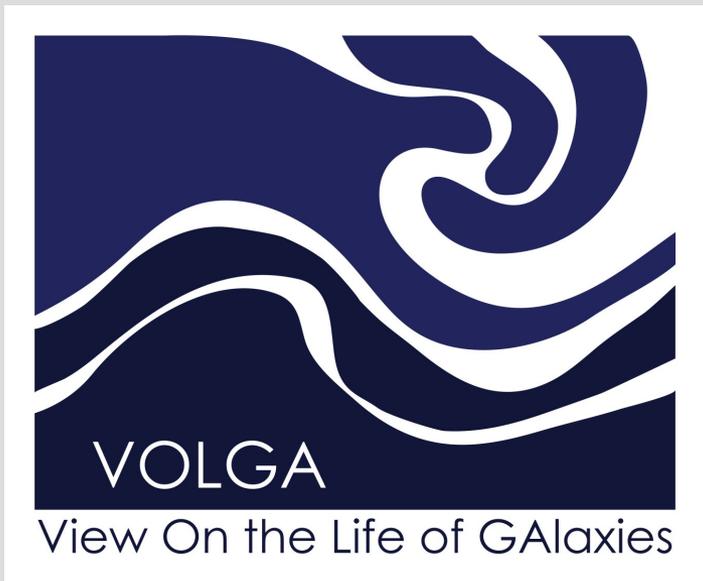


**Реферат статей Петти и др. (2014, 2015).  
Морфология Млечного Пути.  
Реконструкция L-V диаграмм**



**А. М. Мельник**

# The morphology of the Milky Way – I.

## Reconstructing CO maps from simulations in fixed potentials

**Alex R. Pettitt, Clare L. Dobbs, David M. Acreman and Daniel J. Price**

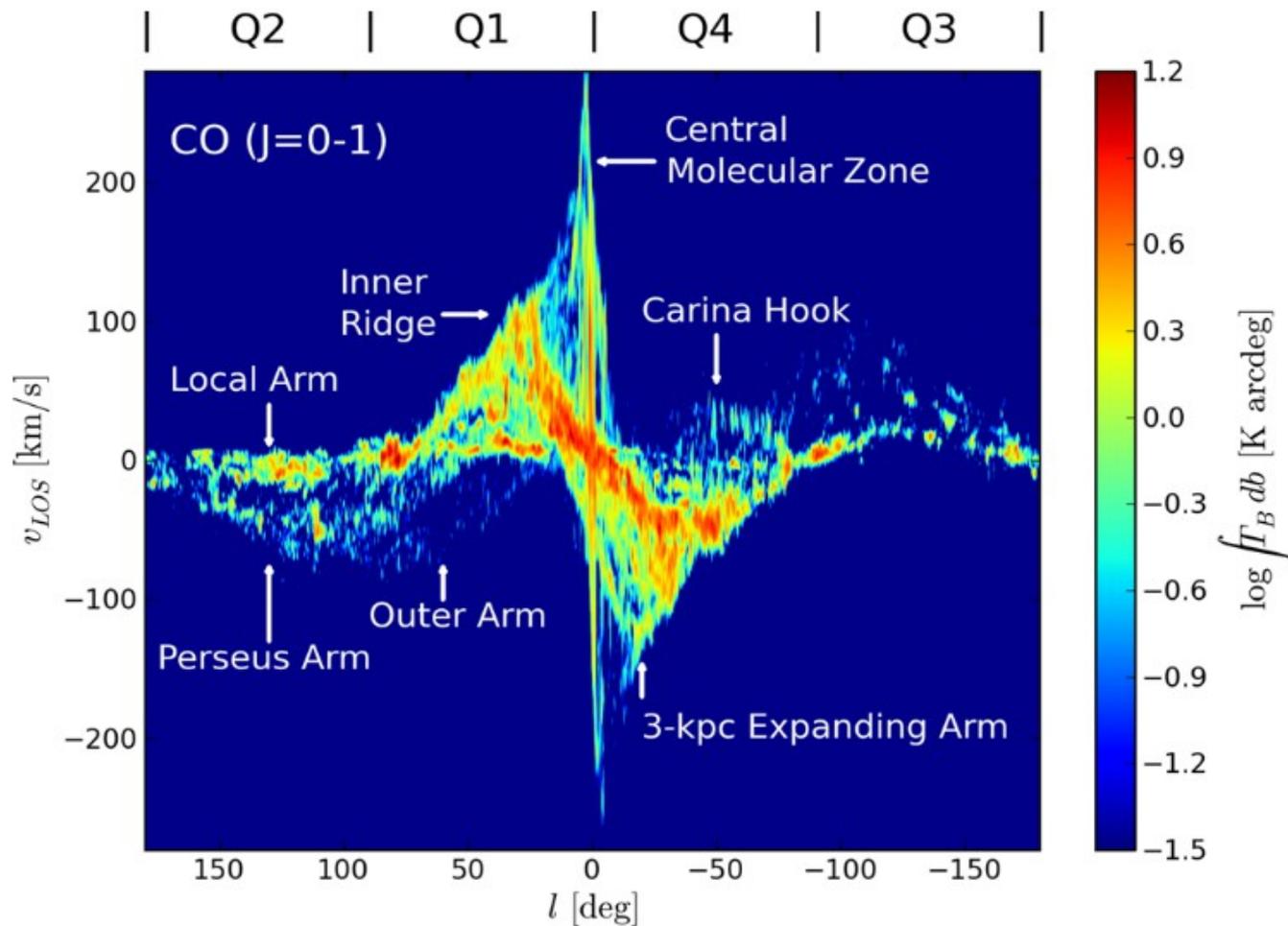
*1 School of Physics and Astronomy, University of Exeter, UK*

*2 Monash University, VIC 3800, Australia*

Авторы предполагают, что наша Галактика имеет спиральные рукава типа “grand design”. Используя “smoothed particle hydrodynamics (SPH)” код, они моделируют движение газа в диске включающем бар и/или спиральные рукава, заданные аналитически. Сравниваются наблюдательные и модельные L-V диаграммы полученные на основе 3D кода переноса излучения. Рассмотренные модели воспроизводят почти все особенности (L-V) диаграмм, но не все сразу. Модели  $m=2$  не воспроизводят всех особенностей, а  $m=4$  модели создают слишком яркие детали во внутренней области Галактики “too bright local emission in the inner Galaxy”. Наилучшее согласие наблюдается для скорости бара 50–60 км/с/кпк, скорости спирального узора 20 км/с/кпк, ориентации бара  $\theta_b=45^\circ$ , и закрутки спиральных рукавов  $i=10\text{--}15^\circ$ .

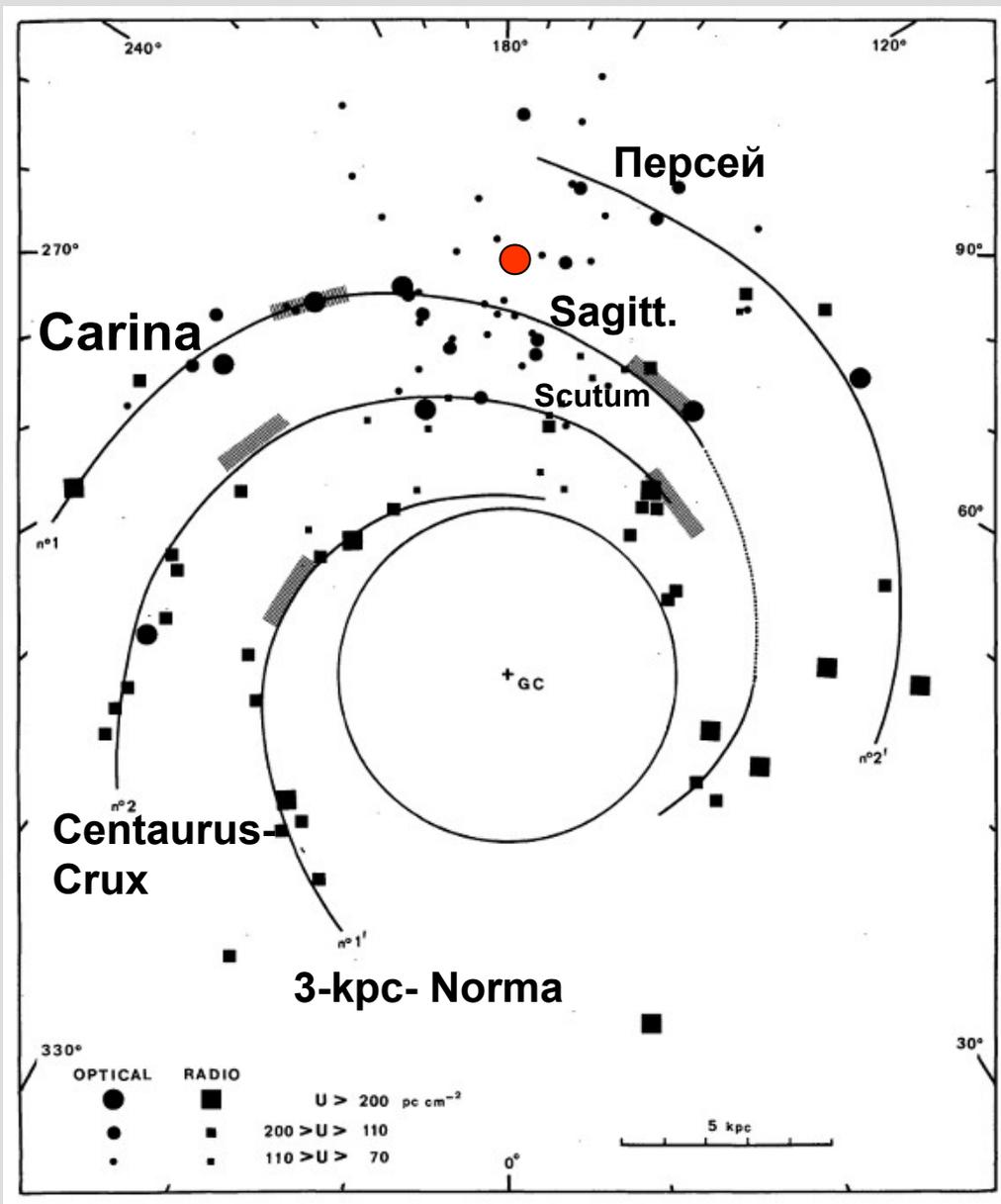
# Longitude–velocity map of brightness temperature of the CO

