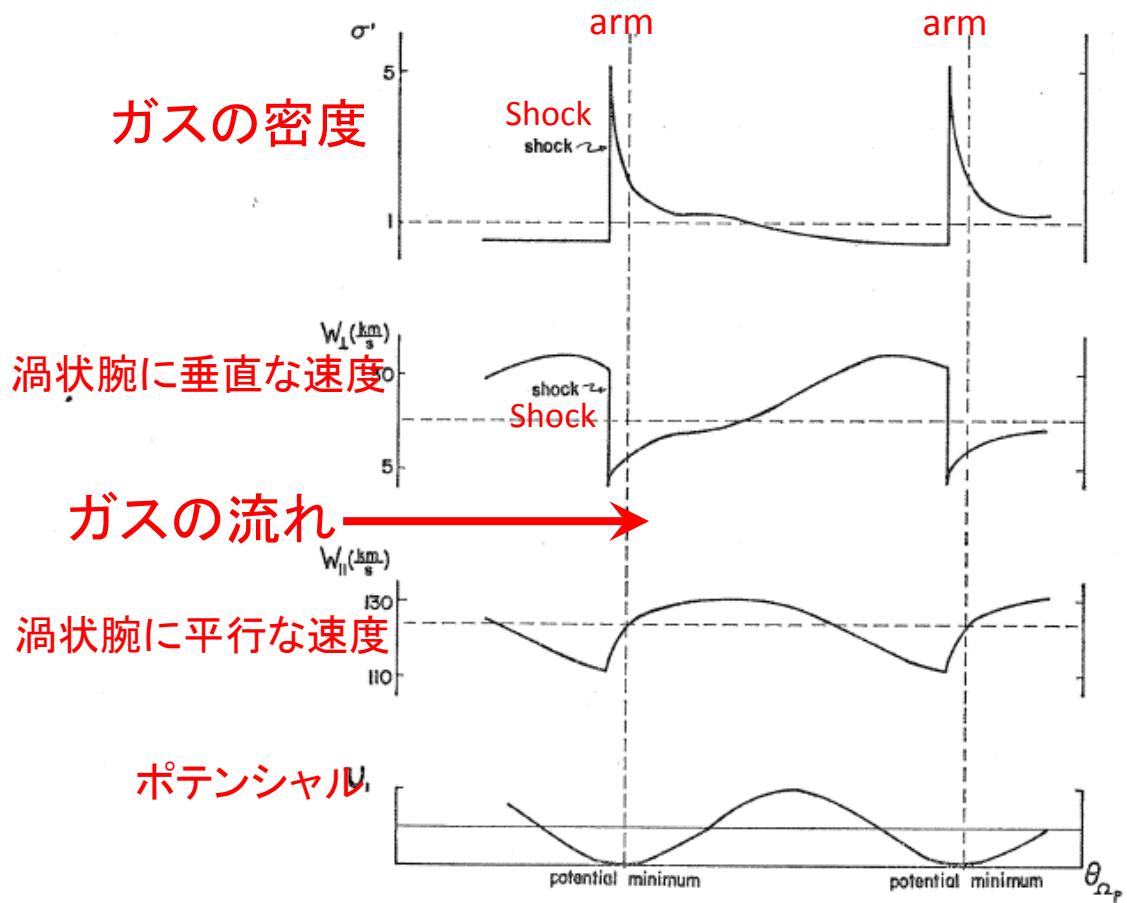
渦状腕に垂直な速度

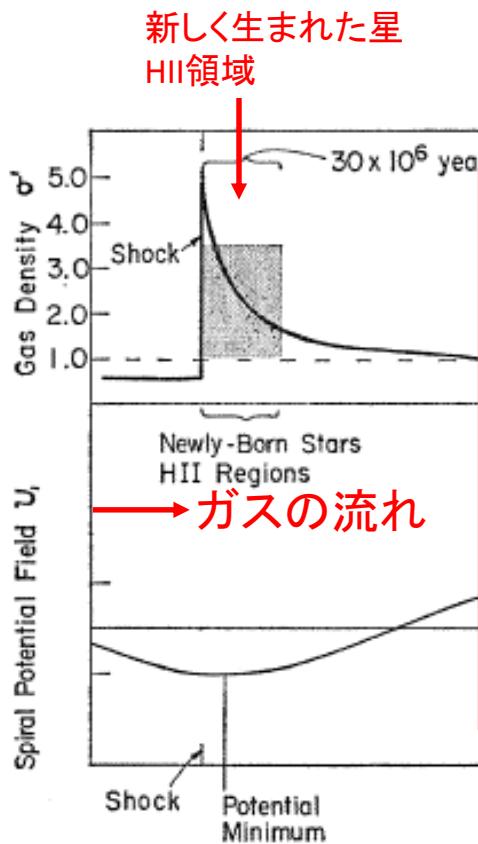
ガスの流れ

渦状腕に平行な速度

ポテンシャル

Roberts (1969)

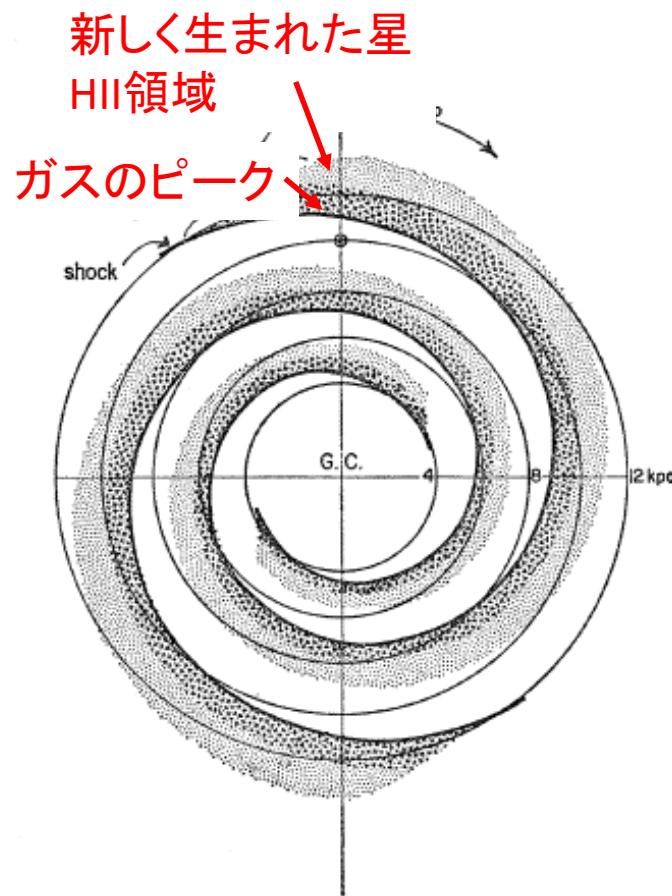




渦状腕での星形成

銀河衝撃波の発生
 ↓
 ガスの圧縮
 ↓
 星形成

Roberts (1969)

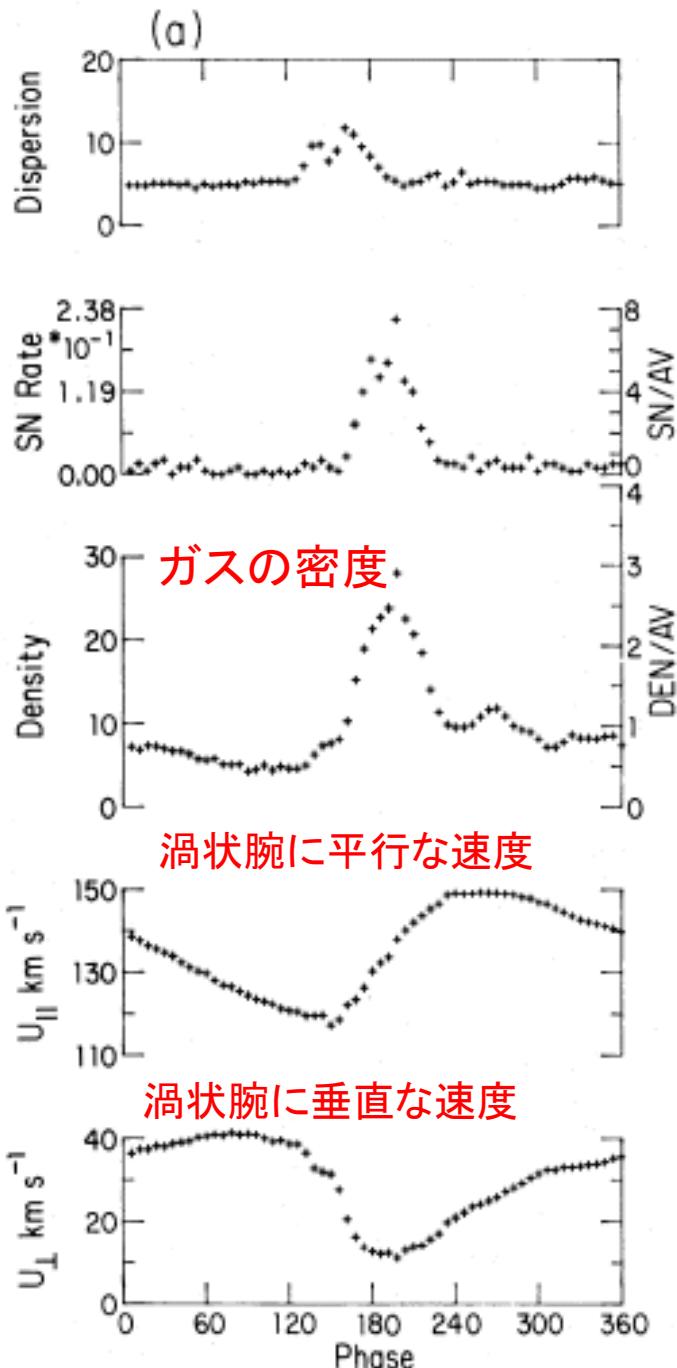


Roberts (1969)

実際の銀河では、大部分の分子ガスはGMCとして存在

分子雲を粒子として扱った場合どうなるか？ N体シミュレーション
(e.g., Roberts and Hausman 1984,
ApJ 277, 744)

- 渦状腕でショックのような振る舞い
(分子雲の衝突→星形成)
- ただし、連續流体の場合に比べ緩やかな速度変化



最近のシミュレーション
•ガスの自己重力
•Radiative cooling
•星形成
•超新星からの
energy feedback

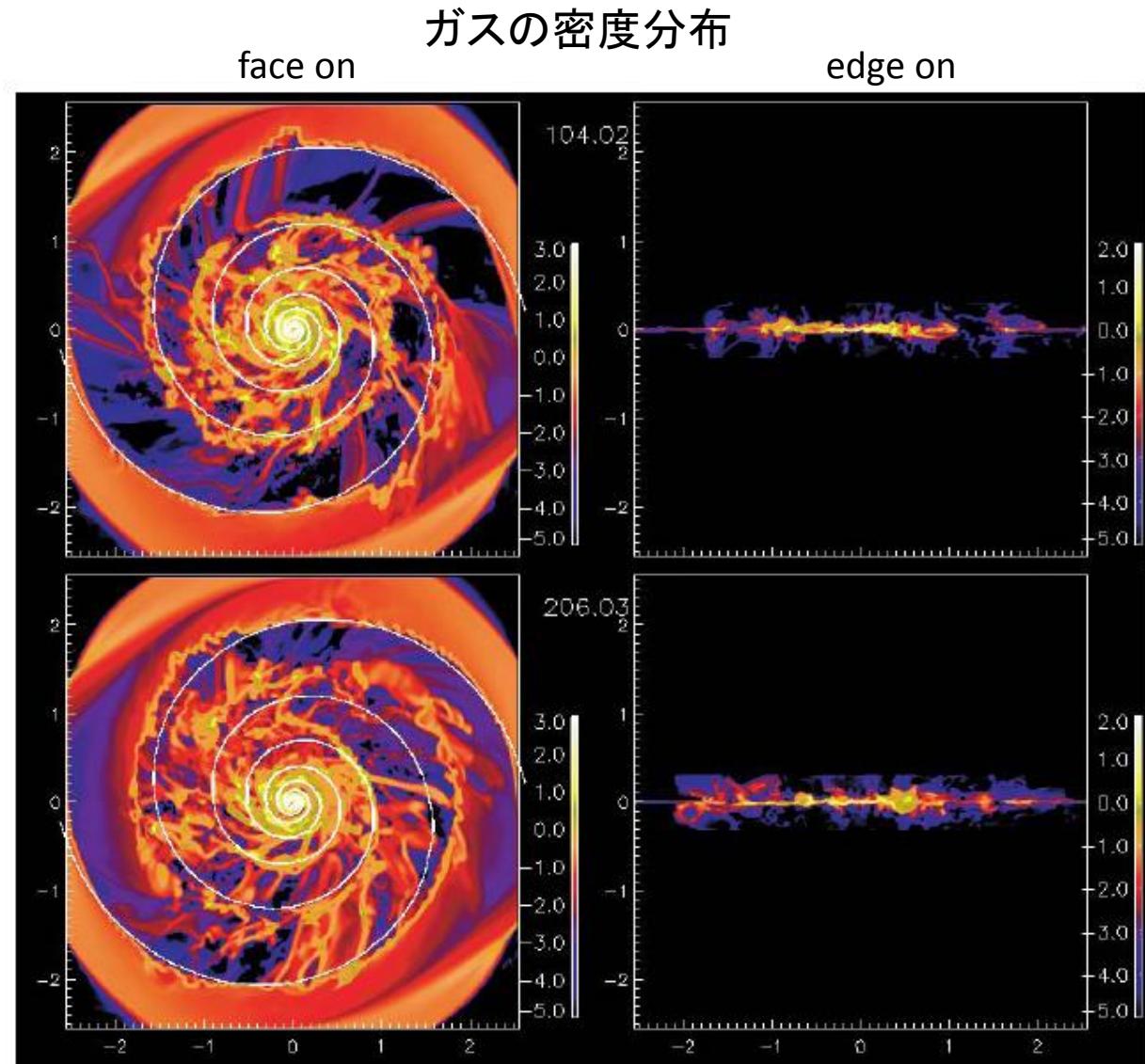


3次元の密度分布

銀河衝撃波は不安定
GMCのような塊



InterarmでSpurへ

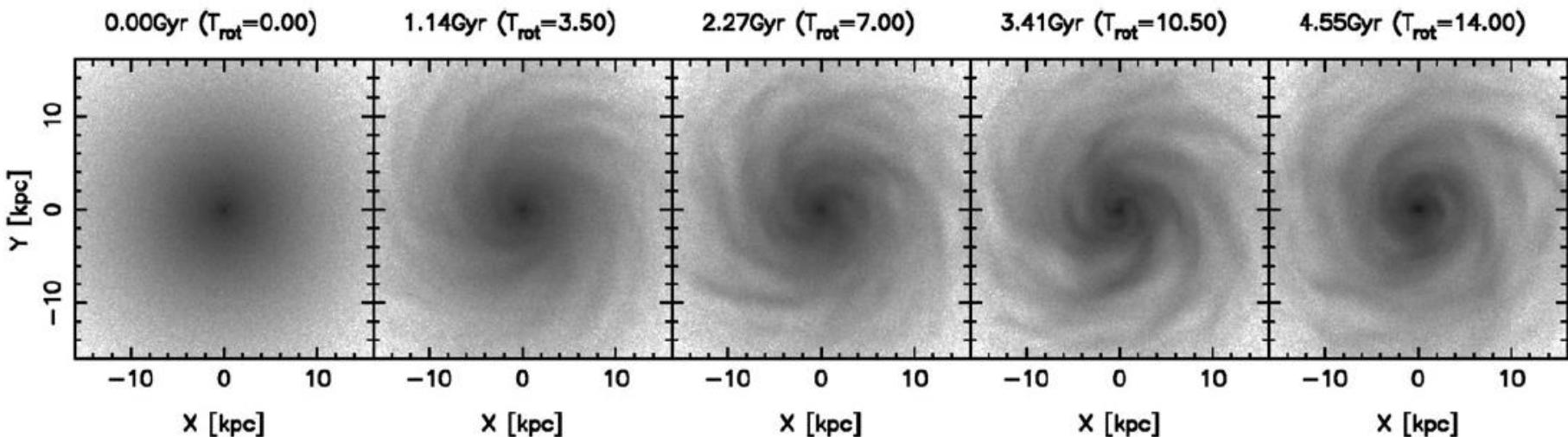


Wada 2008, ApJ 675, 188

(d) 動的平衡渦状腕(Transient Recurrent Spiral)

- 生成・消滅, 合体・分裂を繰り返すダイナミカルな構造
- 一つの腕の寿命～数100Myr

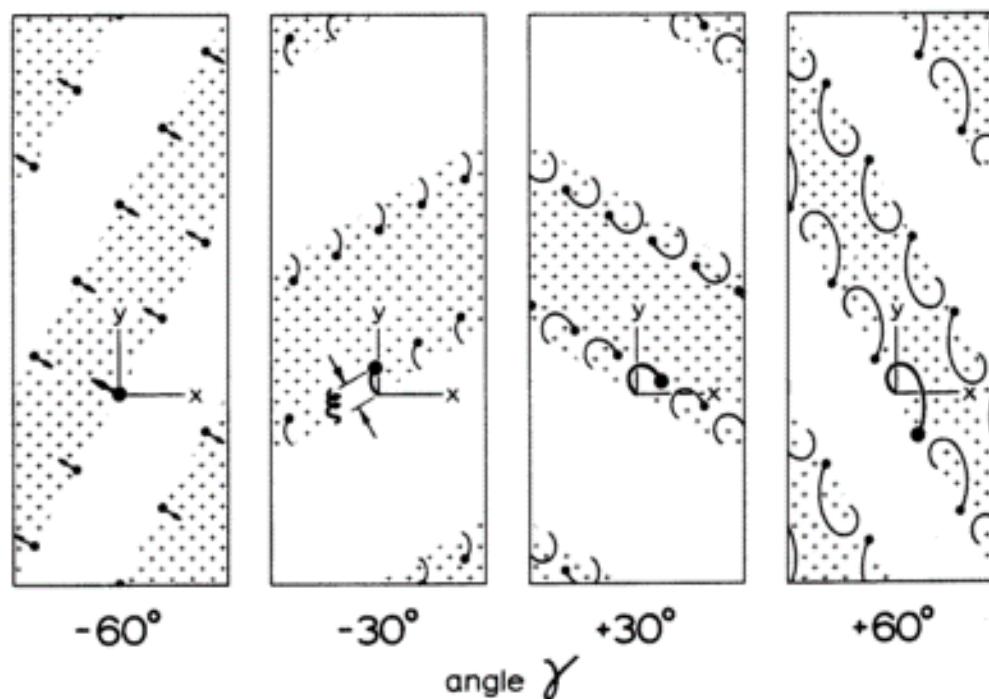
(e.g., Sellwood & Carlsberg 1984, Baba et al. 2009, 2013)