( $J = 0-1$ ) transition (Dame, Hartmann & Thaddeus 2001)



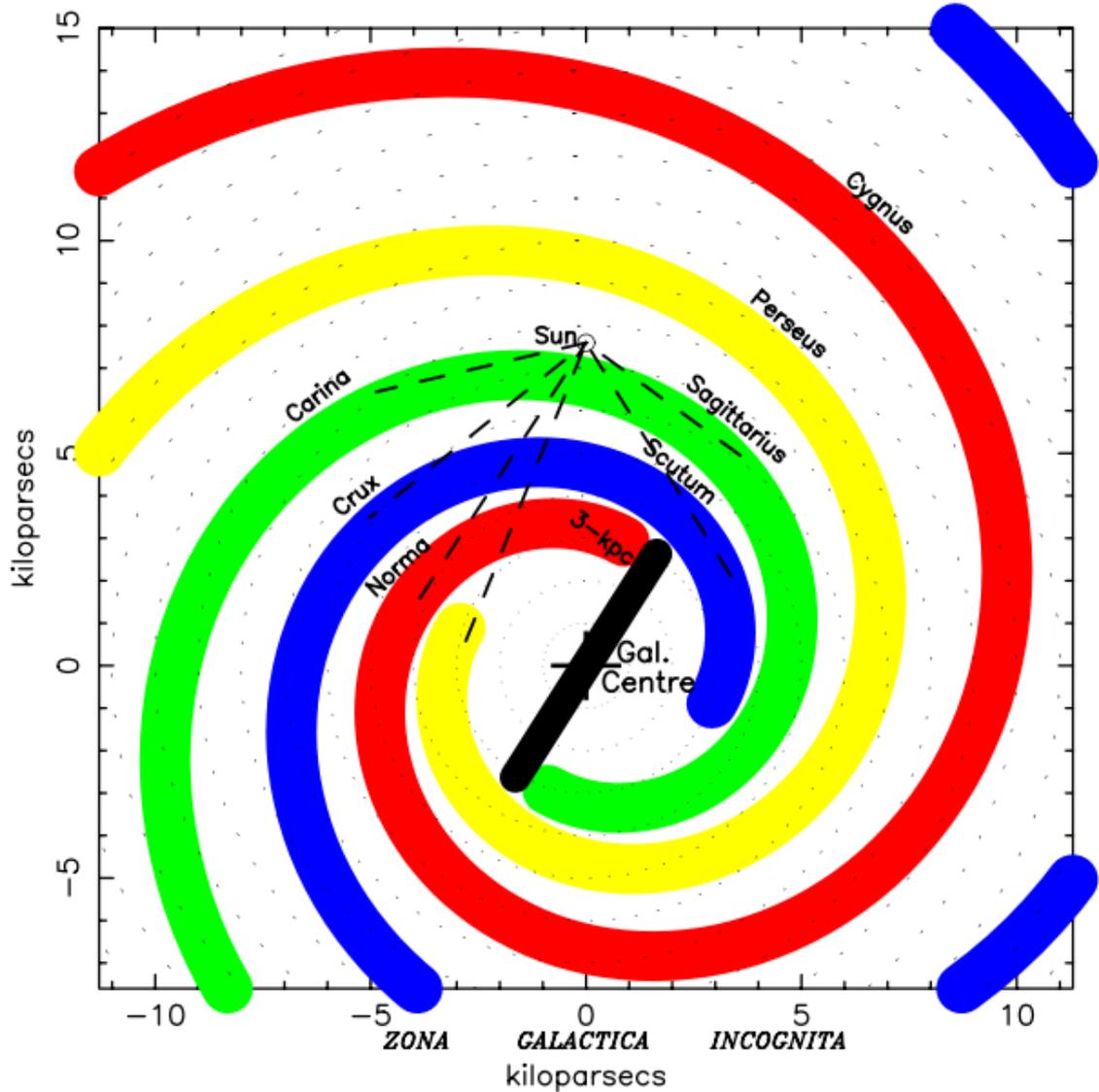
115 GHz

2.6 mm



Спиральная структура  
Галактики из работы  
Жоржелина и Жиржелина  
(1976)

Рукав Киль-Стрельца –  
основной



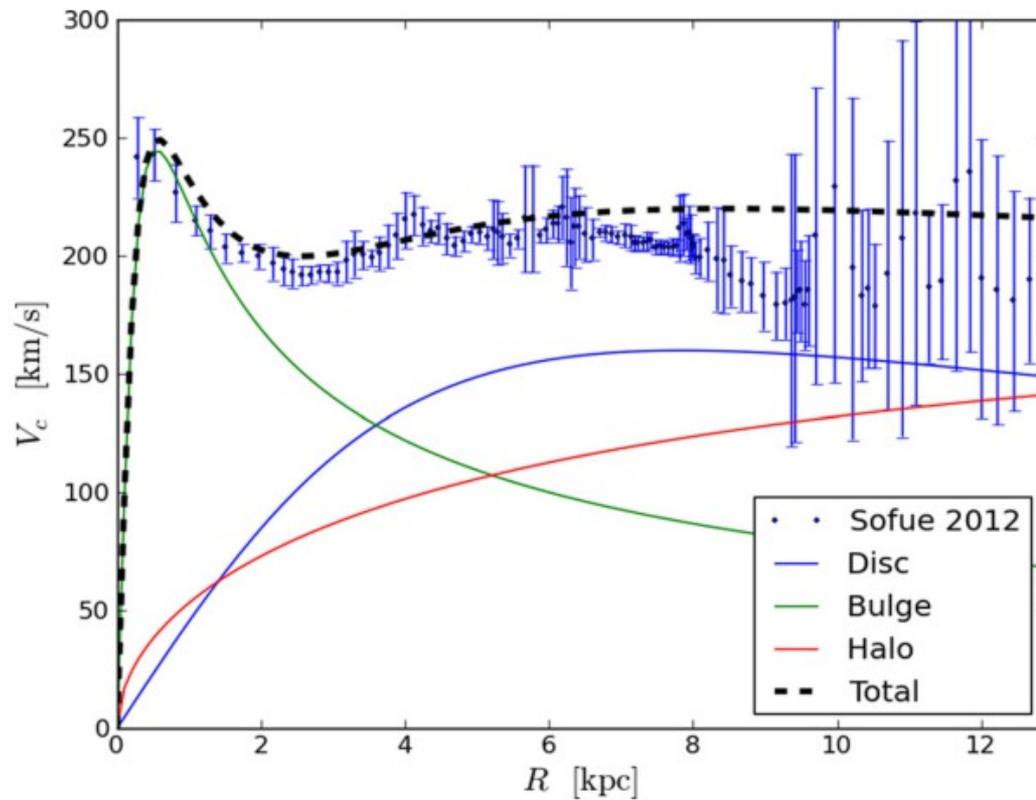
**Спиральный узор  
Галактики  
из работы  
Валли (2008)**

**По сравнению с  
Ж&Ж (1976)**

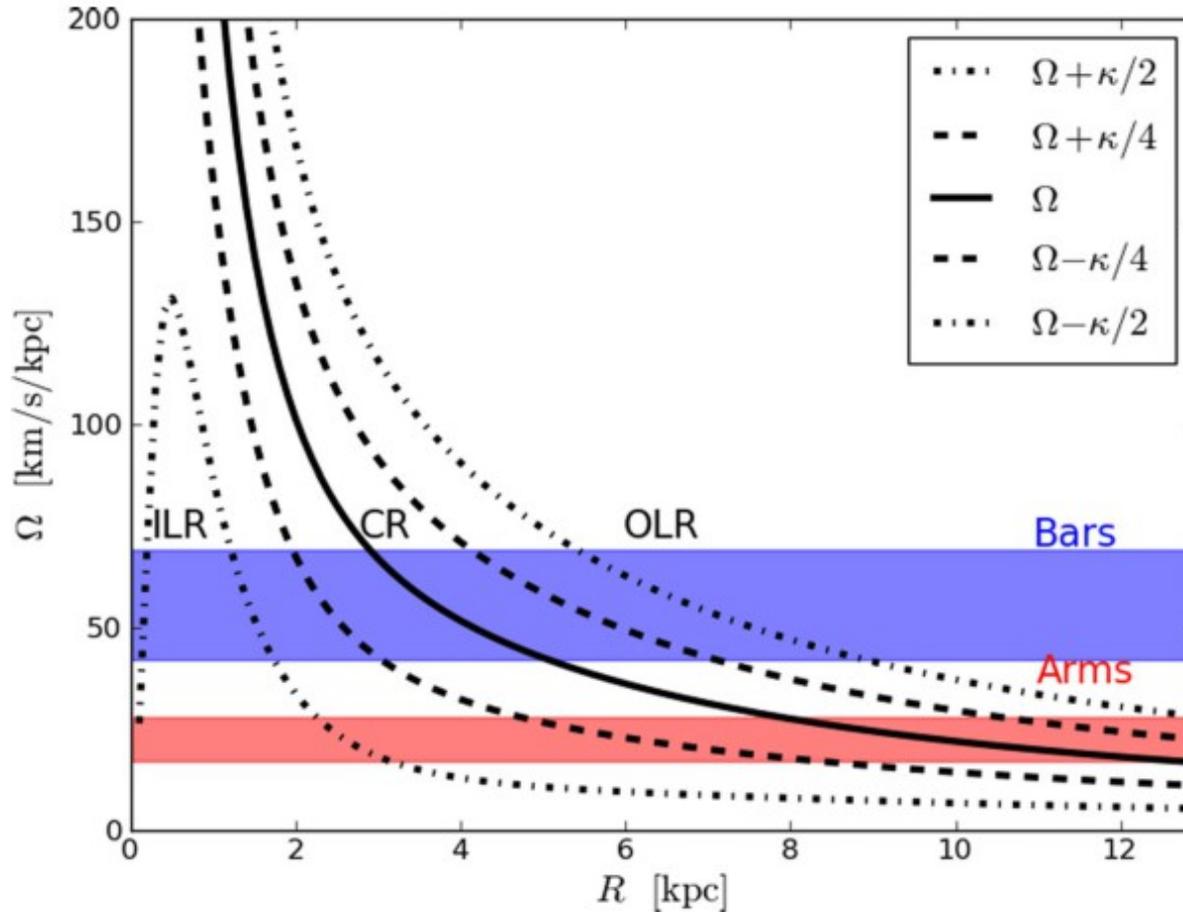
**Спиральный узор**

- 1. Более  
регулярный**
- 2. Рукава делают  
оборот более  
чем 360° вокруг  
центра**

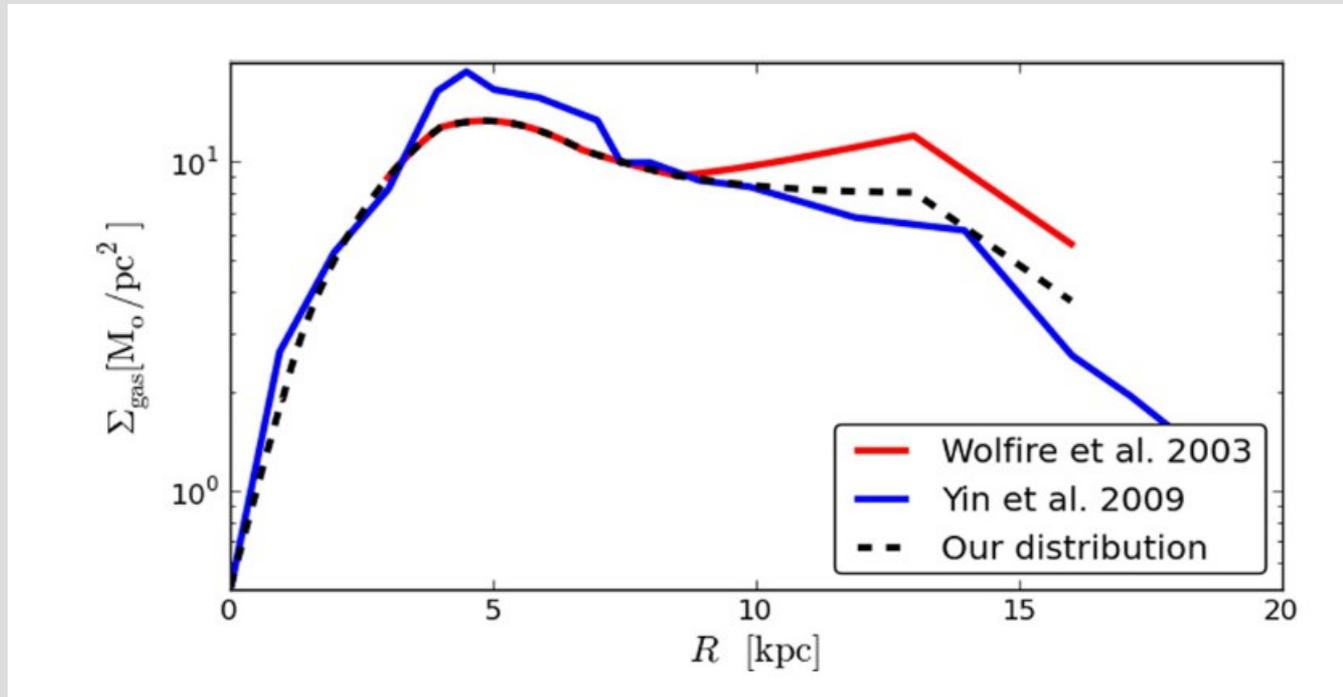
# Вклад диска, балджа и гало в модельную кривую вращения



# Кривые угловых скоростей модельного диска, угловые скорости бара и спиральных рукавов



# Начальное распределение газа в модельном диске



**Sanders, Scoville, Solomon 1985**

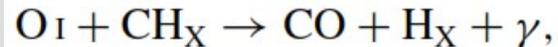
# Химия

Каждая SPH частица имеет массив, отражающий содержание различных элементов

5  $10^6$  SPH particles

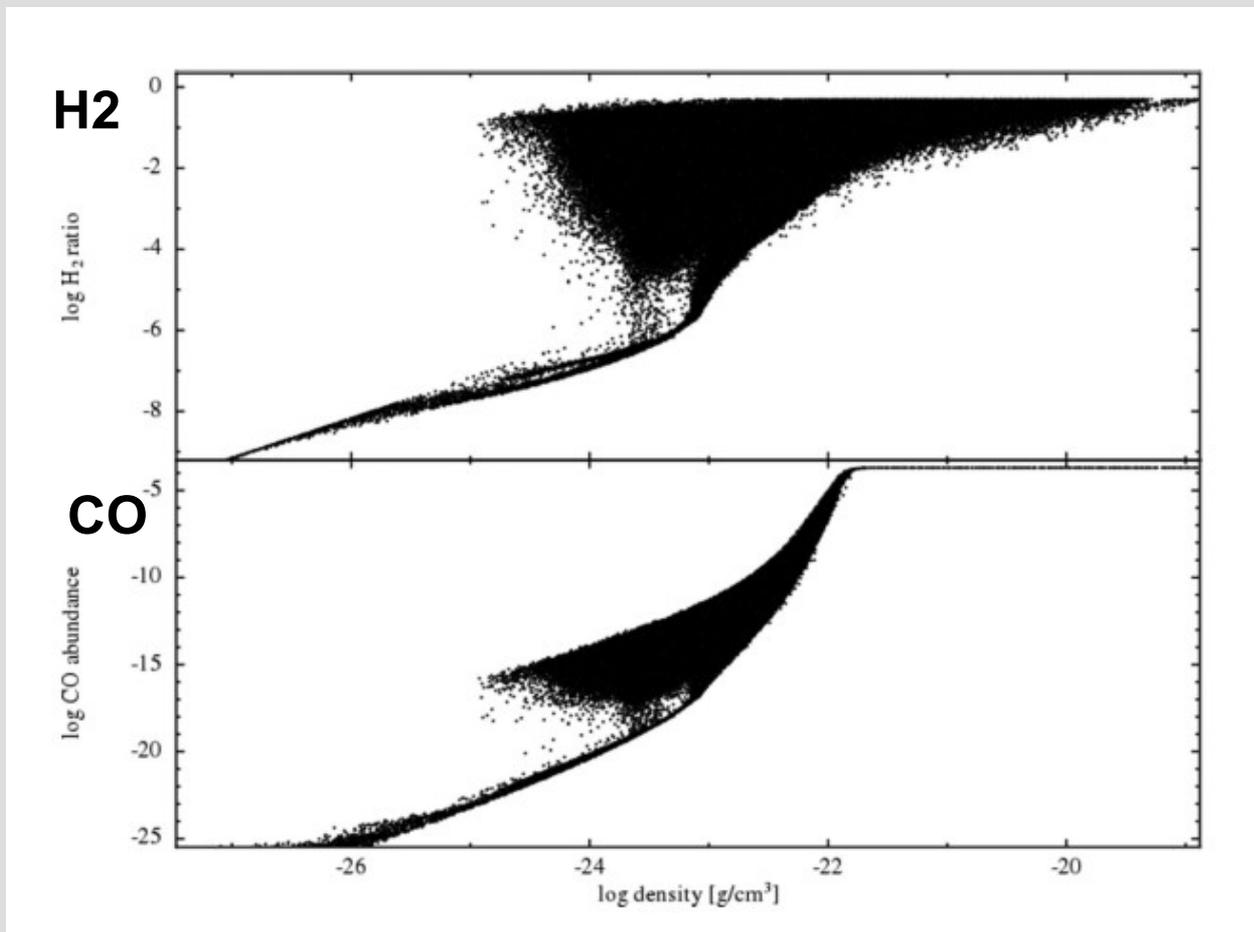
В начальный момент все частицы содержат 100% H I

H<sub>2</sub> формируется на поверхности пылинок и разрушается фотодиссоциацией, которая определяется поглощением и количеством H<sub>2</sub> (column density)



В моделях поддерживается начальное содержание C II и O I

# Доля H<sub>2</sub> и CO как функция плотности SPH частицы



Плотность SPH частицы

## Создание I-v диаграмм

Программа TORUS создает карту яркостных температур  $T_b$  из модельного распределения частиц по диску.