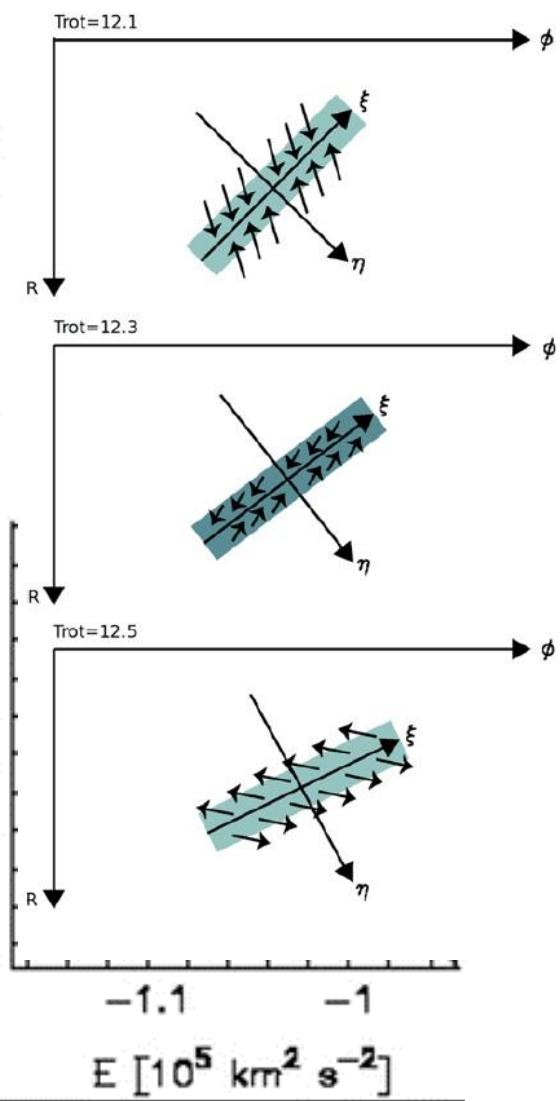
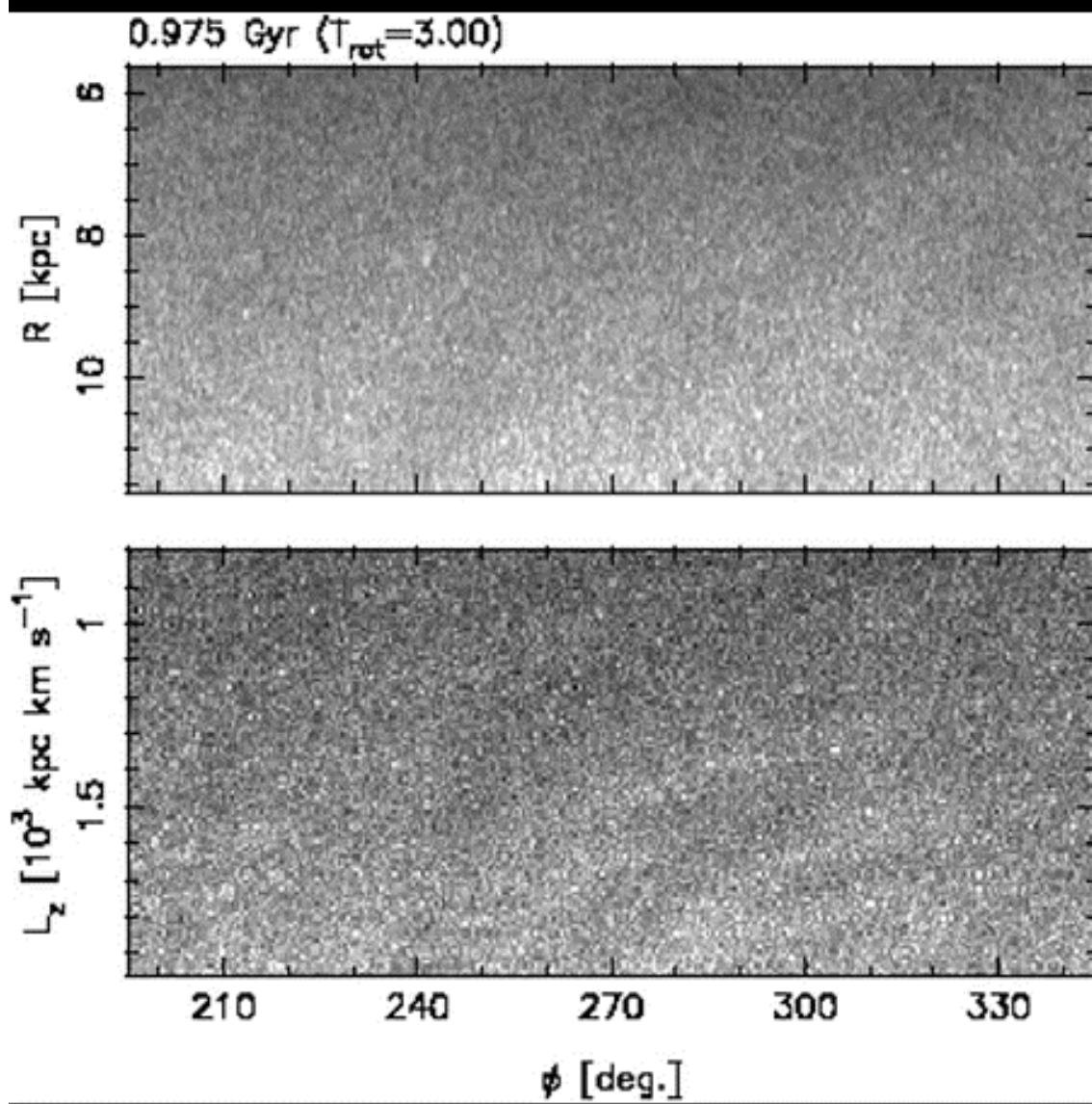


(Baba et al. 2013: 星だけ)

- Swing amplification (Epicyclic motion+ Shear)
+ 渦状腕の重力 \Rightarrow 成長
- コリオリカ $>$ 渦状腕の重力 \Rightarrow 破壊
この繰り返し

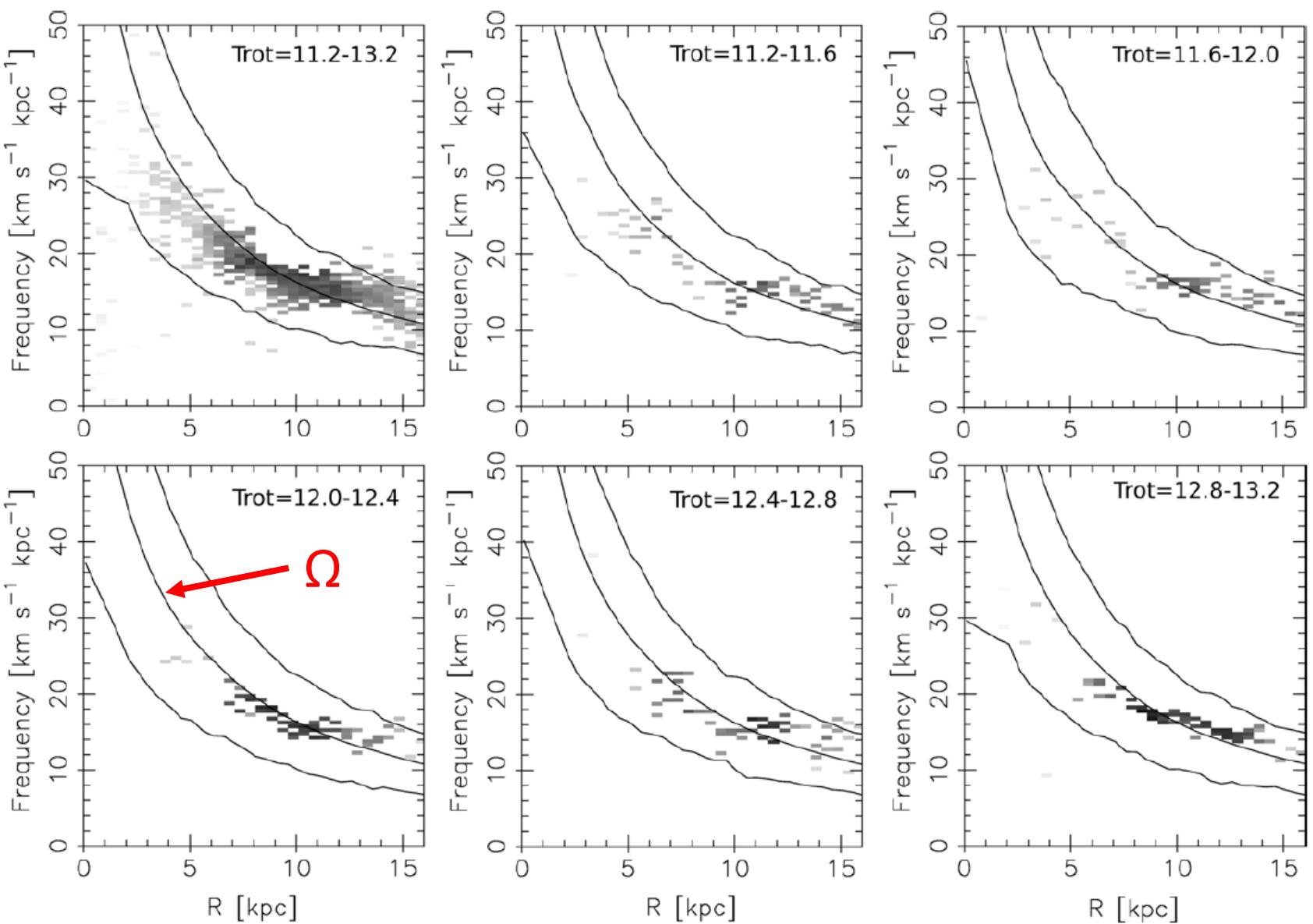
回転方向 \rightarrow





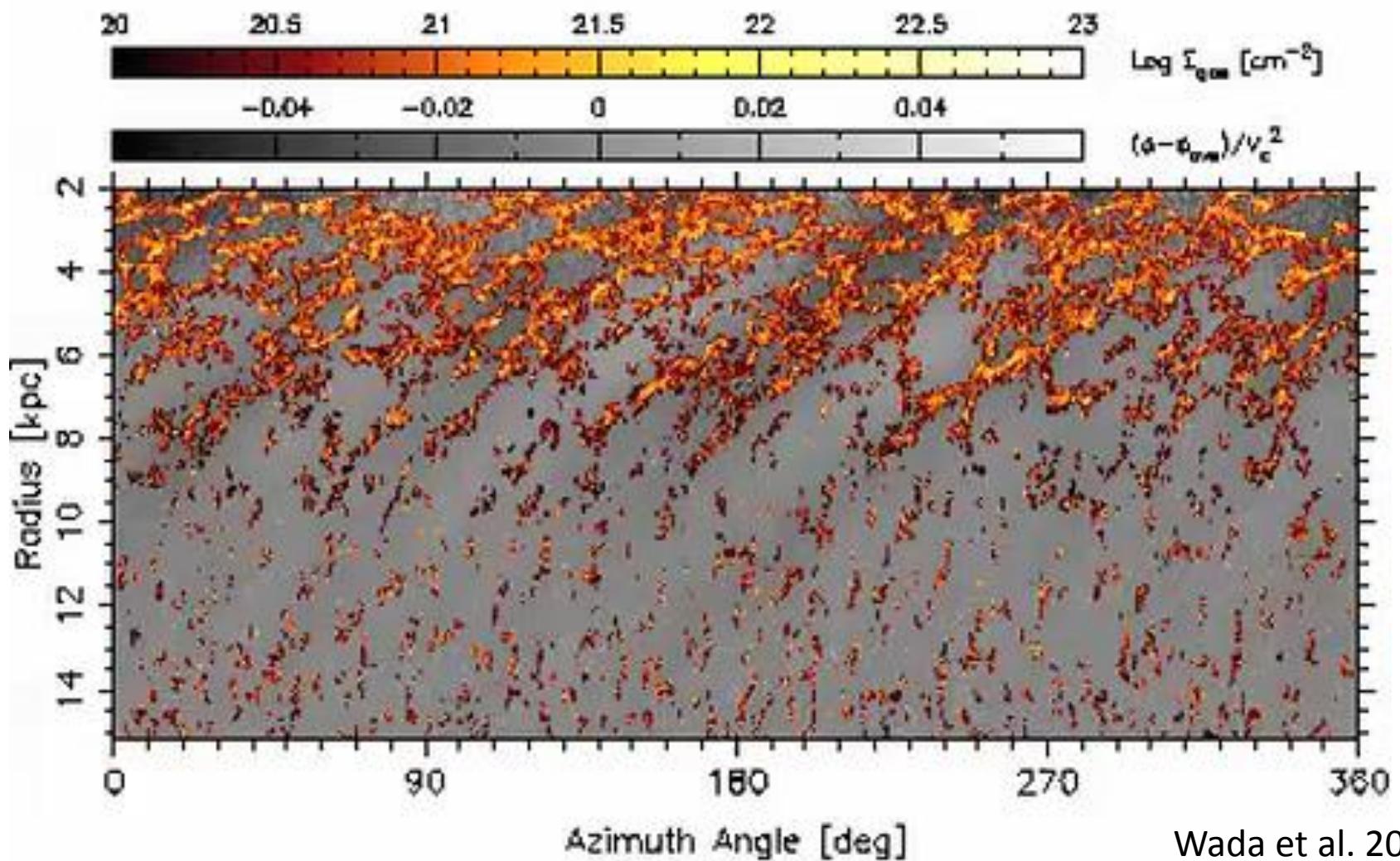
渦状腕に後ろから入る星 加速 外側へ
 渦状腕に前から入る星 減速 内側へ
 ⇒ 半径方向の移動 大きな非円運動

Baba et al. 2013



- $\Omega_p = \Omega$ (密度波ではない)

TIME=0.250Gyr

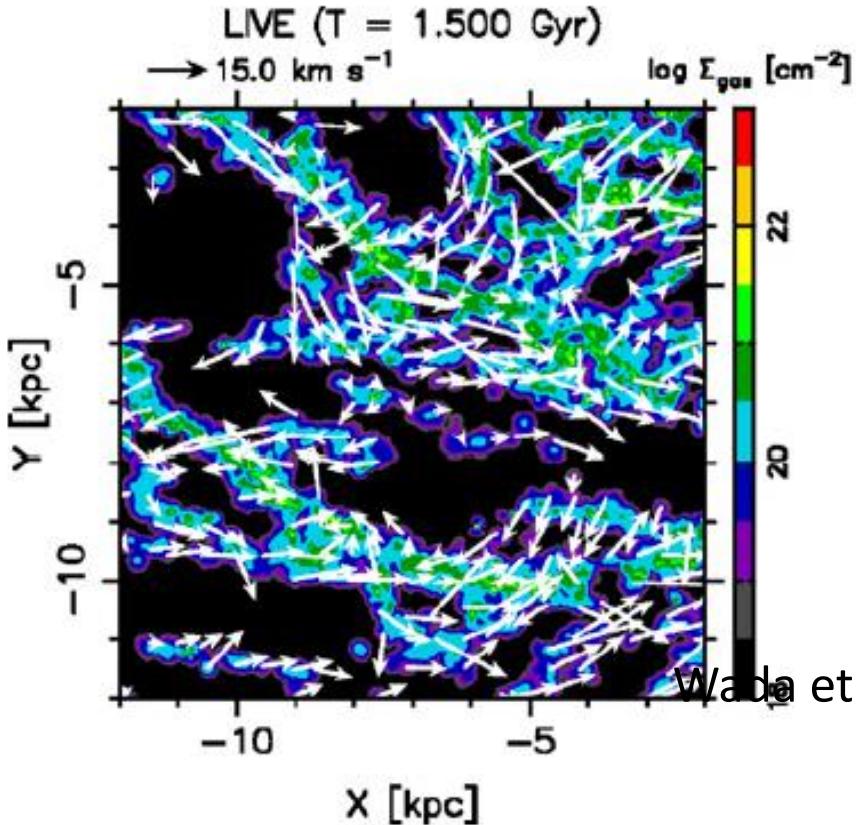


Wada et al. 2011

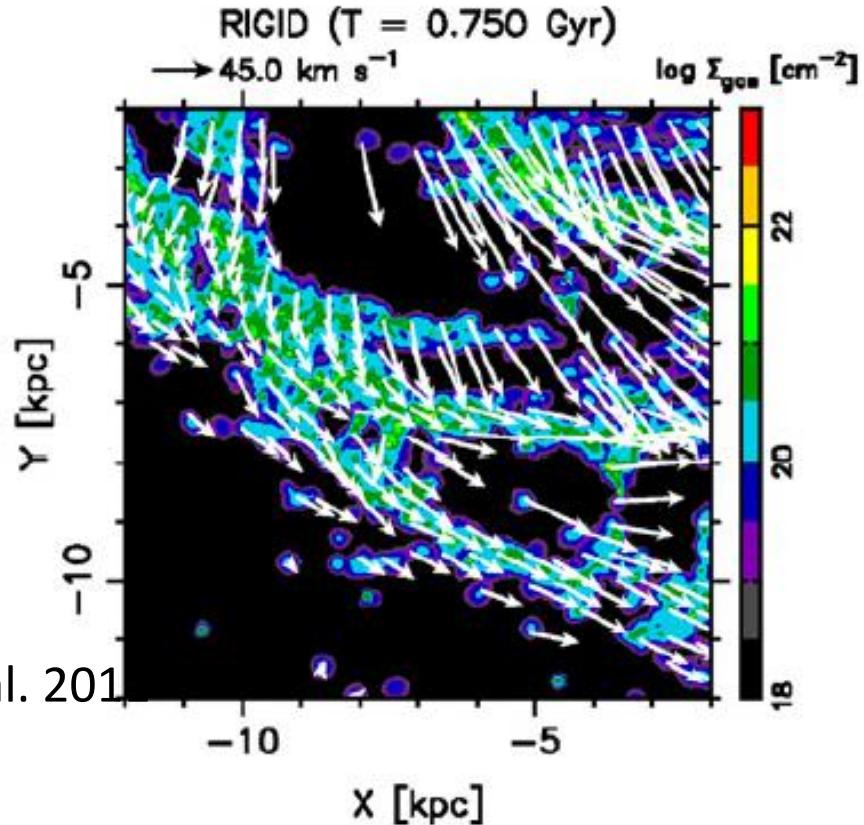
星の渦状腕に対応してガスの渦状腕が形成される

渦状腕におけるガスの運動

Wada et al. (2011)