1. Создание L-B-V “data cubes”.
2. Обработка согласно массе на одну ячейку, имеется порог.
3. Рассматриваются различные лучи зрения, ведущие к наблюдателю и различные диапазоны скоростей.
4. Как только луч проходит через ячейку, его интенсивность на частоте  $\nu$  обновляется

$$I'_\nu = I_\nu e^{-d\tau} + \frac{\epsilon_\nu}{\kappa_\nu} (1 - e^{-d\tau}),$$

Через непрозрачность ( $\kappa$ ), испускательную способность ( $\epsilon$ ) и оптическую толщину ( $d\tau$ ) каждой ячейки.

5. Переход к  $T_B = I_\nu \lambda^2 / 2k_B$
6. Интегрирование по широте  $|B| < 2^\circ$ .

**Количественный критерий соответствия:**

$$\text{Fit} = \frac{\sum_{\text{pixels}} |T_{B,\text{synth db}} - T_{B,\text{Dame db}}|}{n_{\text{pixels}}}$$

$T_B$  – яркостная температура

$n_{\text{pixels}}$  – число пиксель с ненулевым излучением

Пиксель –  $0.125^\circ$  на 1 км/с ← такое разрешение у Дейма и др. (2001)

## Модели только с баром

### Бар Wada & Koda (2001)

$$\Phi_{r,w}(r, \phi) = \Phi_0 \cos(2[\phi + \Omega_b t]) \frac{(r/r_c)^2}{((r/r_c)^2 + 1)^2},$$

$r_c$  -- радиус ядра

WK  $\rightarrow r_c = 2$  крс  $\leftarrow$  более сильный бар

Wkr2  $\rightarrow r_c = 1.4$  крс

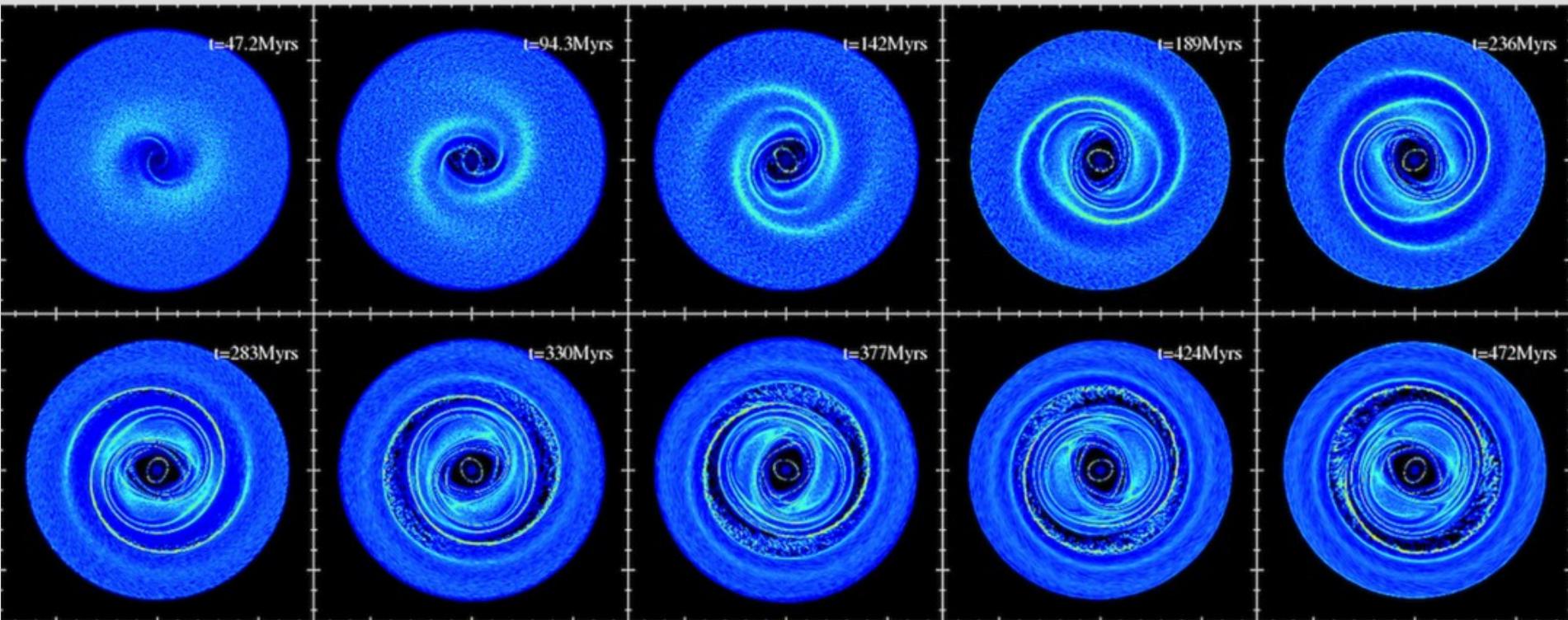
---

### Бар Long-Murali (1992)

$$\Phi_r(x, y, z) = \frac{GM_r}{2a} \ln \left( \frac{x - a + T_-}{x + a + T_+} \right)$$

$$T_{\pm} = [(a \pm x)^2 + y^2 + (b + \sqrt{c^2 + z^2})^2]^{1/2},$$

# Эволюция газового диска с баром WK и $\Omega_b=50$ км/с/кпк



**T=472 Myr**

Размер фрейма – 15x15 кпк

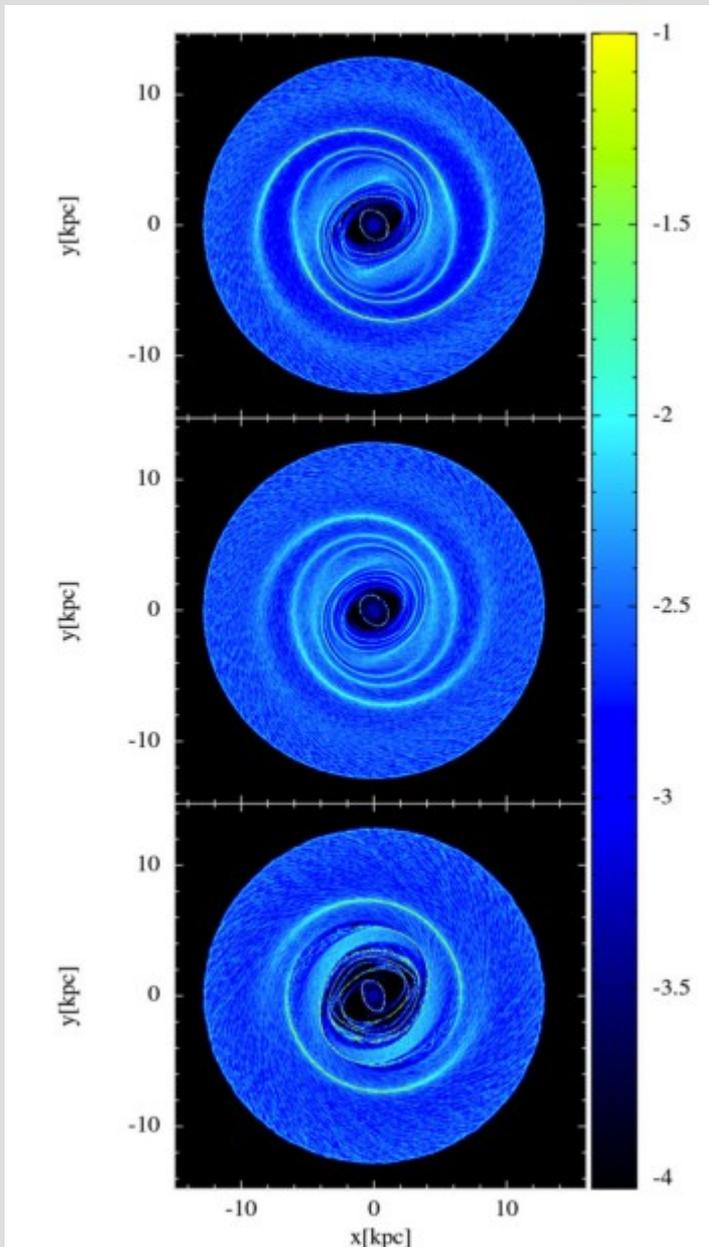
После  $\sim 4$  оборотов бара спиральные рукава формируют “elliptical/ring-like structure at the OLR”

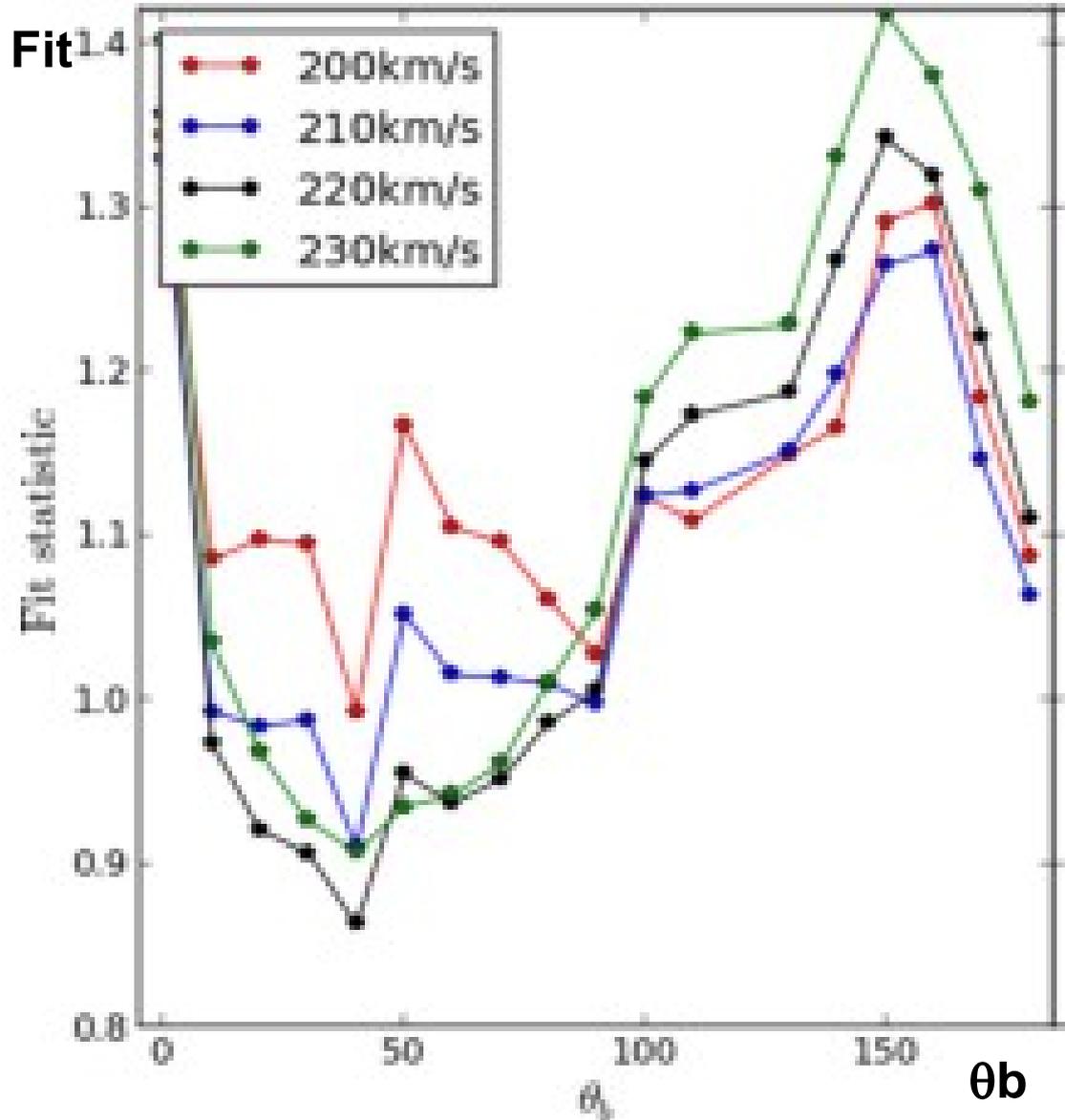
$T=236 \text{ Myr}$ ,  $\Omega_b=50 \text{ km/s/kpc}$ ,  $\theta_b=45^\circ$

← WK

← WKr2

← LM





**Fit статистика**

**для моделей  
с баром WK**

**T=470 Myr**

**для различных  
значений  $\theta_b$ .**

**Минимум  
наблюдается  
при  $\theta_b = 45^\circ$**

## Спиральные рукава

Спиральные рукава имеют форму трех-компонентного синусоидального возмущения, которое экспоненциально падает с увеличением радиуса

Спиральные рукава – логарифмические, с постоянным углом закрутки

$$\Phi_{sp}(r, \phi, z) = 4\pi G h_z \rho_o \exp\left(-\frac{r-r_o}{R_s}\right) \sum_n^3 \left\{ \frac{C_n}{K_n D_n} \times \left[ \operatorname{sech}\left(\frac{K_n z}{\beta_n}\right) \right]^{\beta_n} \cos\left(N \left[ \phi - t\Omega_{sp} - \frac{\ln(r/r_o)}{\tan(\alpha)} \right] \right) \right\},$$