動的平衡渦状腕

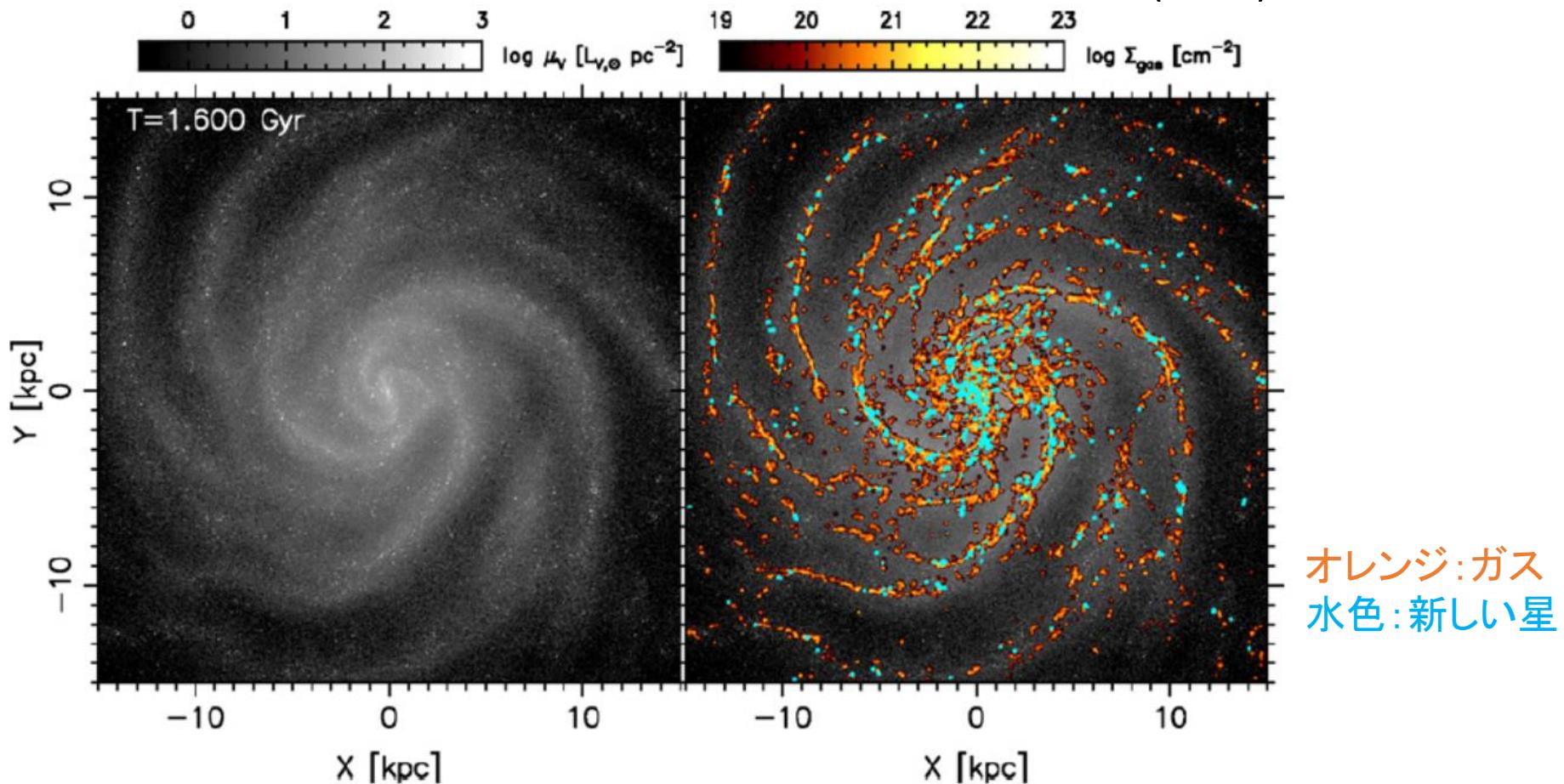


定常密度波

- 定常密度波のようなストリーミングモーションなし

ガスと星の分布

Wada et al. (2011)



- 涡状腕でのガスと星のオフセットなし
- 下流側のSpur構造なし

観測と比較可能な理論からの予想

	運動学的 密度波	定常密度波	動的平衡 渦状腕
パターン速度	$\Omega_p = \Omega - \frac{\kappa}{2}$	$\Omega_p = \text{const.}$	$\Omega_p = \Omega$
ストリーミングモー ション	○?	○	×(のようなも のは見える?)
ガスと星形成領域の オフセット	○?	○	×
Spur構造	○?	○	×

3. 渦状構造形成のトリガー

(a) 棒状構造



M83



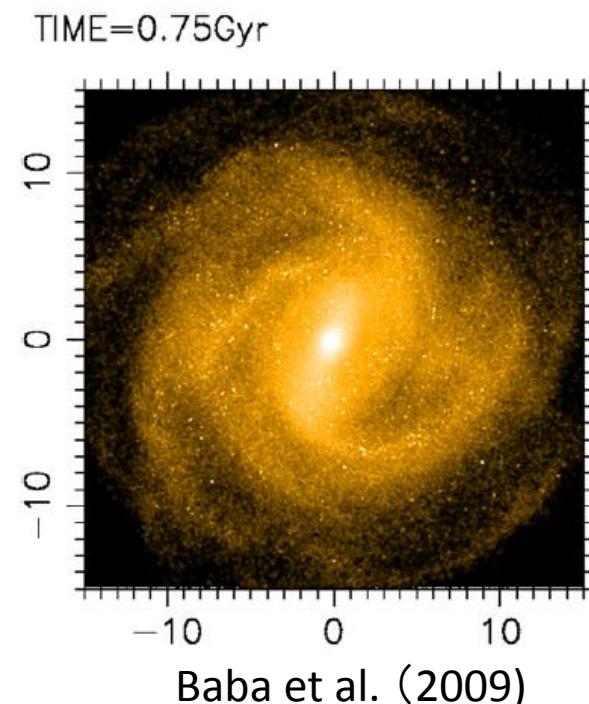
NGC4321

シミュレーション

例えば

- Sellwood & Sparke (1988) : **密度波**
パターン速度が棒状構造と違う
- Rautiainen & Salo (1999) : **密度波**
パターン速度が棒状構造と同じ/違う
複数のパターン速度
- Baba et al. (2009), Grand et al. (2012) :
動的平衡渦状腕

どのように渦状構造が形成されるか、
まだ明らかではない



(b) 相互作用



M51

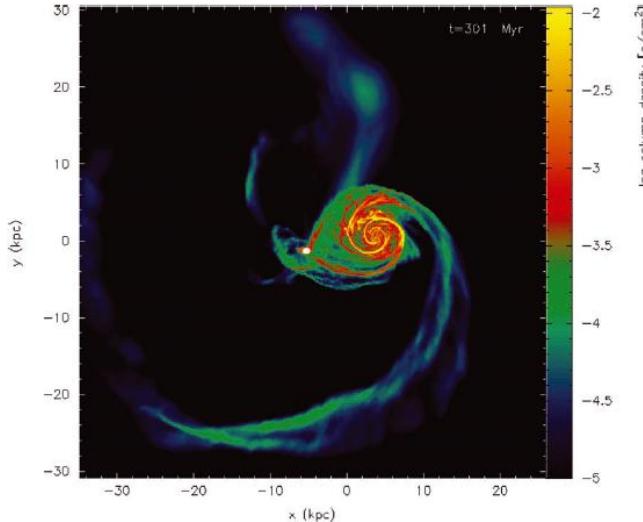
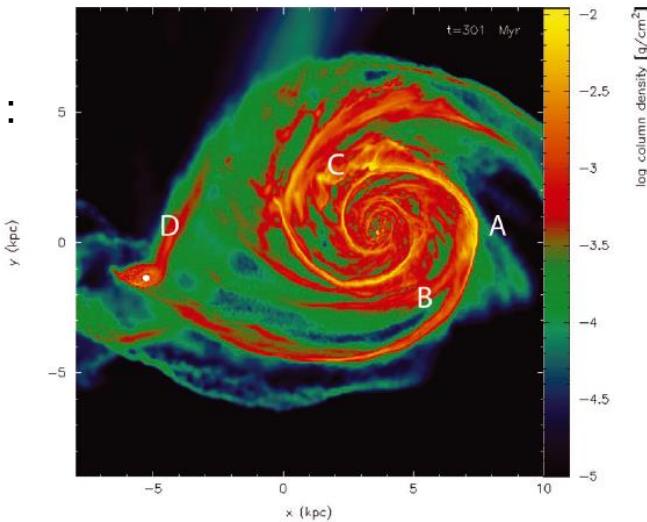


M81

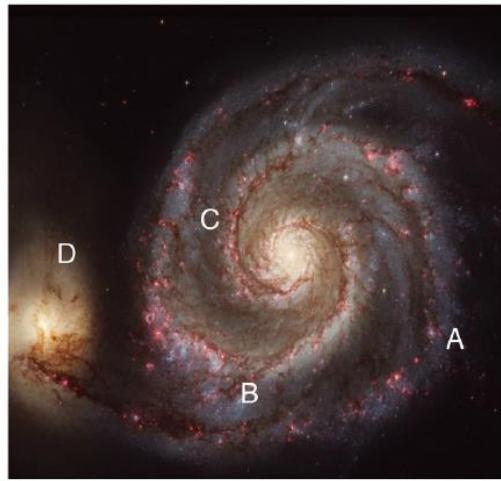
シミュレーション(M51を再現)

Dobbs et al. (2010)

シミュレーション：
ガスの分布



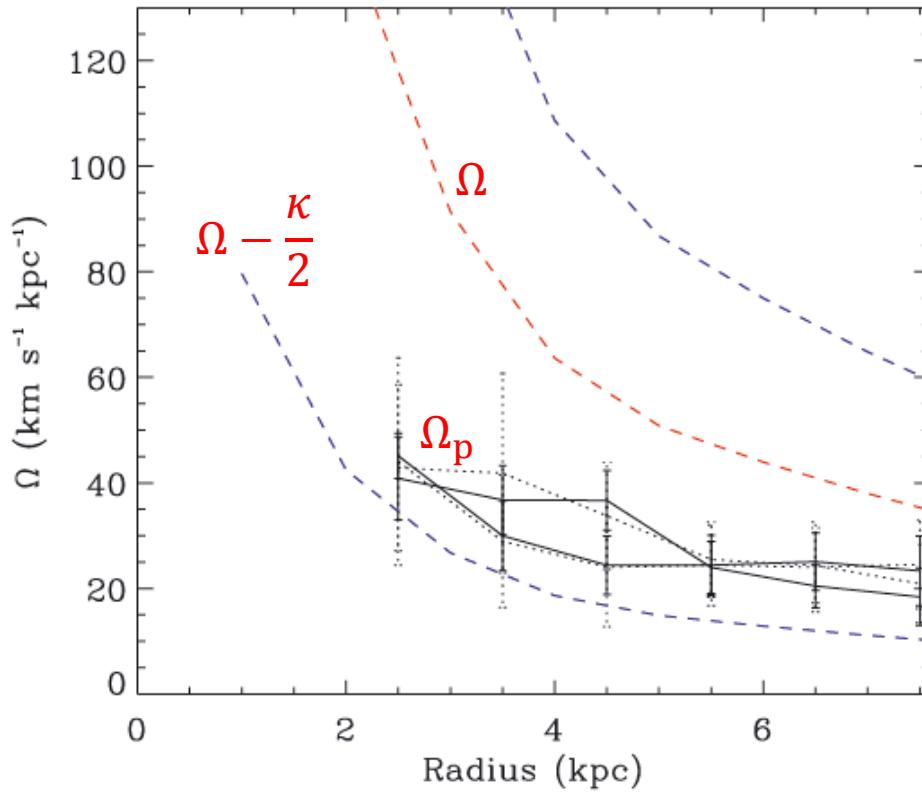
観測：可視



観測：HI



パターン速度



Dobbs et al. (2010)

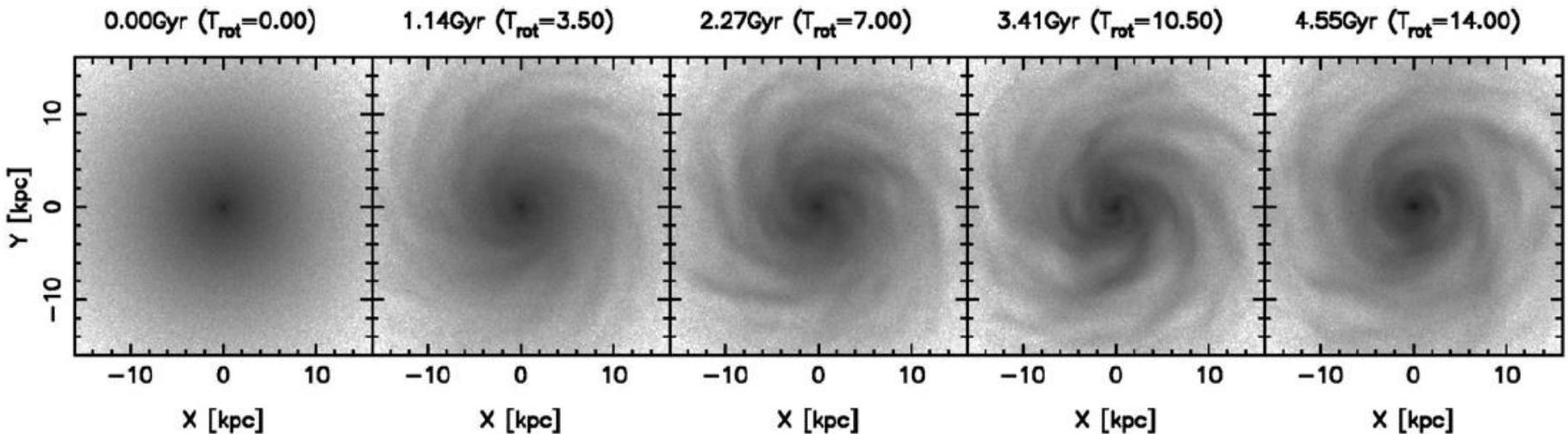
- Ω_p は一定でない
⇒ 定常密度波ではない（寿命~ 3×10^8 年）
運動学的密度波？

(c) 自然発生

NGC628



シミュレーション



Baba et I. (2013)

- トリガーがなくても渦状構造を形成可能
⇒ ただし、動的平衡渦状腕

自然発生のGrand design銀河を作れたシミュレーションは今のところない

銀河のタイプと渦状構造の相関

Kormendy & Norman (1979) : 54個

Elmegreen & Elmegreen (1982) : 305個

Seigar & James (1998) : 45個

Kendall et al. (2011, 2015) : 31個

- 棒状構造
 - 多重渦状腕 : 増える
 - Grand design : 相関なし ⇒ 動的平衡渦状腕？
- 相互作用
 - Grand design : 相互作用の強さと相関 ⇒ 密度波？
- 孤立銀河
 - Flocculent : 増える (2/3) ⇒ 動的平衡渦状腕？
 - Grand design : あるけど弱い (1/3) ⇒ 密度波？