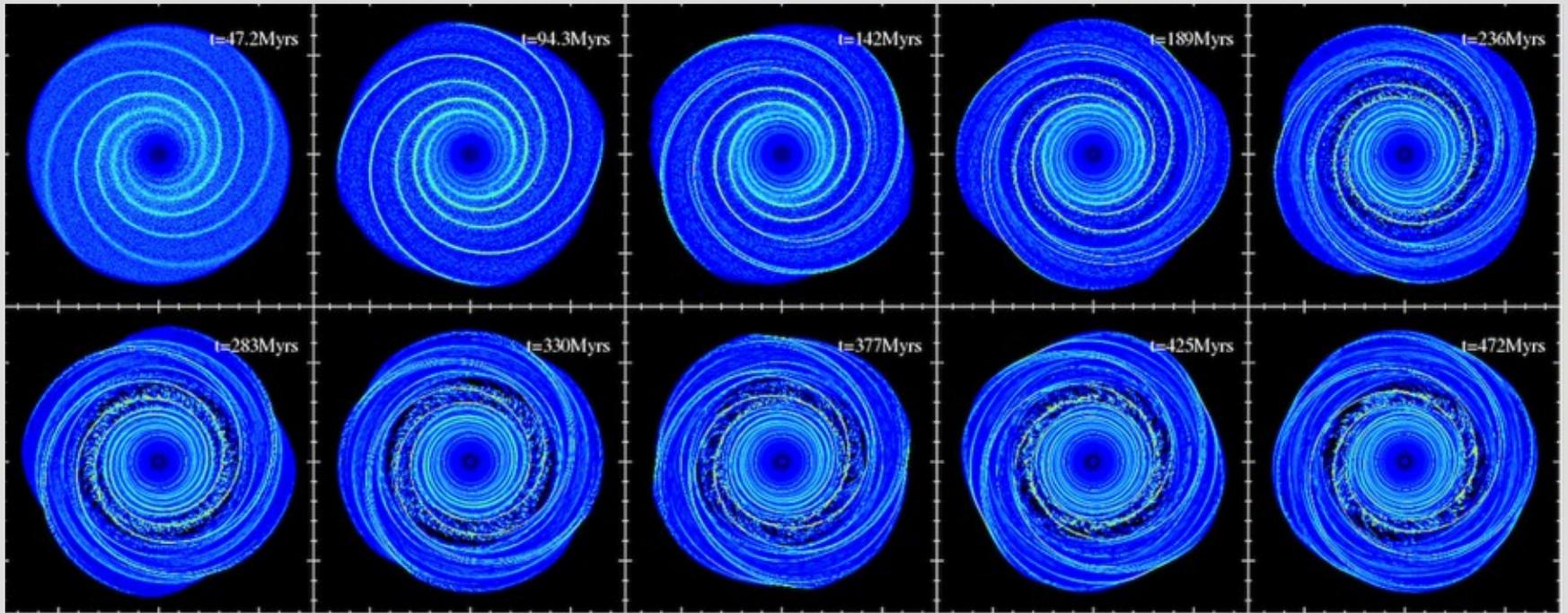
$$K_n = nN/r \sin(\alpha).$$

$$\beta_n = K_n h_z (1 + 0.4 K_n h_z),$$

$$D_n = \frac{1 + K_n h_z + 0.3(K_n h_z)^2}{1 + 0.3 K_n h_z},$$

**Cox & Gomez  
(2002)**

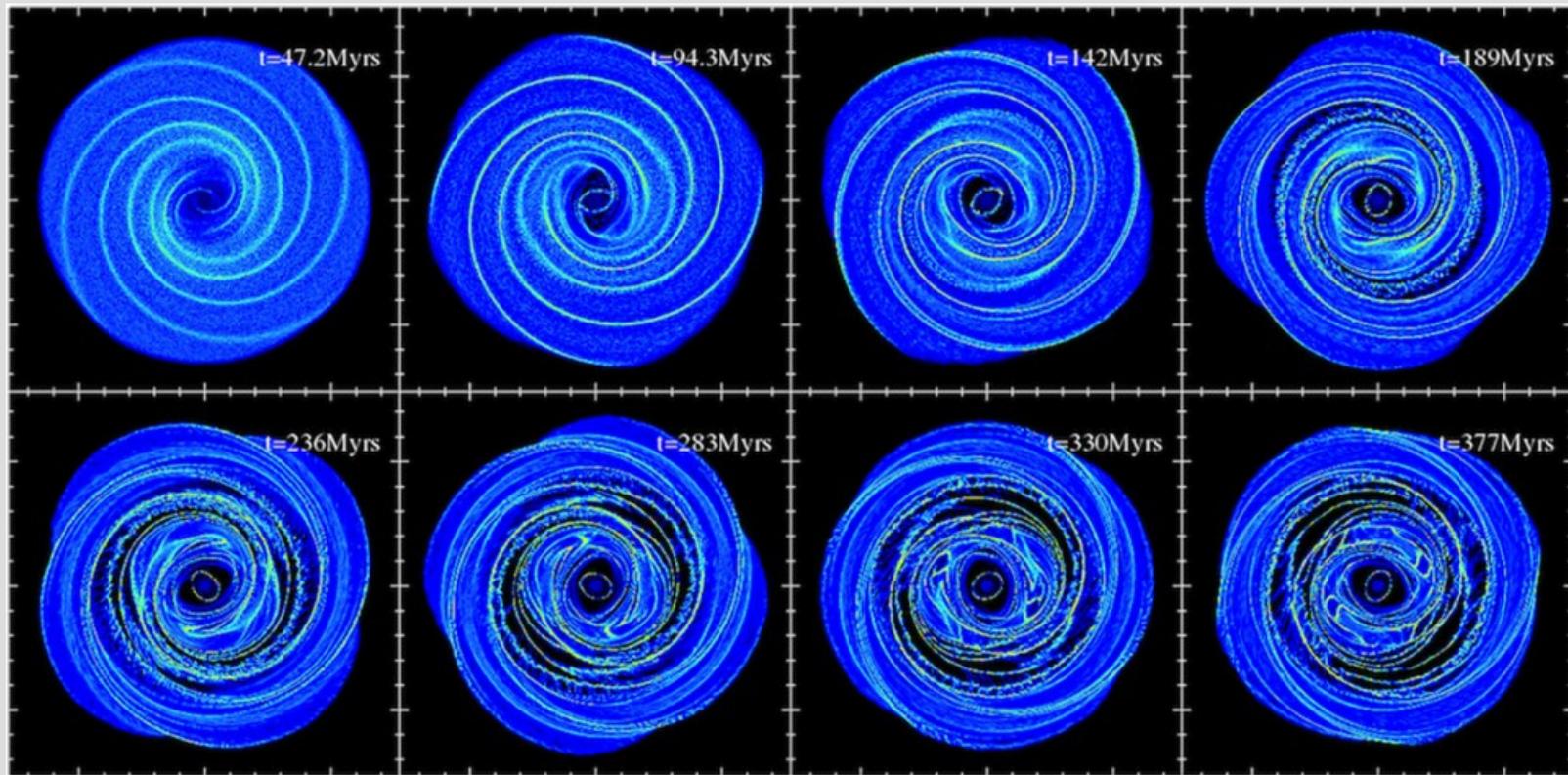
Эволюция  $m=4$  спирального узора  $\Omega_s = 20$  км/с/кпк,  $i=15^\circ$



**T=472 Myr**

**ILR (R=7 kpc)**

Эволюция модели с баром WK и спиральными рукавами  $m=4$ ,  $\alpha=12.5^\circ$ ,  $\Omega_s=20$  и  $\Omega_b=50$  км/с/кпк

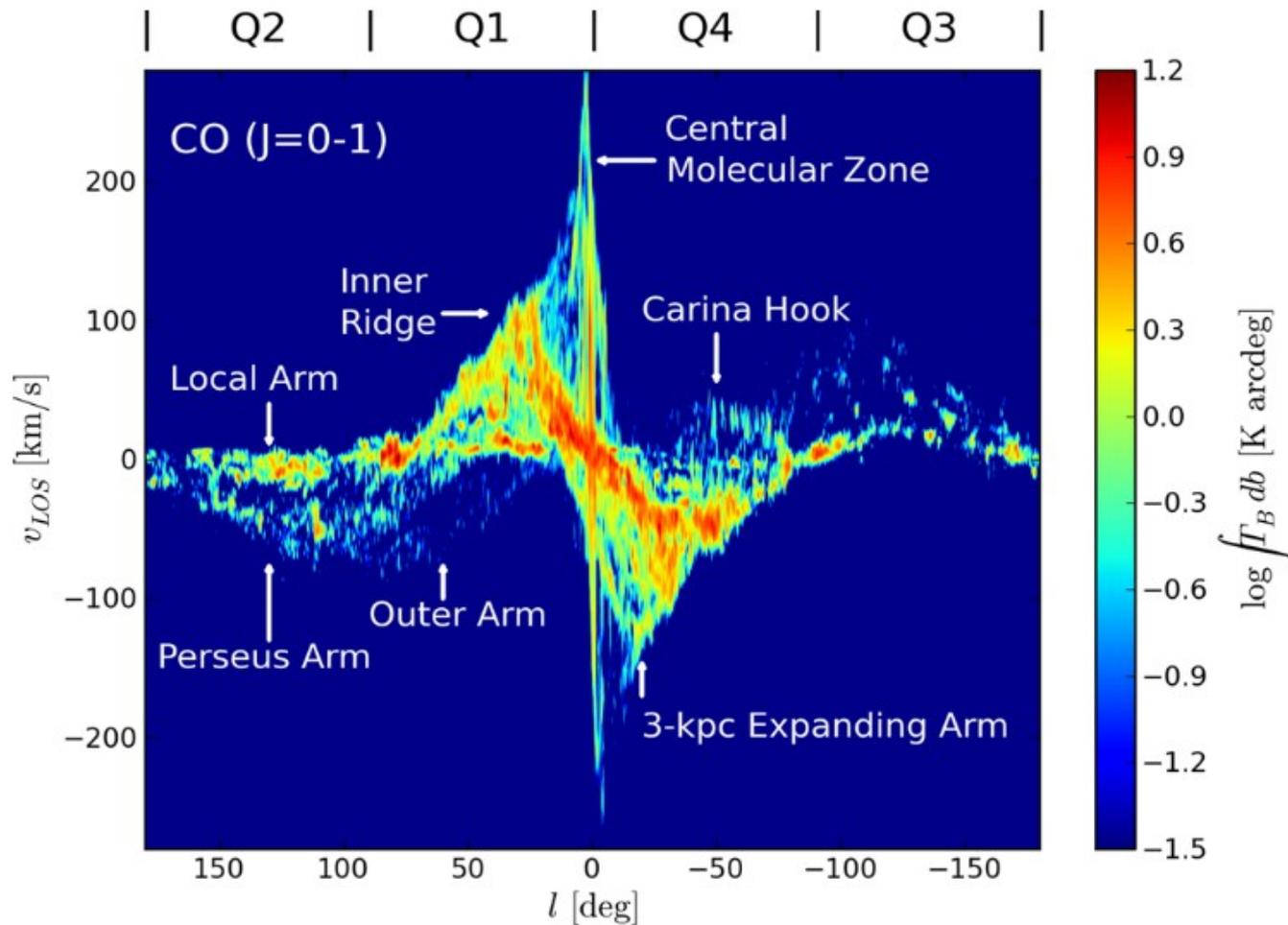


| Bar model                                              |         |         |     |
|--------------------------------------------------------|---------|---------|-----|
| Best-fitting parameter                                 | WK      | WKR2    | LM  |
| $\Omega_b$ [ km s <sup>-1</sup> kpc <sup>-1</sup> ]    | 50      | 60      | 70  |
| $V_{obs}$ [ km s <sup>-1</sup> ]                       | 215     | 220     | 235 |
| $R_{obs}$ [kpc]                                        | 8.5     | 8.5     | 7.0 |
| $\theta_b$ [°]                                         | 56      | 51      | 41  |
| Arm model                                              |         |         |     |
| Best-fitting parameter                                 | CGN2    | CGN4    |     |
| $\Omega_{sp}$ [ km s <sup>-1</sup> kpc <sup>-1</sup> ] | 20      | 20      |     |
| $V_{obs}$ [ km s <sup>-1</sup> ]                       | 210     | 205     |     |
| $R_{obs}$ [kpc]                                        | 8.0     | 8.5     |     |
| $\alpha$ [°]                                           | 12.5    | 10.0    |     |
| Mix model                                              |         |         |     |
| Best-fitting parameter                                 | CGN2+WK | CGN4+WK |     |
| $\Omega_b$ [ km s <sup>-1</sup> kpc <sup>-1</sup> ]    | 50      | 60      |     |
| $V_{obs}$ [ km s <sup>-1</sup> ]                       | 220     | 215     |     |
| $R_{obs}$ [kpc]                                        | 8.5     | 8.5     |     |
| $\alpha$ [°]                                           | 15      | 10      |     |