相互作用の強さと二本腕の強さの相関

- 強い相互作用を受けた
銀河ほど強い二本腕

相互作用の強さ

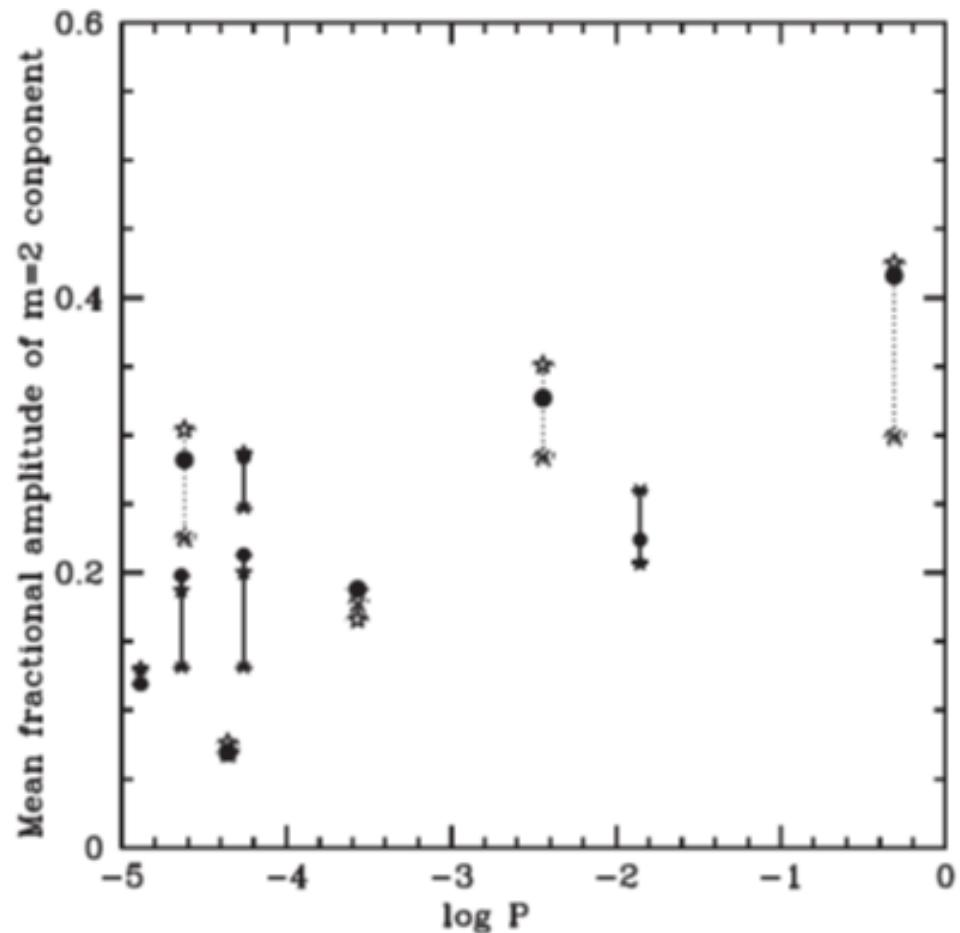
$$P = \frac{M_c/M_g}{(r/R)^3}$$

M_c : 伴銀河の質量

M_g : 銀河の質量

r : 銀河間の距離

R : 銀河の半径



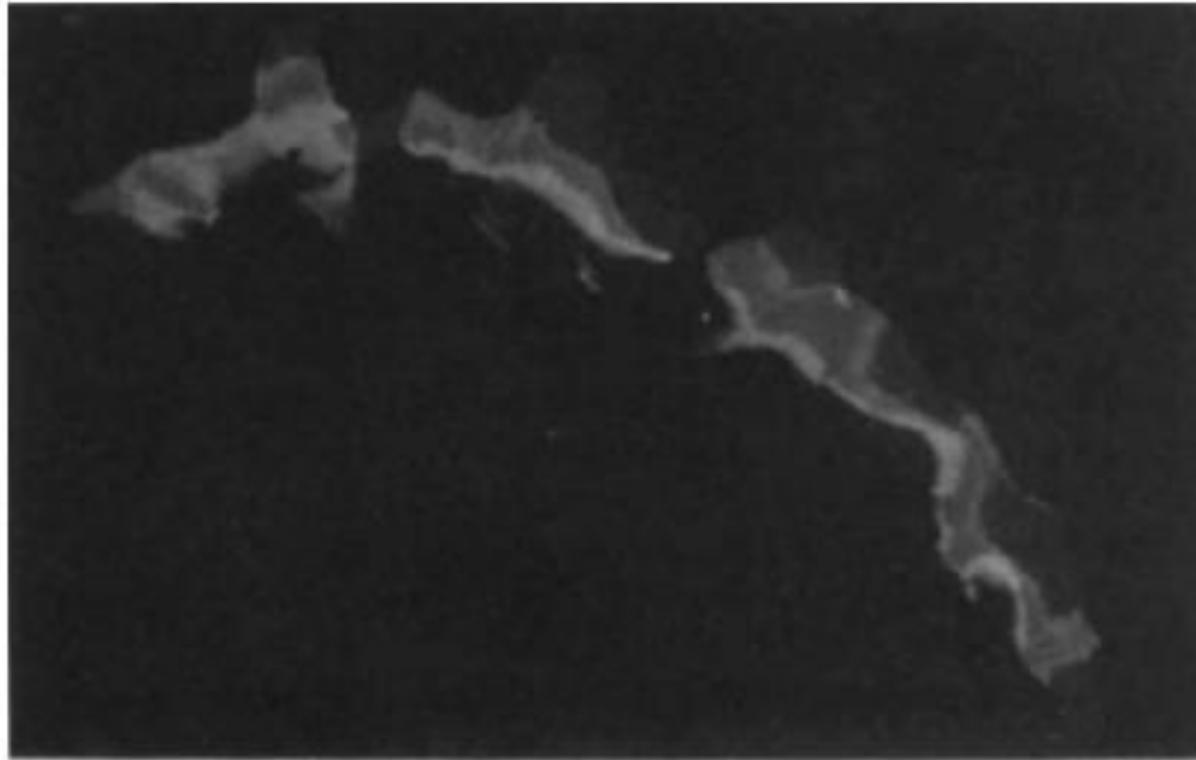
Kendall et al. (2015)

4. 観測による検証:M51の場合



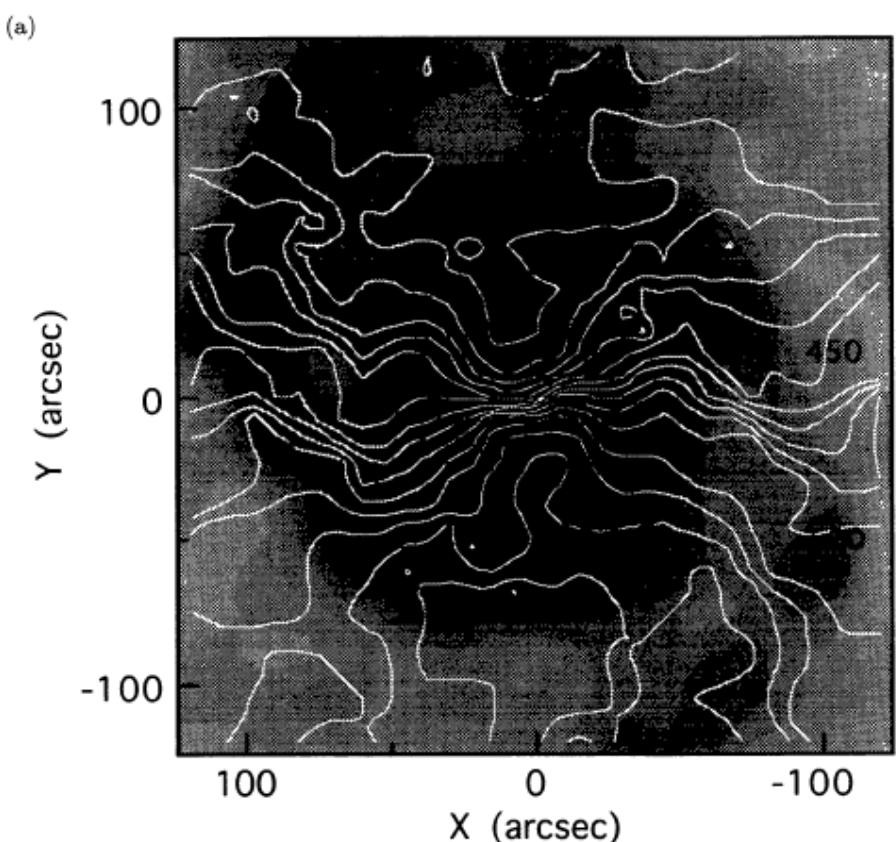
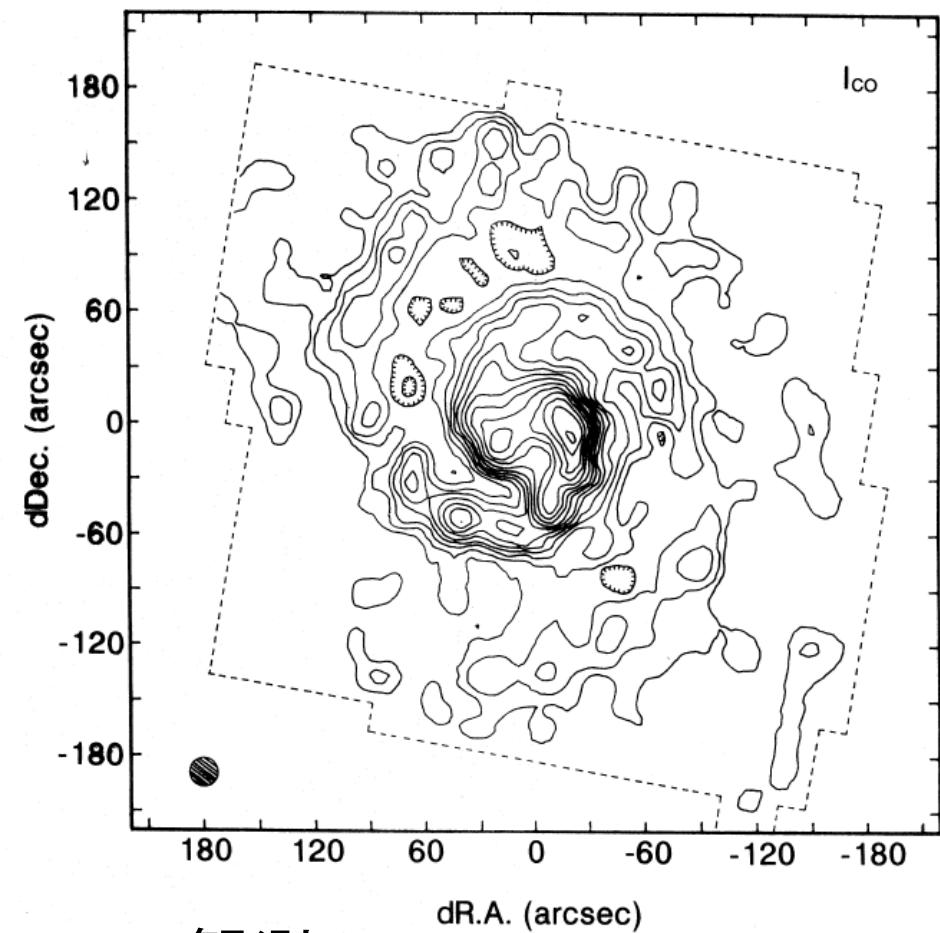
分子ガスの観測

- 渦状腕を横切る際の速度変化
⇒ ストリーミングモーション



渦状腕の一部で $20\text{-}30\text{ km s}^{-1}$ の速度変化を検出(CO観測)
(Vogel et al. 1988, Nature 334, 402)

スパイラルフェイズ毎の速度ベクトルの変化 (Kuno and Nakai 1997, PASJ)



CO観測
Nakai et al. 1994, PASJ 46, 527

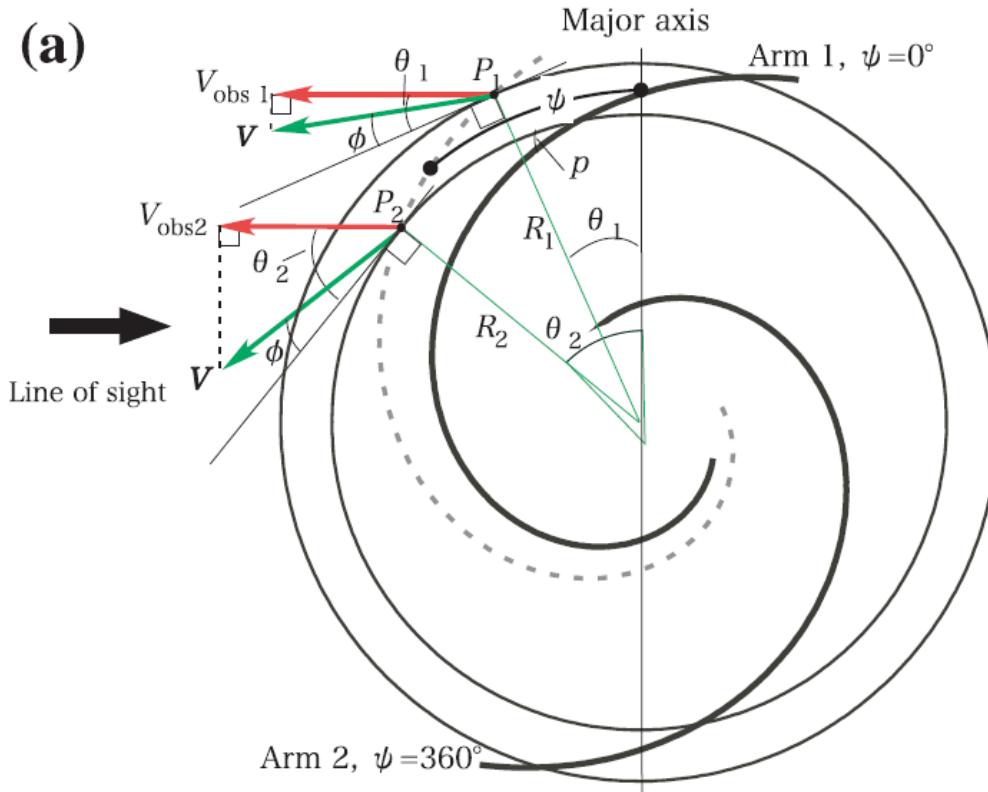
渦状腕に沿って等速曲線のゆがみ
⇒ ストリーミングモーション

銀河のある点(r, θ)での視線速度

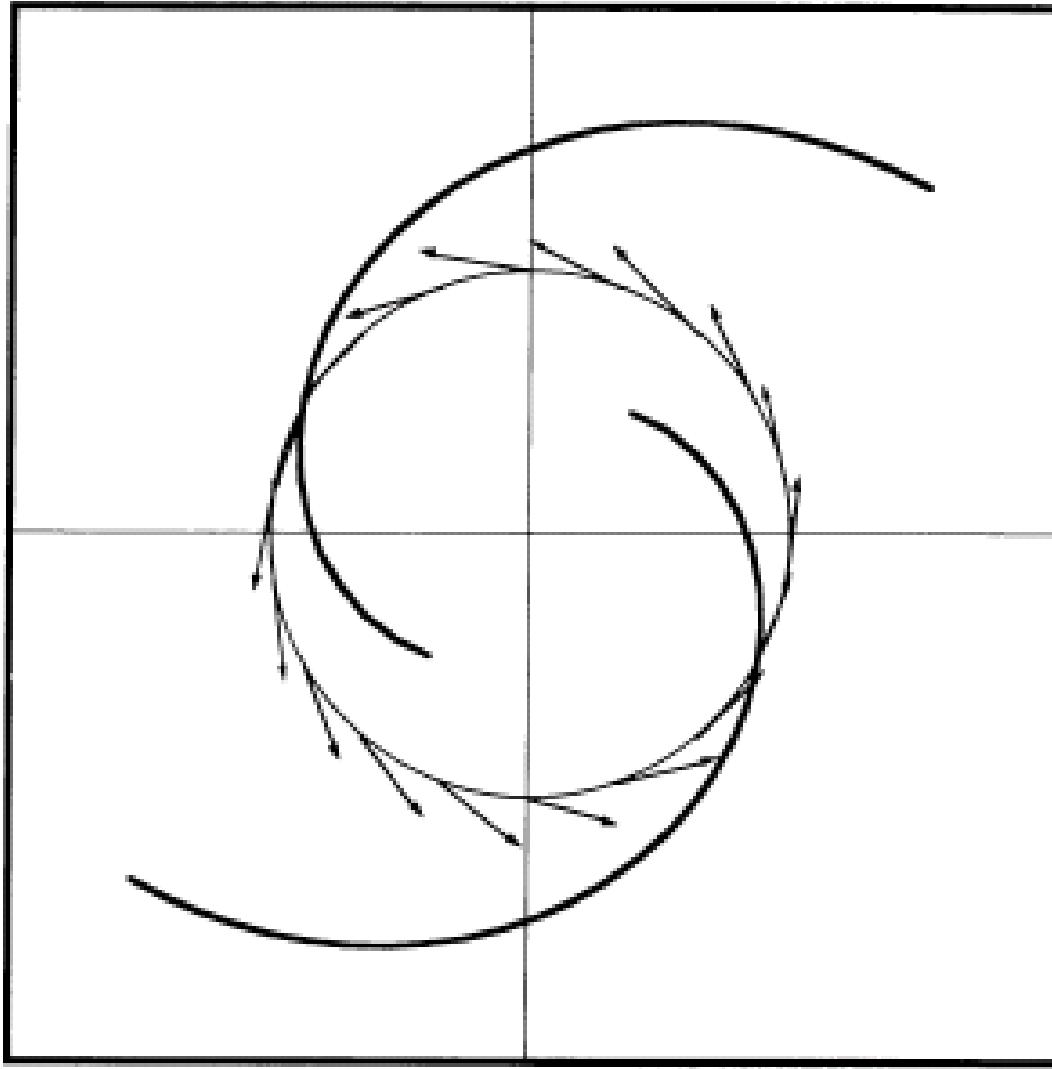
θ : 銀河の短軸から測った位置角

$$V_r = V_{sys} - V \sin(\theta - \phi) \sin i \quad V : \text{速度ベクトルの大きさ}$$

ϕ : 速度ベクトルと接線方向の角度



同じスパイラルフェイズでは
速度ベクトル(V, ϕ)は同じと
仮定



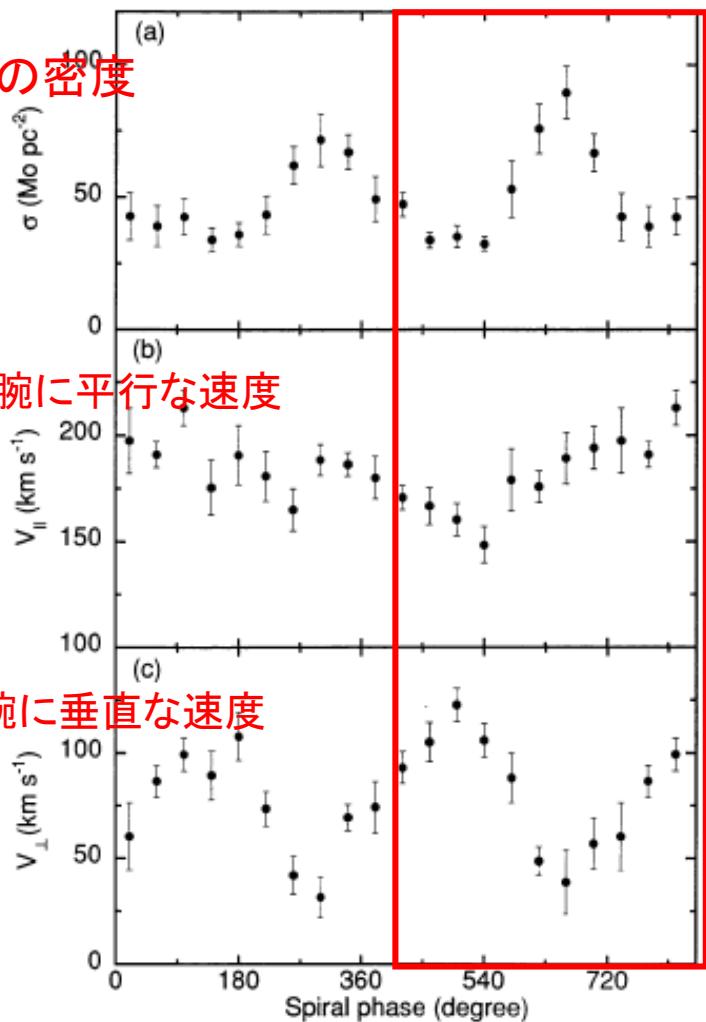
Kuno and Nakai (1997)