**Параметры  
моделей,  
обеспечивающих  
наилучшее  
согласие с  
наблюдаемыми  
L-V диаграммами**

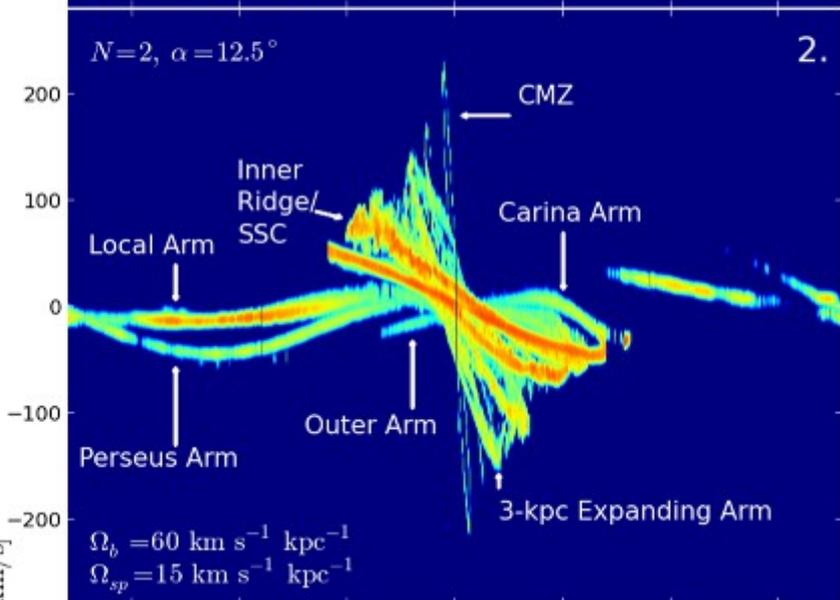
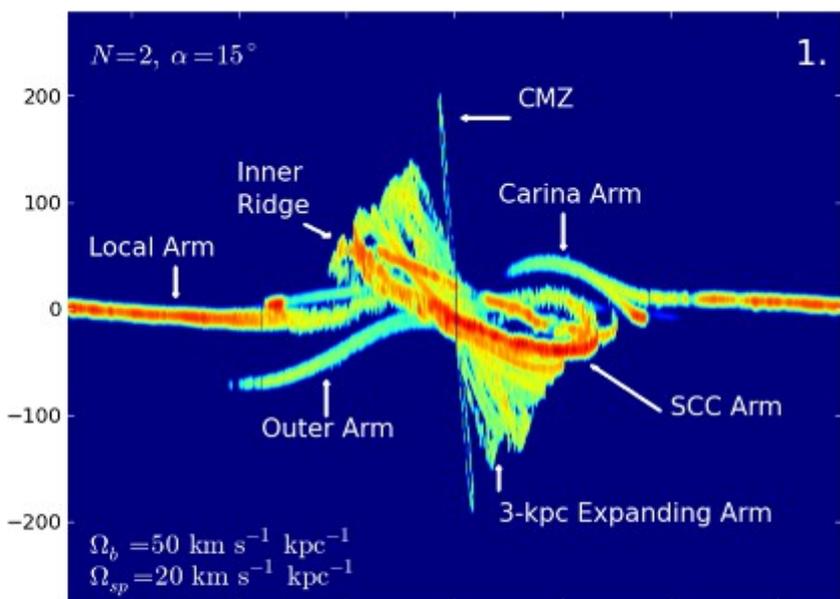
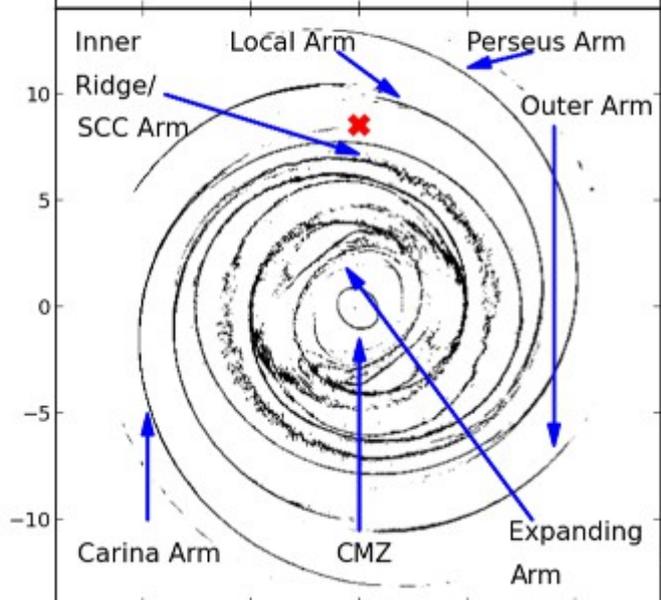
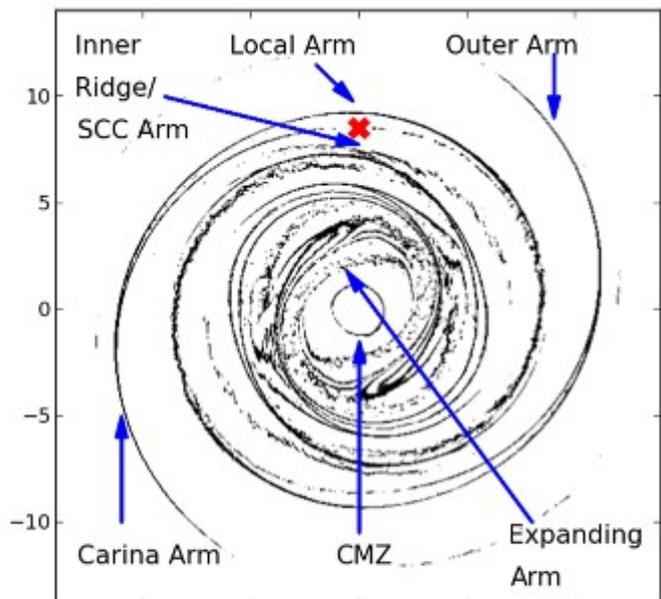
# Longitude–velocity map of brightness temperature of the CO

( $J = 0-1$ ) transition (Dame, Hartmann & Thaddeus 2001)



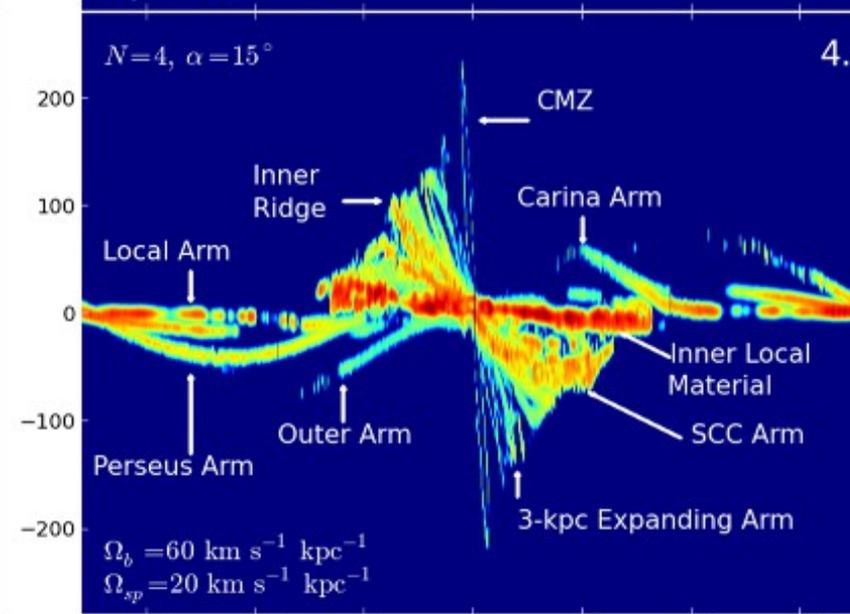
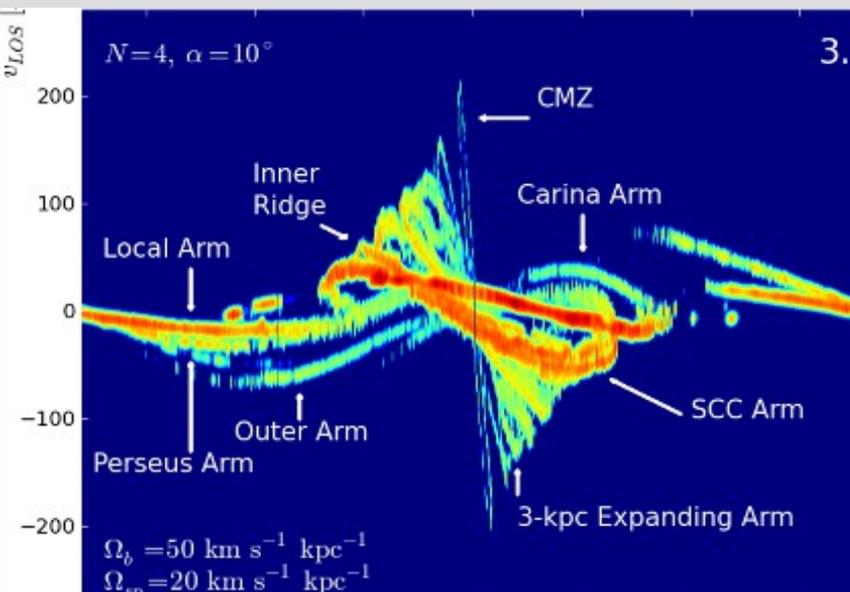
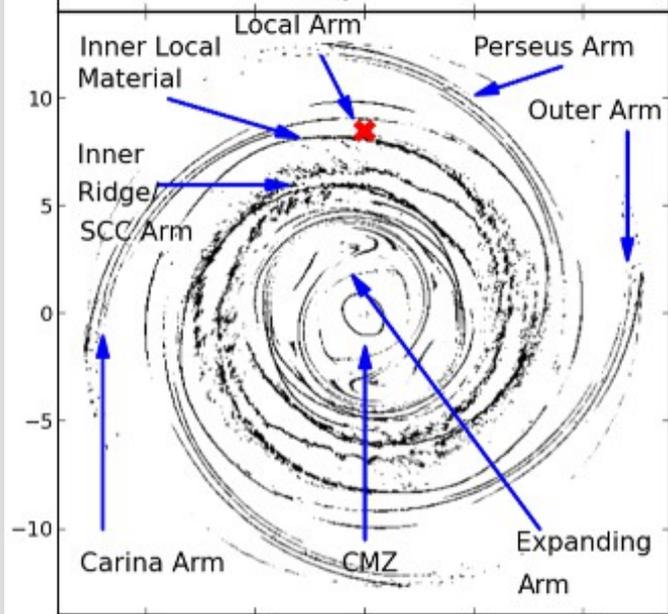
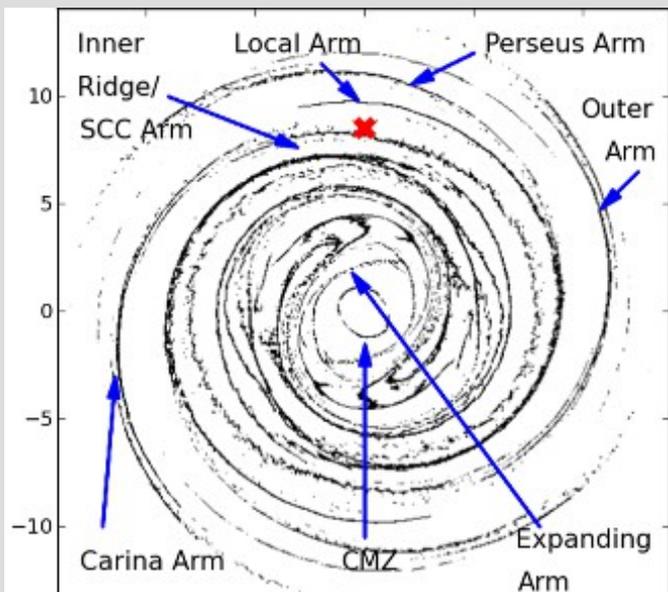
# Наилучшие модели. Распределение газа