各スパイラルフェイズの速度ベクトル

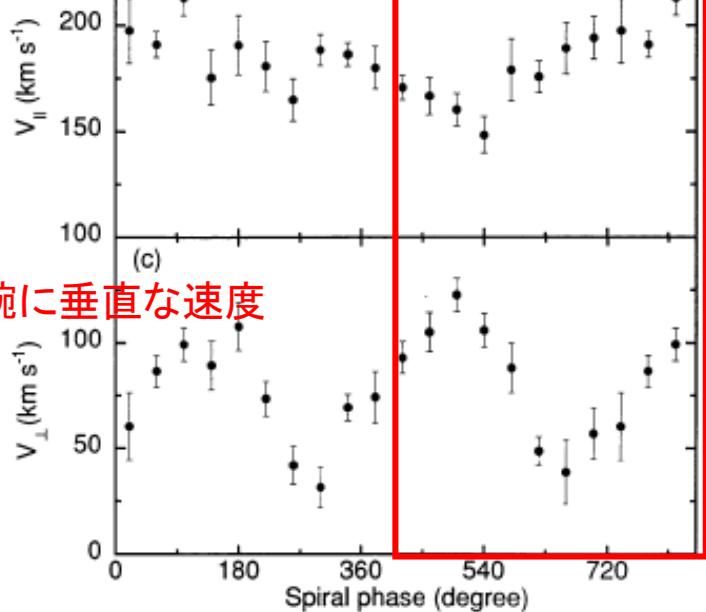
Arm: inward motion

Interarm: outward motion

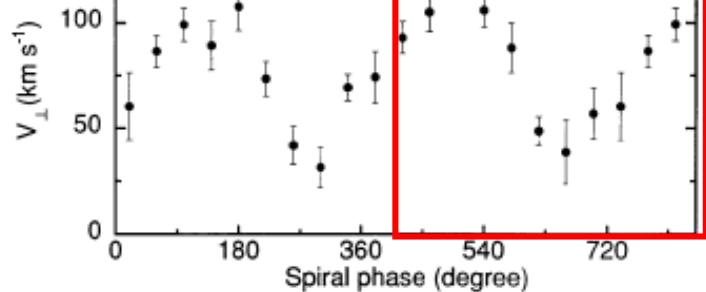
ガスの密度



渦状腕に平行な速度



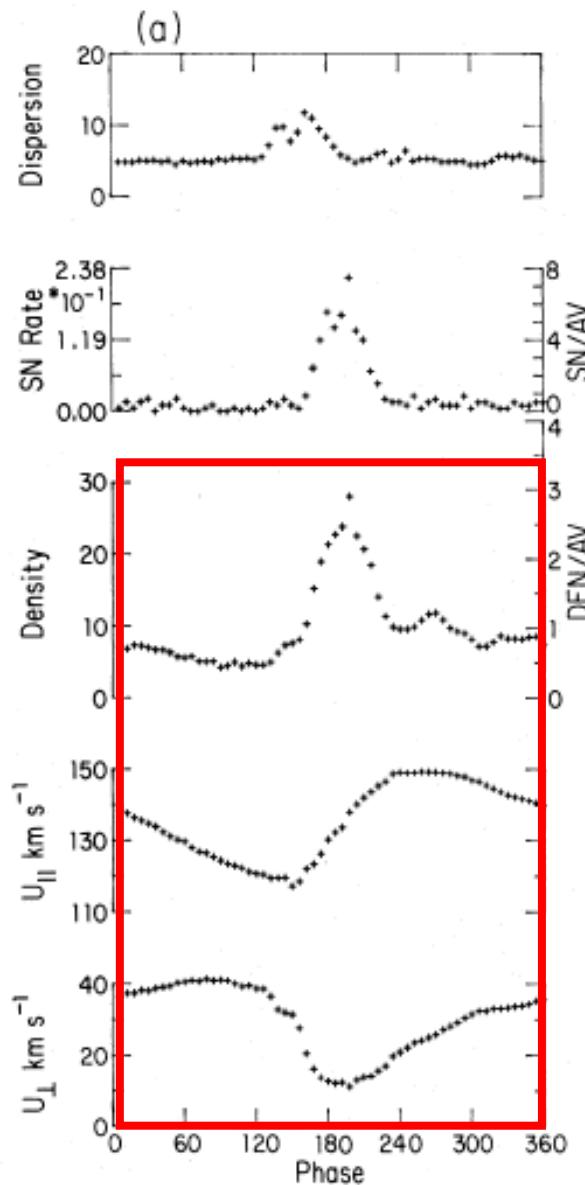
渦状腕に垂直な速度



観測データ(Kuno and Nakai 1997)

密度波を支持

(ただし、腕に垂直方向の速度変化が予想より大きい)



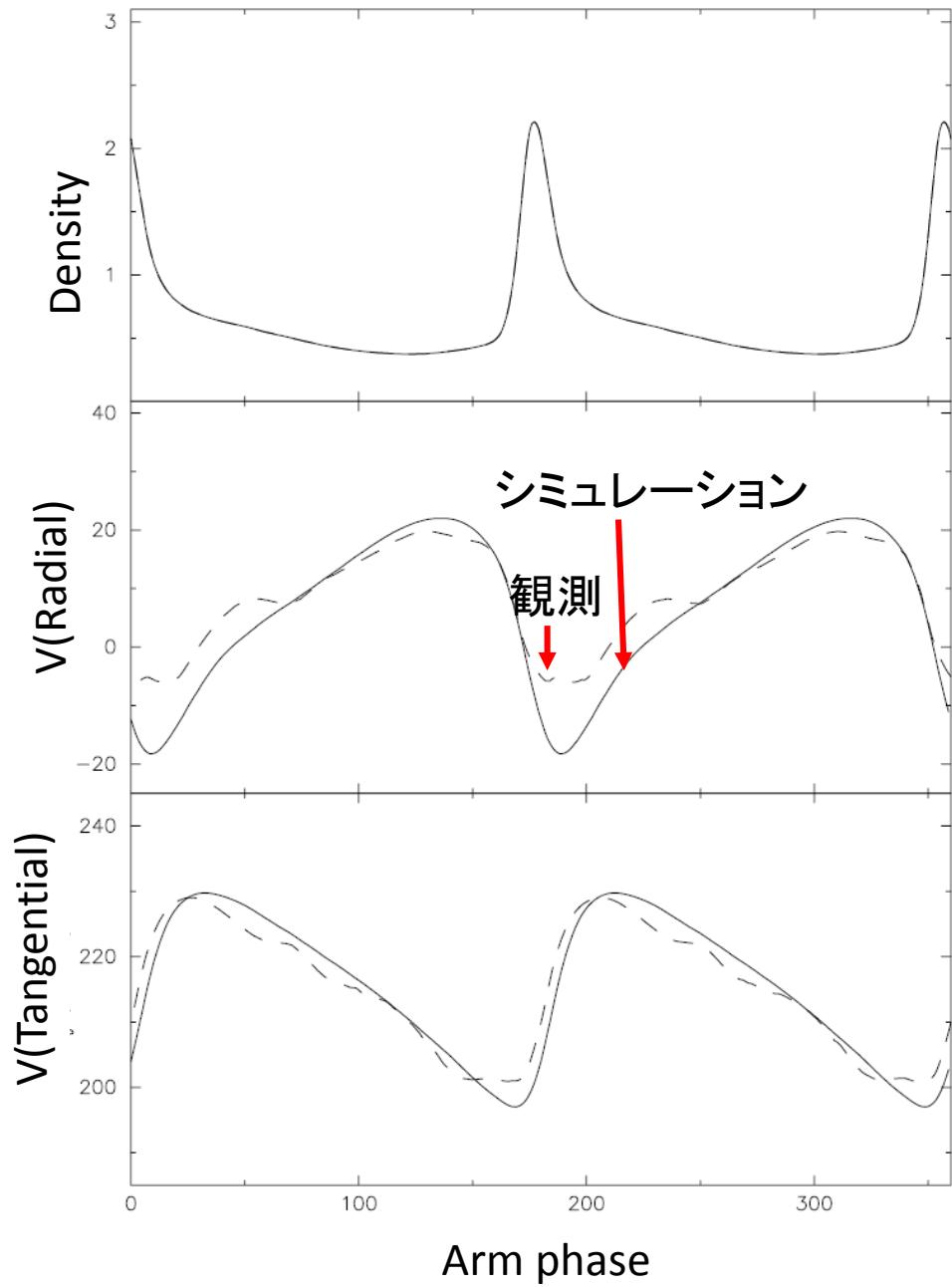
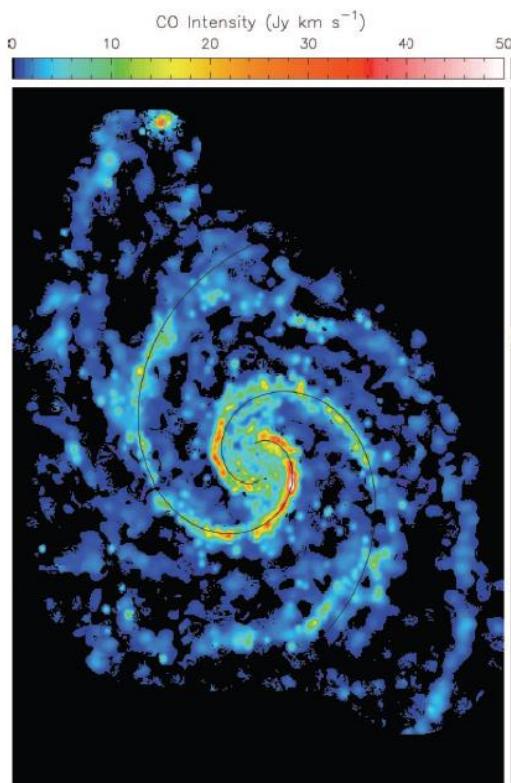
シミュレーション(Roberts, Hausman 1984)

- Shetty et al. 2007

ストリーミングモーション 銀河衝撃波

ただし、

速度構造単純ではない



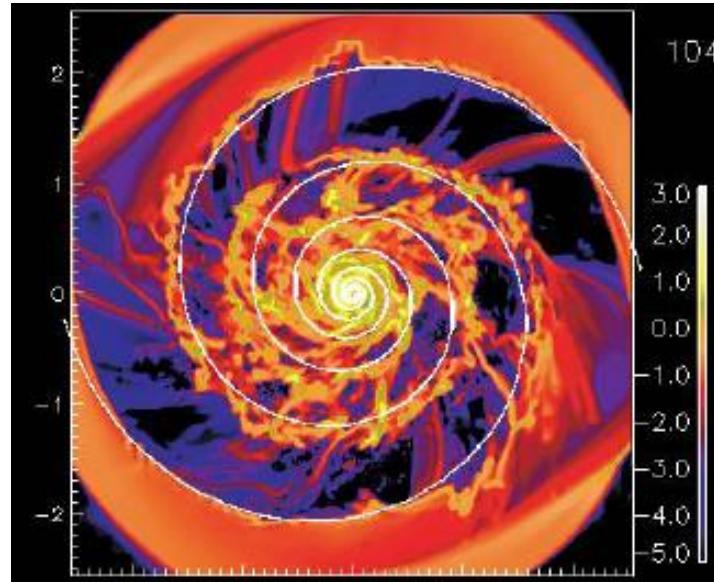
分子ガスの存在形態の変化

渦状腕でのGMC・GMA形成

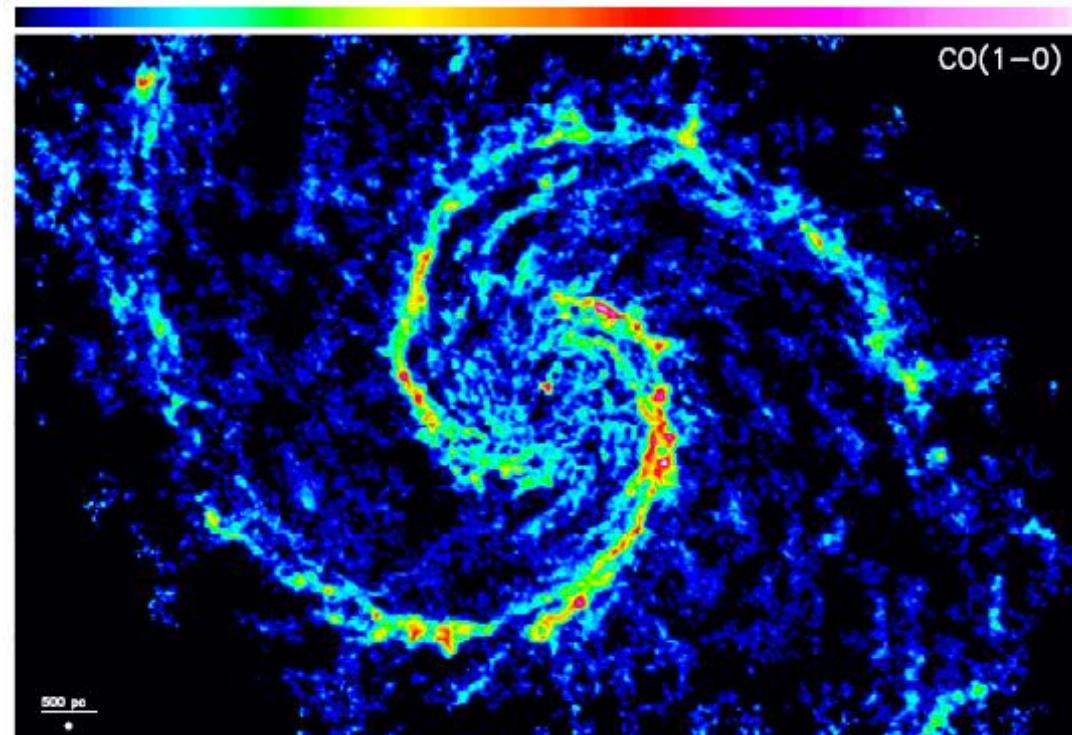
Spiral arm: GMC・GMA形成

↓ 差動回転によるshear

Interarm: spurs

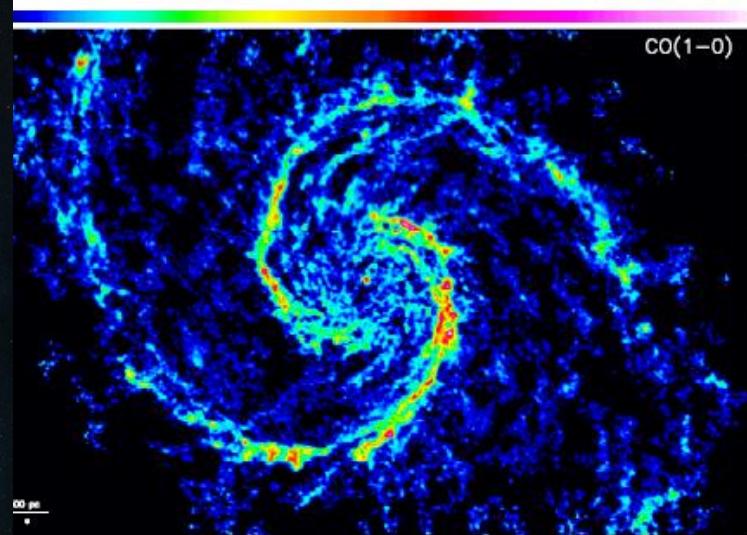


シミュレーション
(Wada 2008)



CO (Schinnerer et al. 2013)

Spur構造

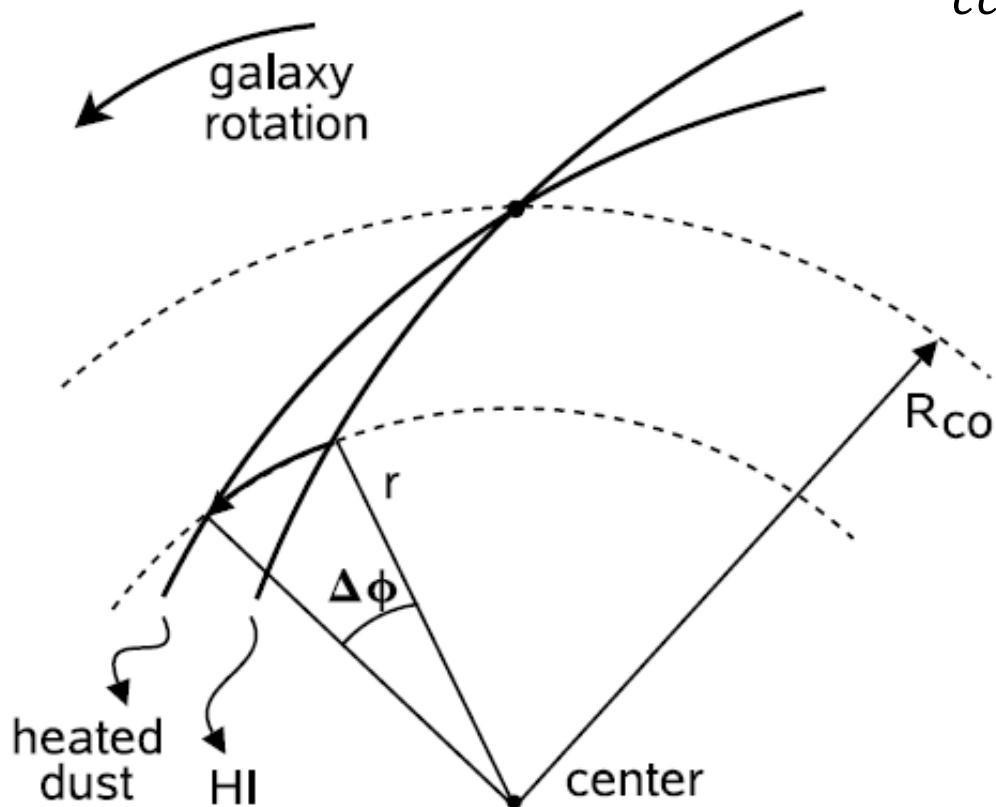


CO (Schinnerer et al. 2013)

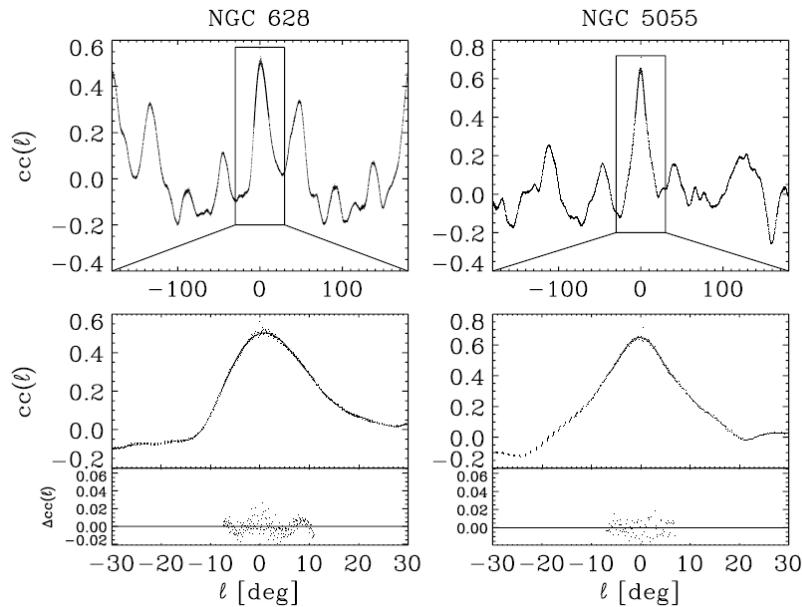
密度波を支持

渦状腕のオフセット

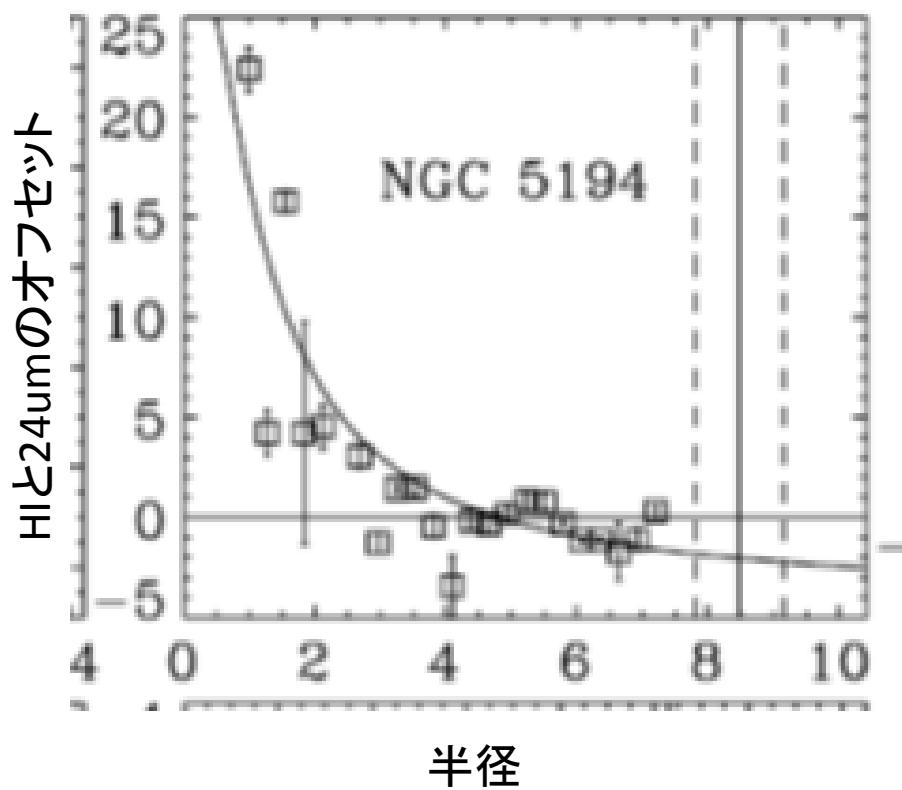
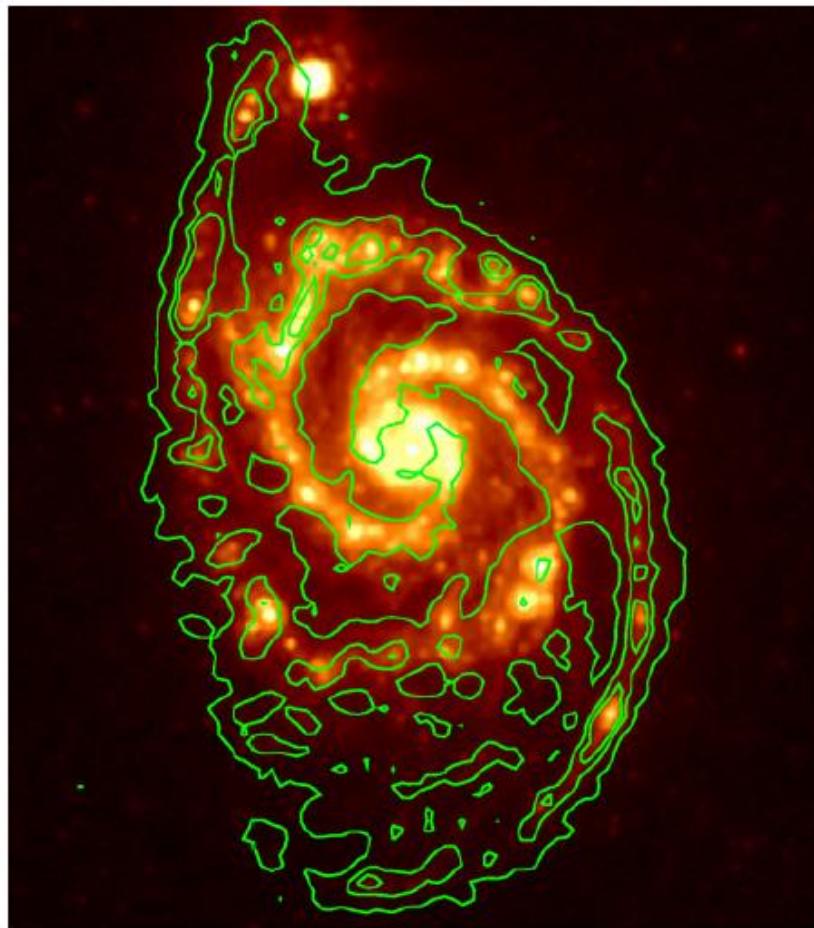
- Tamburro et al. 2008



$$cc_{x,y}(l) = \frac{\sum_k [(x_k - \bar{x})(y_{k-l} - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_k (x_k - \bar{x})^2 \sum_k (y_k - \bar{y})^2}}$$



ガスと星形成領域のオフセット

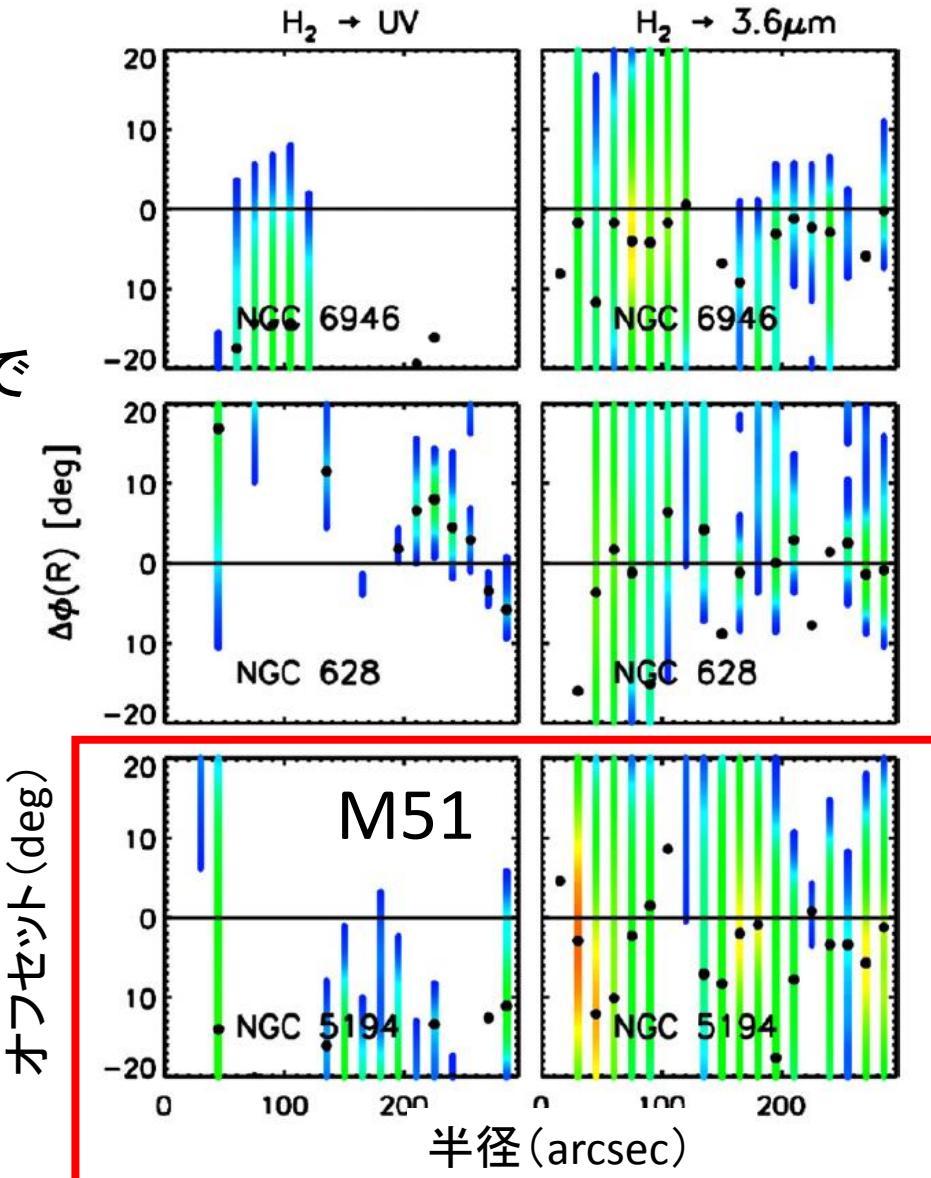


渦状腕のオフセット

Foyle et al. 2011

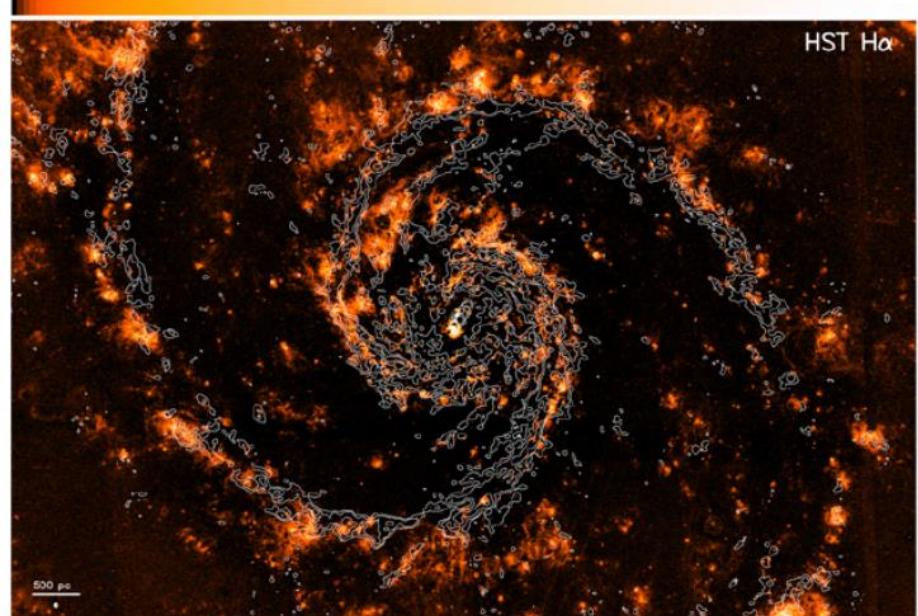
- 分子ガス vs. (UV, 24um, 3.6um) で
オフセットなし(予想と逆方向?)

⇒密度波ではない
(12個の銀河で)



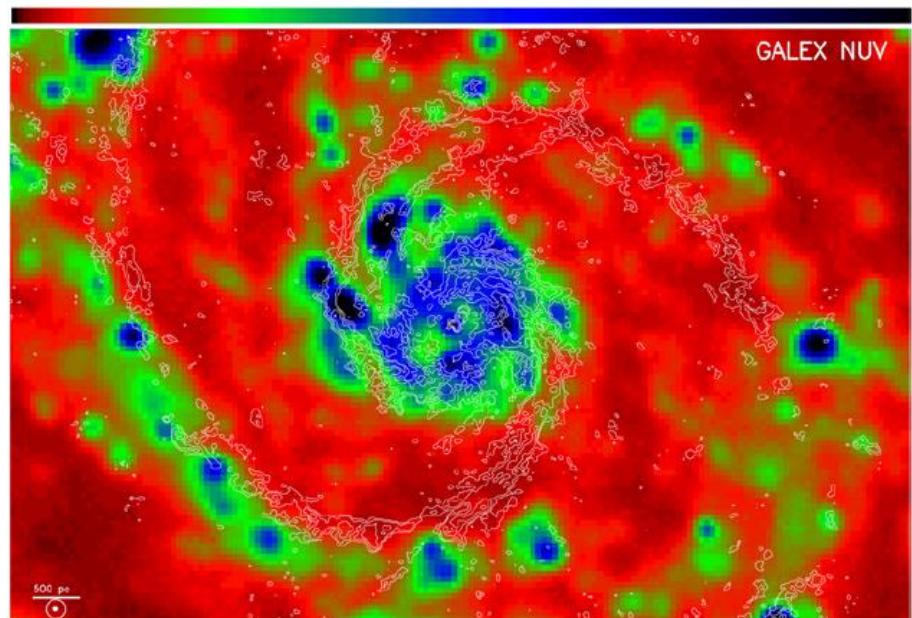
最新の観測

Schinerer et al. (2013)



CO(contour)+Ha

- オフセットあり⇒密度波



CO(contour)+NUV

パターン速度の測定法

TW method (Tremaine & Weinberg 1984)

仮定

- 平らな円盤 (Warpがない)
- パターン速度で回転する系でみた表面輝度は不变

$$\sum(x, y, t) = \sum(r, \varphi - \Omega_p t)$$

x,y:銀河面上の位置
Σ : surface brightness

- 連続の式が成り立つ
 - トレーサーは生成、消滅しない
 - 例えば、星形成の少ないSBO銀河の古い星

$$\frac{\partial \Sigma(x, y, t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [\Sigma(x, y, t) v_x(x, y, t)] + \frac{\partial}{\partial y} [\Sigma(x, y, t) v_y(x, y, t)] = 0$$

$$\Omega_p \sin i = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \delta(Y - Y_0) dY \int_{-\infty}^{\infty} \Sigma(X, Y) V_{\parallel}(X, Y) dX}{\int_{-\infty}^{\infty} \delta(Y - Y_0) dY \int_{-\infty}^{\infty} \Sigma(X, Y) X dX}$$

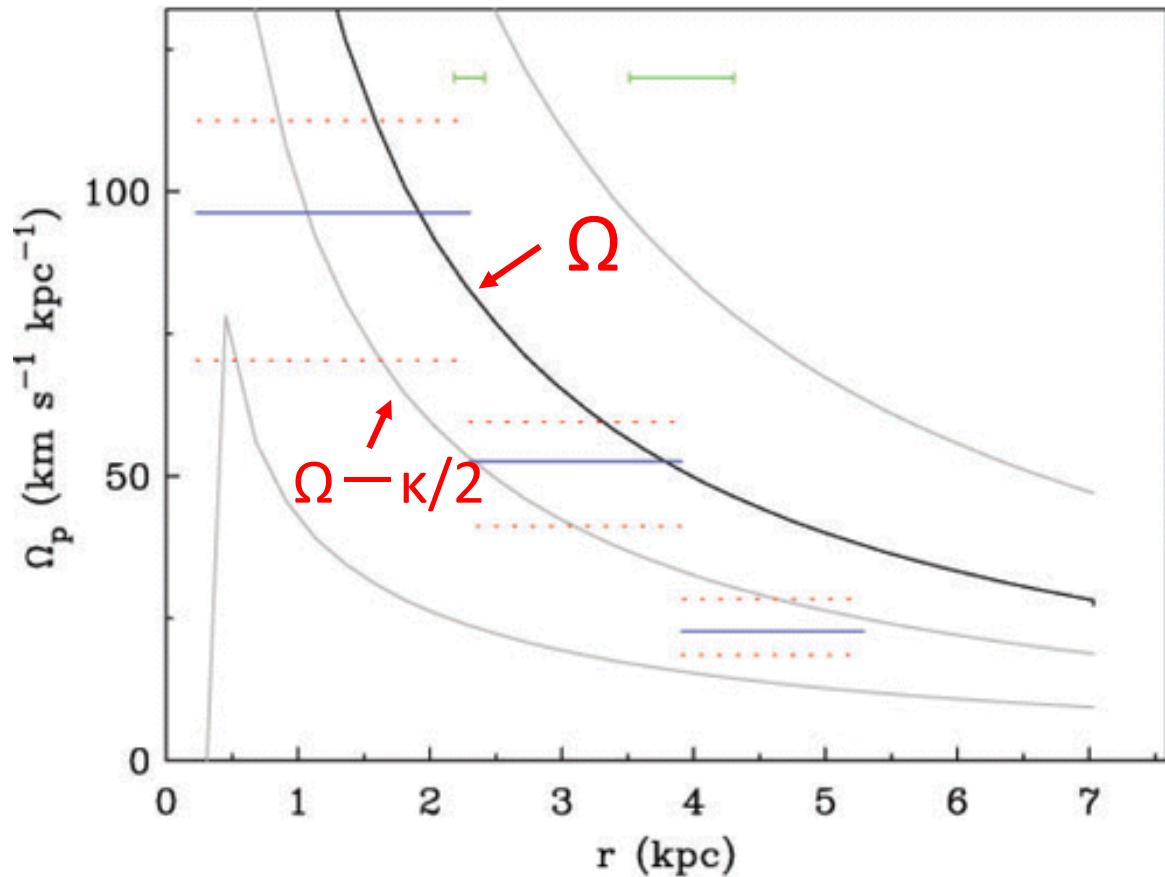
- X,Y: coordinate projected on the sky
- i: inclination angle
- Σ : surface brightness distribution
- V_{\parallel} : velocity field

観測量からパターン速度が求まる

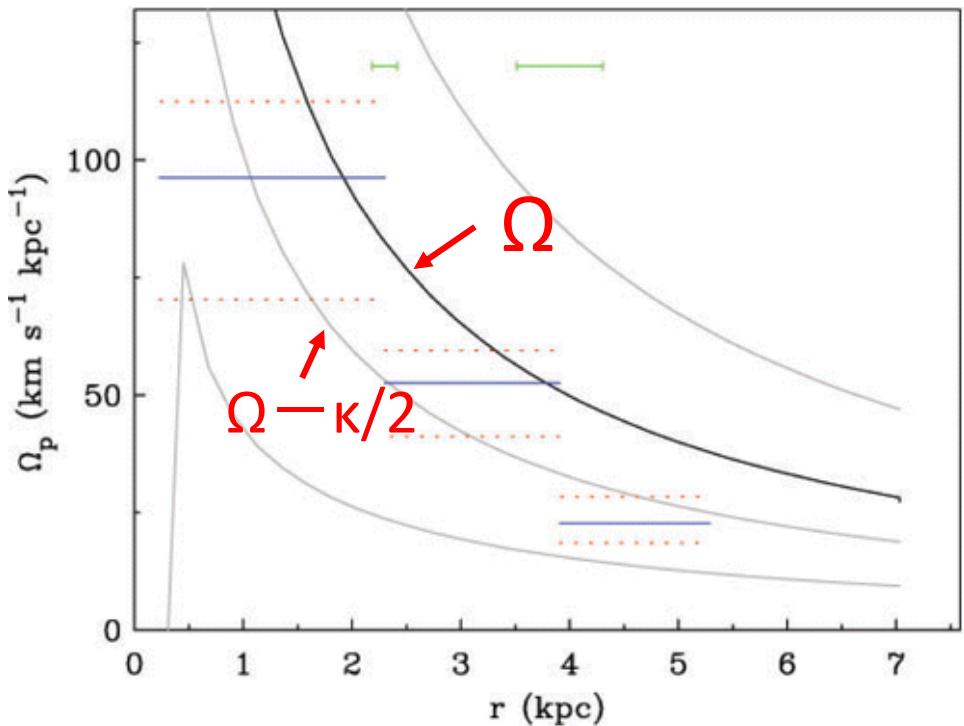
パターン速度に半径依存性があつても成り立つ
 (Merrifield et al. 2006; Meidt et al. 2008)

M51のパターン速度

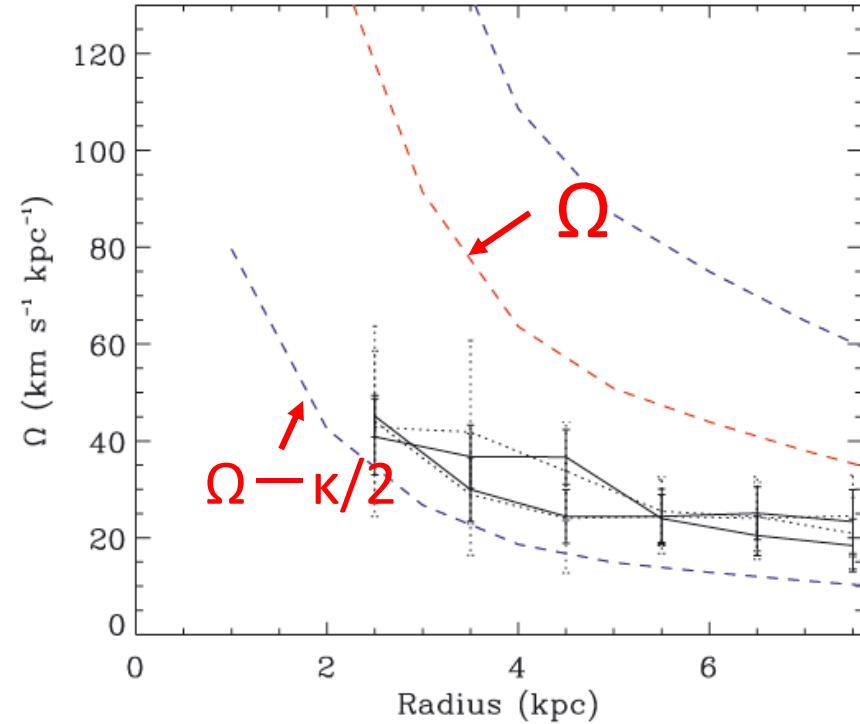
- パターン速度の半径依存性
→物質腕ではない
→定常密度波でもない
- Kinematic density wave?



Meidt et al. 2008



観測
Meidt et al. (2008)

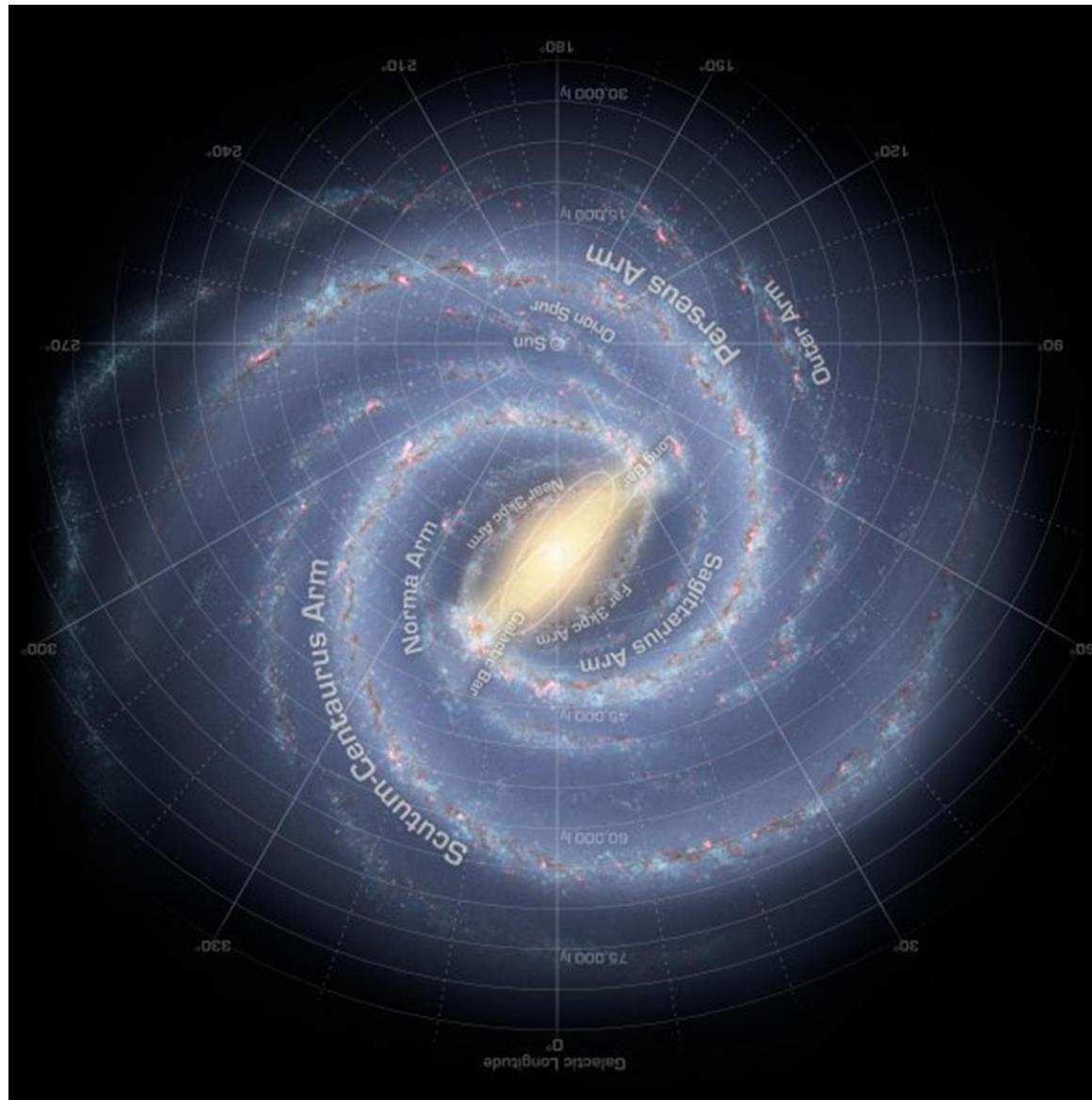


シミュレーション
Dobbs et al. (2010)

M51のまとめ

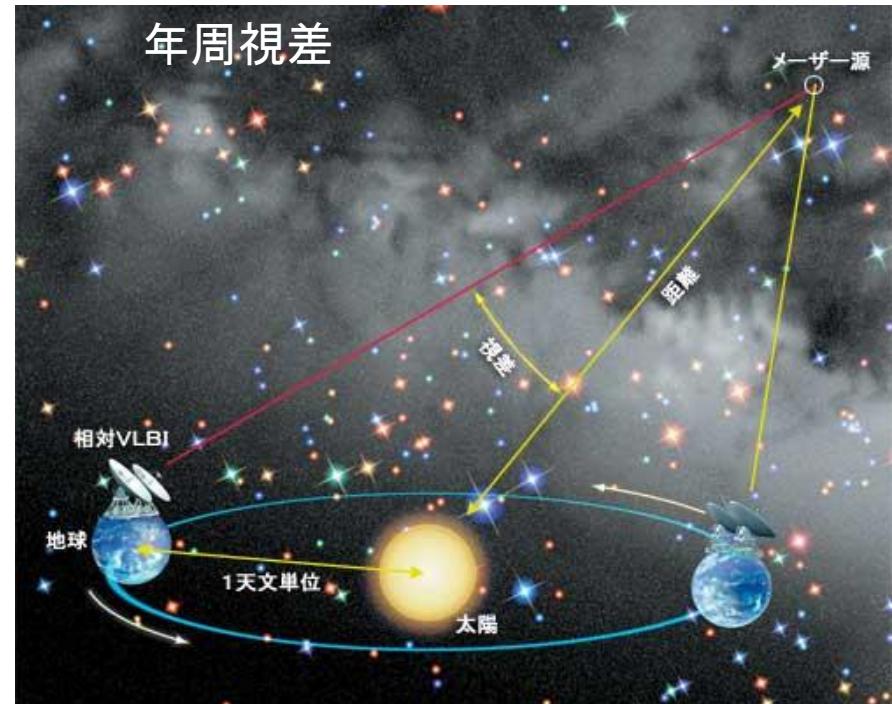
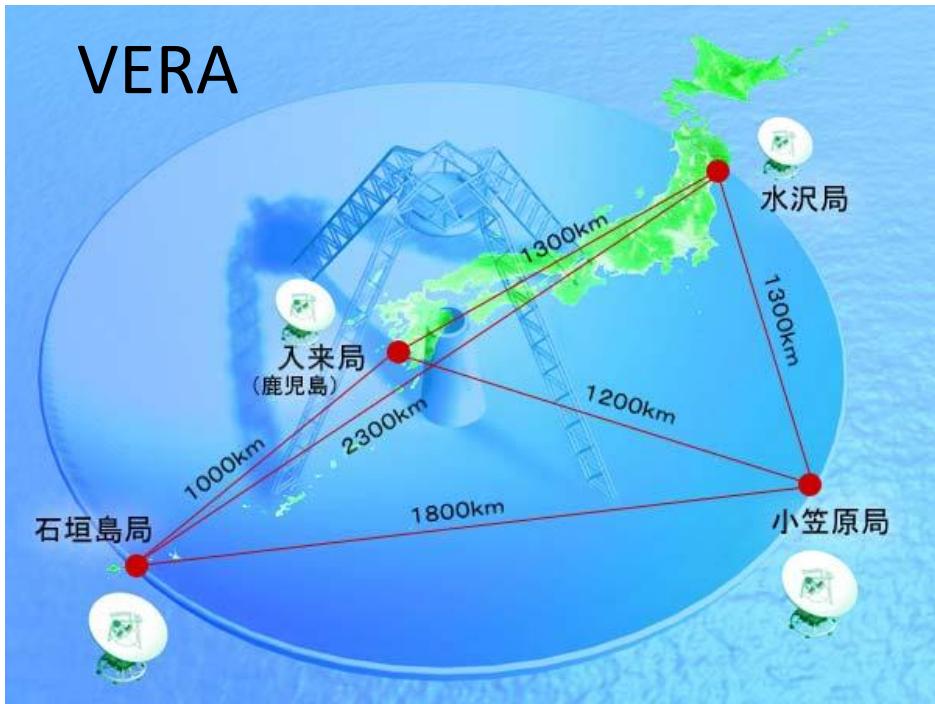
	運動学的 密度波	定常密度波	動的平衡 渦状腕	M51
パターン速度	$\Omega_p = \Omega - \frac{\kappa}{2}$	$\Omega_p = \text{const.}$	$\Omega_p = \Omega$	$\Omega_p \neq \text{const.}$ 複数の Ω_p ?
ストリーミング モーション	○?	○	×	○
ガスと星形成 領域のオフ セット	○?	○	×	○
Spur構造	○?	○	×	○

5. 観測による検証: 銀河系の場合



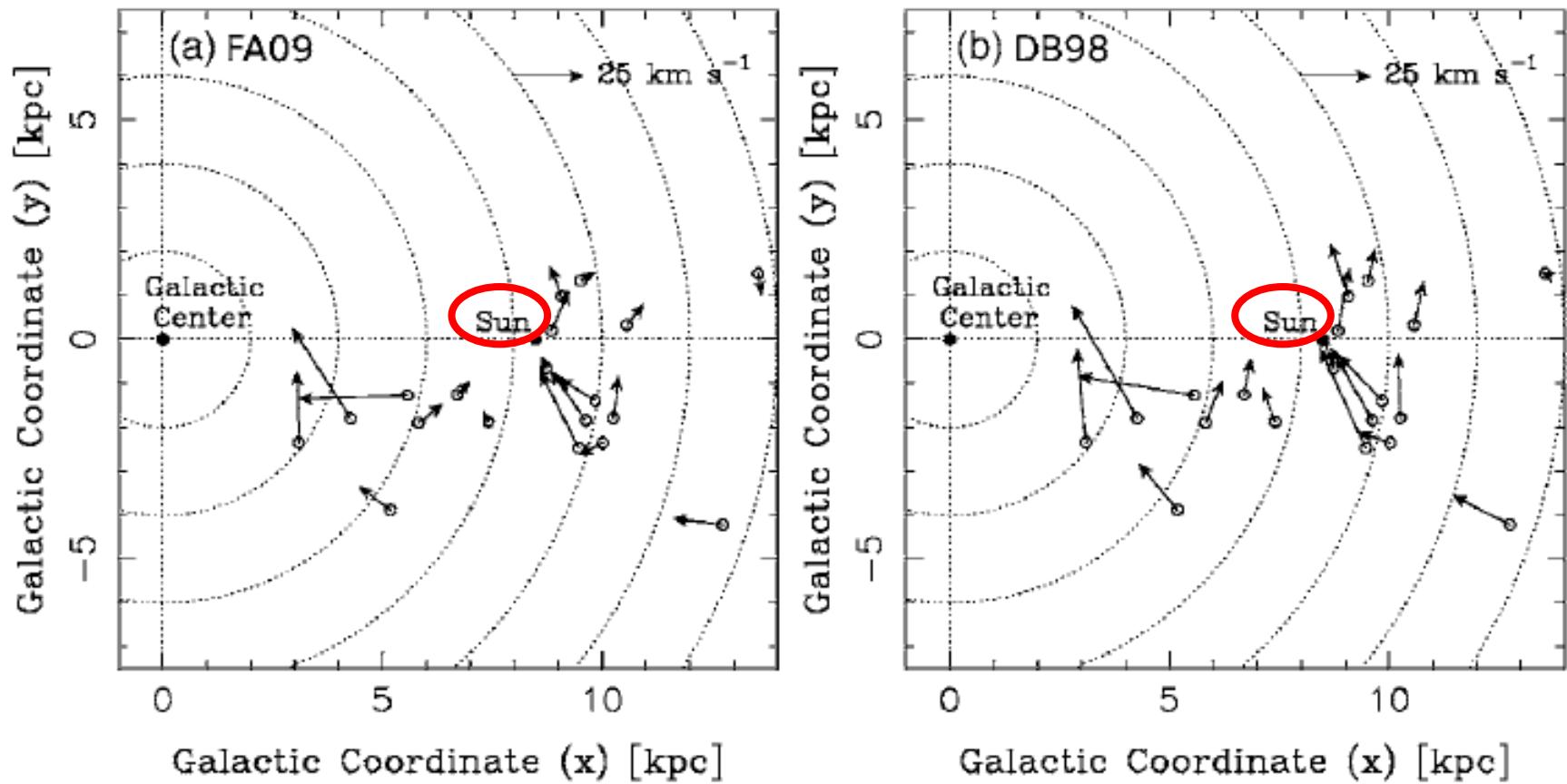
VLBI観測

- VERA:年周視差によるメーザー一天体の距離測定
(10μsecの精度)

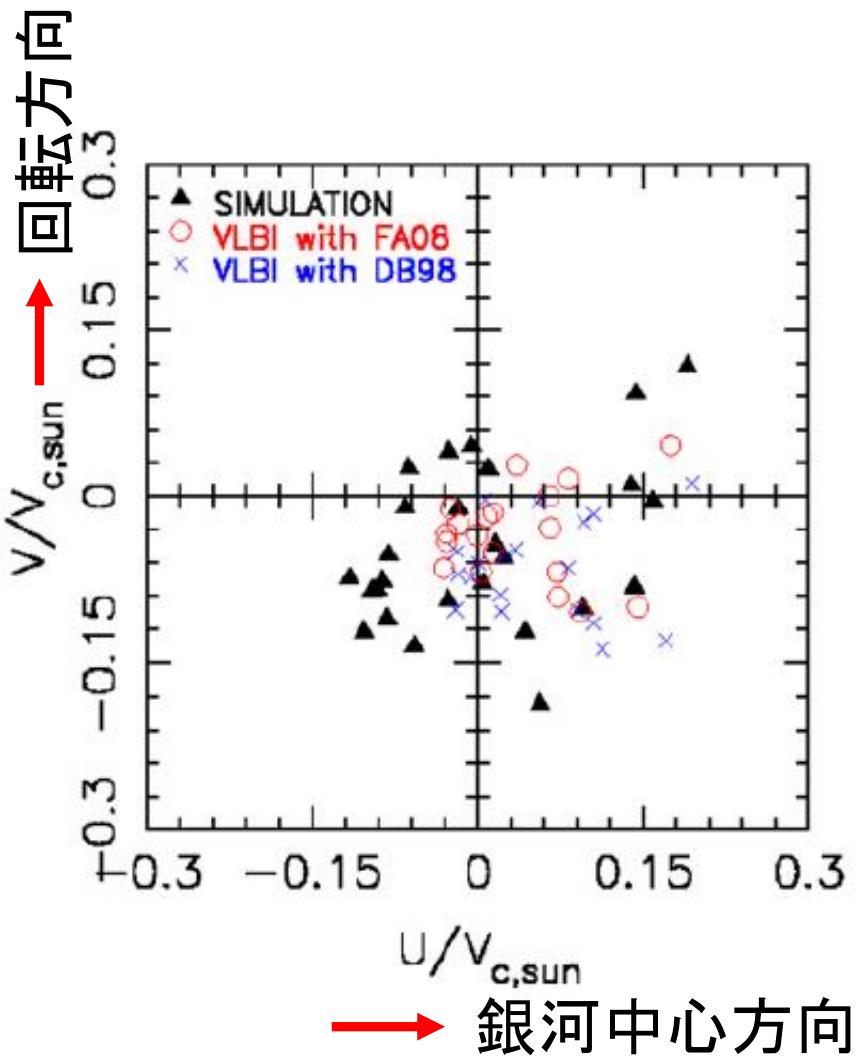
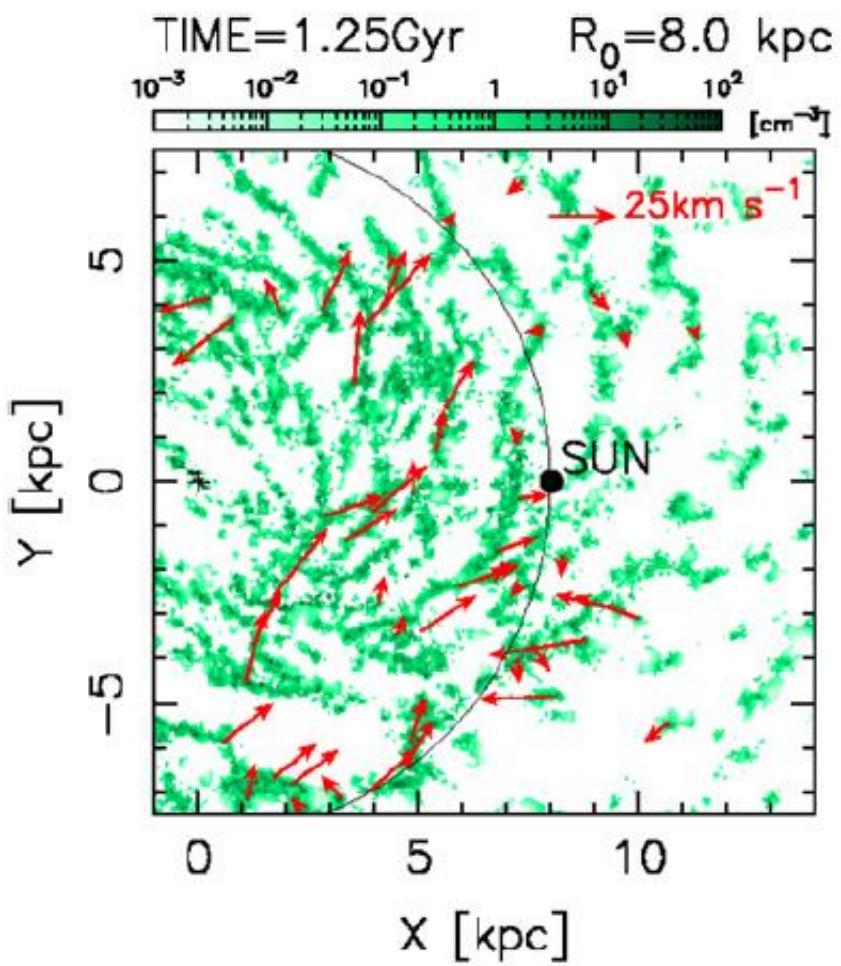


固有運動 + 視線速度 ⇒ 3次元の運動
⇒ 銀河系の渦状腕での運動

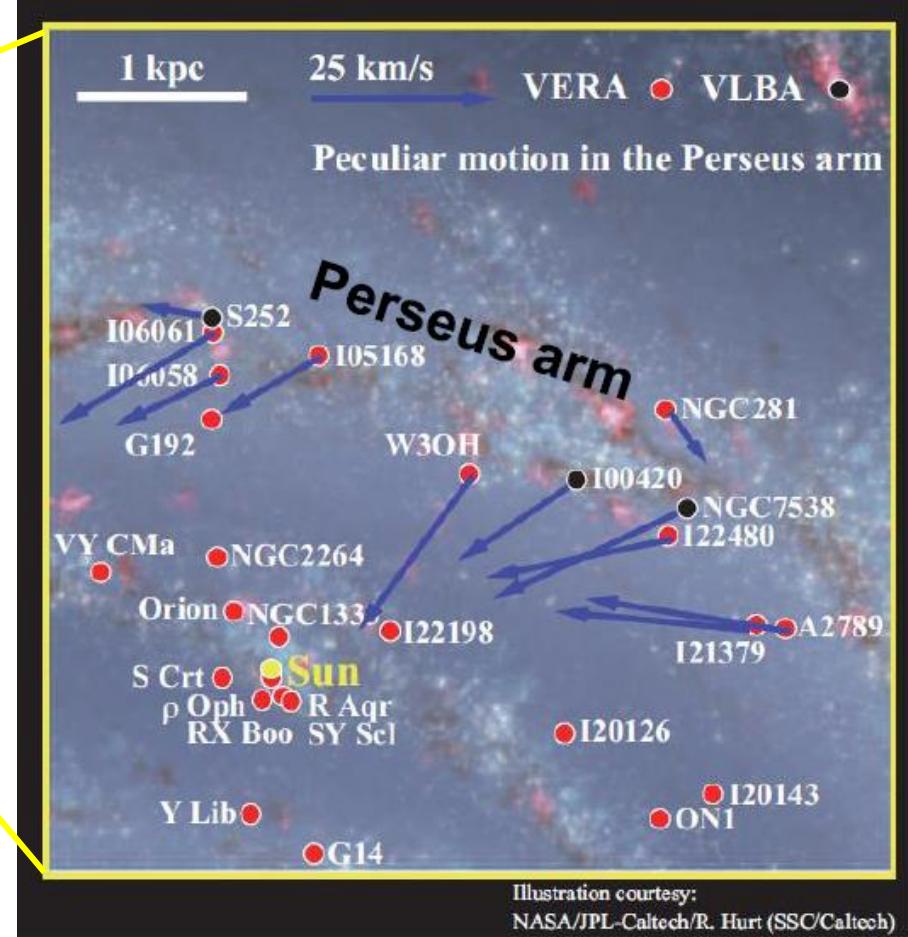
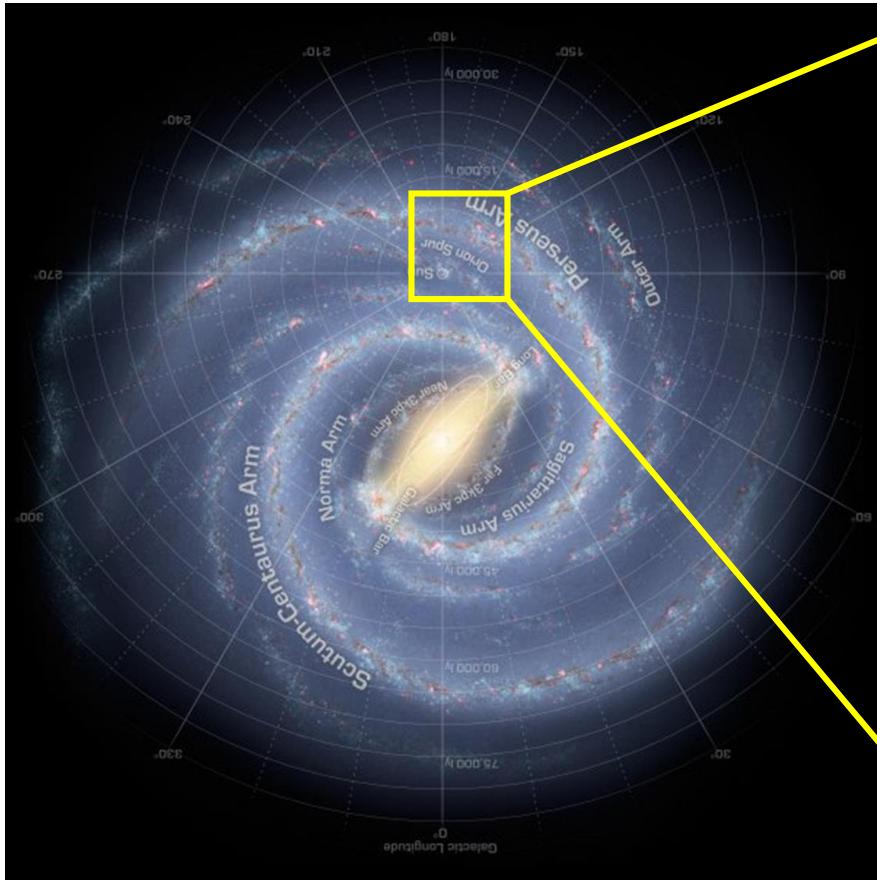
- 非常に大きなランダム運動(Reid et al. 2009) $\sim 30\text{km/s}$
 ⇒ 定常密度波理論では説明できない



Baba et al. 2009

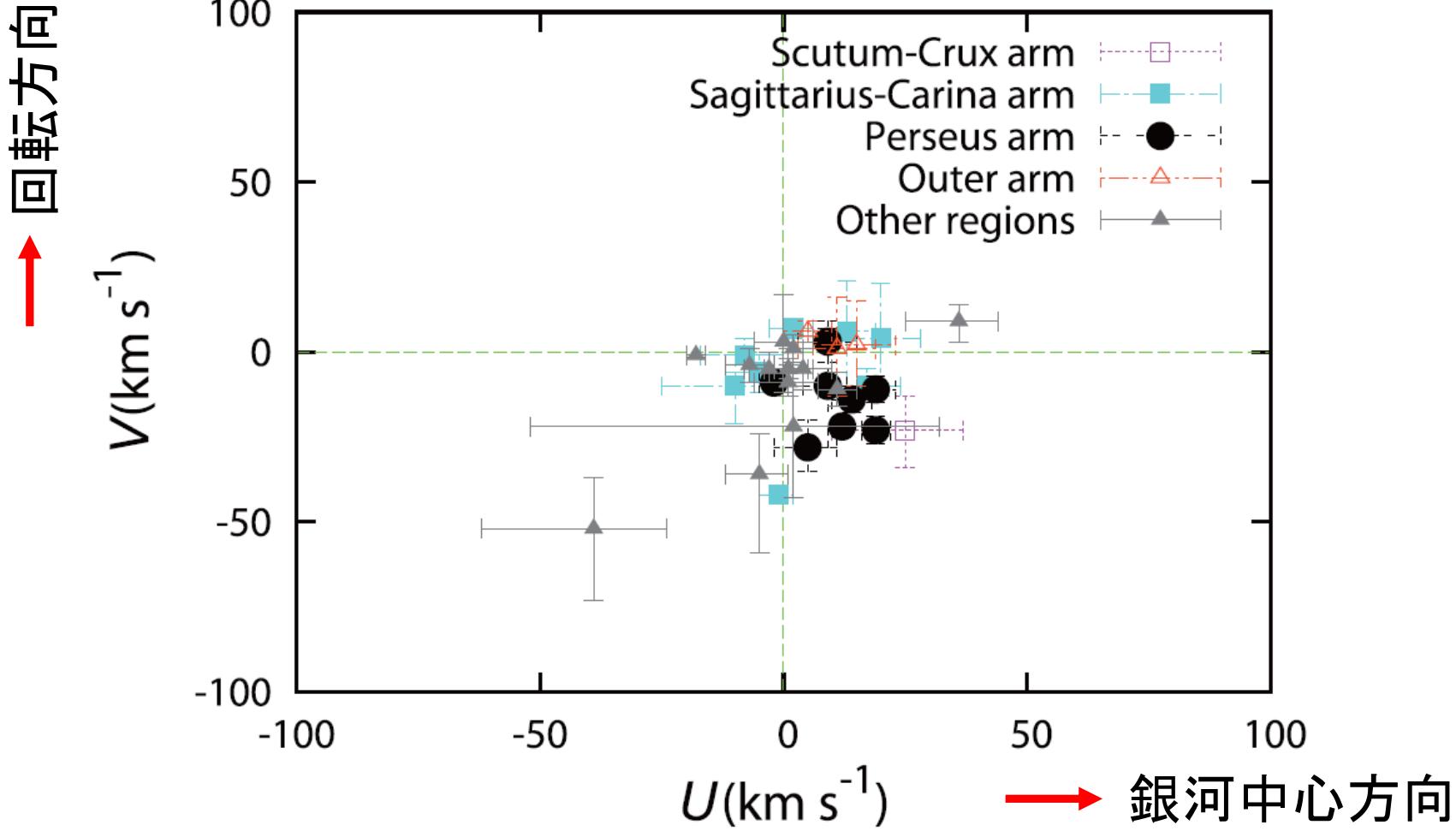


- 動的平衡渦状腕モデルで大きな非円運動を再現できる
(Baba et al. 2009)



- 漶状腕での系統的な非円運動
(Sakai et al. 2012; Choi et al. 2014)
中心方向+回転速度低下

(Sakai et al. 2012)



- 漩状腕での系統的な非円運動
中心方向 + 回転速度低下
⇒ 定常密度波理論で説明可能？

まとめ

- ・銀河の渦状構造の形成機構は、まだ明確になっていない
 - ・最もよく調べられているM51ですら、結論は出ていない
 - ・タイプによって形成機構が異なるであろう
- ・密度波と動的平衡渦状腕の識別は、ガスの分布と運動で、できるかもしれない
 - ・多くのサンプルで、高角分解能の分子ガス観測が必要
- ・運動学的密度波と定常密度波の識別には、パターン速度の測定が必要
 - ・パターン速度をどう測るか？