$m=2$



# Наилучшие модели. Распределение газа

$m=4$



## **Выводы:**

- 1. Модели только с баром не воспроизводят структуру во внешней области Галактики, модели только со спиральными рукавами не воспроизводят структуру внутренней области Галактики.**
- 2. Наилучшие параметры: скорость бара 50–60 км/с/кпк, скорость спирального узора 20 км/с/кпк, ориентация бара  $\theta_b=45^\circ$ , закрутка спиральных рукавов  $i=10\text{--}15^\circ$ .**
- 3. Модели с  $m=2$  не воспроизводят всех особенностей, модели с  $m=4$  создают очень большое излучение вблизи Солнца**
- 4. Рассмотренные модели не воспроизводят сильную эмиссию центральной молекулярной зоны (CMZ).**

## The morphology of the Milky Way – II.

### Reconstructing CO maps from disk galaxies with live stellar distribution

Alex R. Pettitt, Clare L. Dobbs, David M. Acreman and Matthew R. Bate

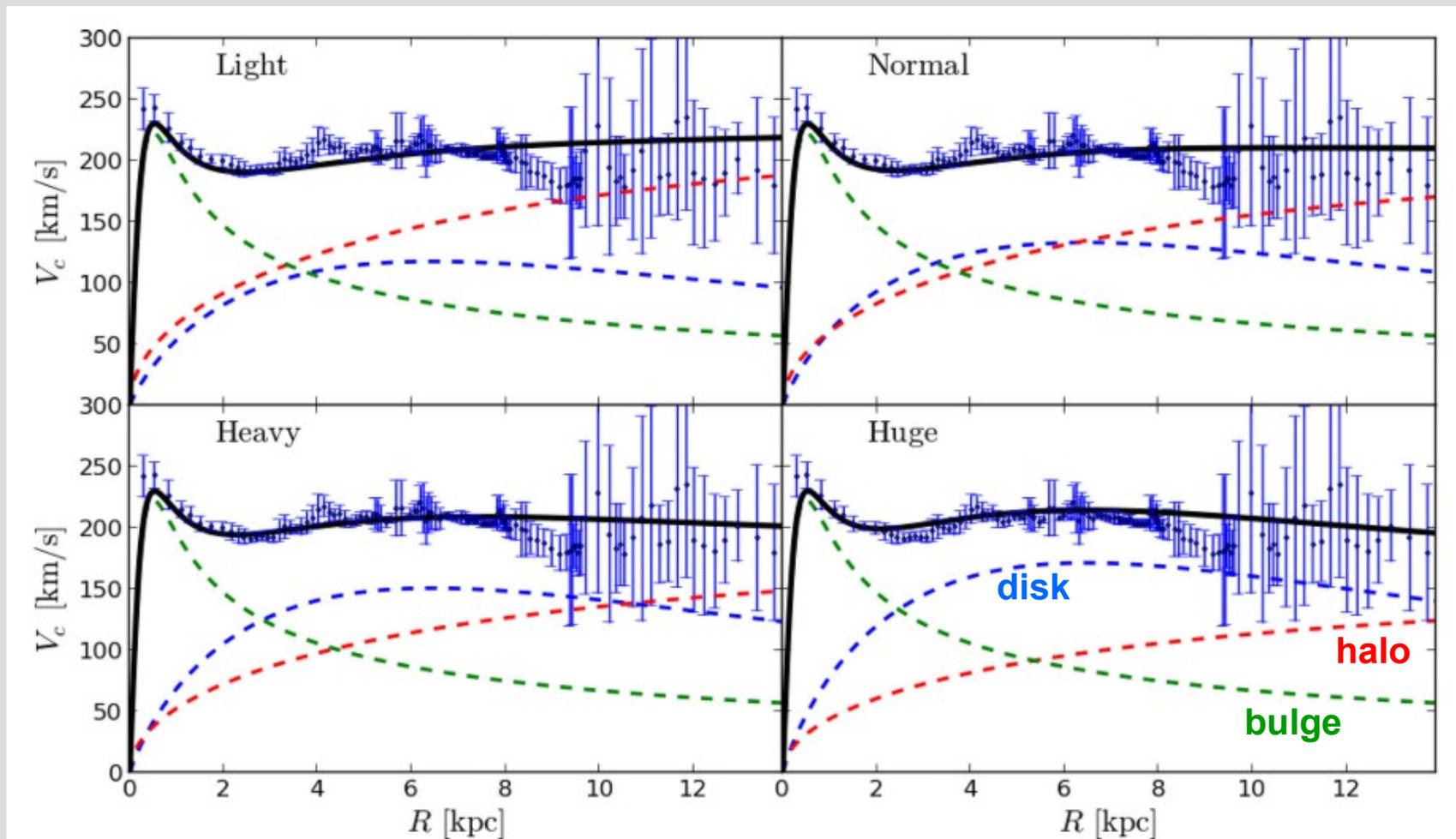
Авторы строят N-body модели Галактики. N-body частицы представляют диск и балдж. Спиральный узор имеет нестационарную (transient) природу. Модельные L-V диаграммы лучше согласуются с наблюдаемыми диаграммами (Дейм и др. 2001), чем в случае аналитически заданных потенциалов. Наилучшее согласие дают модели с  $m=4$  (в среднем) и с углом закрутки  $i=20^\circ$  (приблизительно). Угловая скорость вращения коротко-живущих (transient) спиральных рукавов падает с увеличением Галактоцентрического расстояния R.

# Параметры моделей

звездный

| Calculation | $M_d(10^{10} M_\odot)$ |                    | $M_h(10^{10} M_\odot)$ | $M_b(10^{10} M_\odot)$ |
|-------------|------------------------|--------------------|------------------------|------------------------|
| Ba          | 5.3                    | <b>Huge disk</b>   | 44                     | 1.05                   |
| Bb          | 4.1                    | <b>Heavy disk</b>  | 63                     | 1.05                   |
| Bc          | 3.2                    | <b>Normal disk</b> | 83                     | 1.05                   |
| Bd          | 2.5                    | <b>Light disk</b>  | 101                    | 1.05                   |
| Db          | 4.1                    |                    | 63                     | – <b>No bulge</b>      |
| Dc          | 3.2                    |                    | 83                     | – <b>No bulge</b>      |
| Hb          | 4.1                    |                    | 63                     | <b>Live halo</b> 1.05  |

# Вклад диска, балджа и гало в кривую вращения



# Параметры моделей

**Гало**  
(Navarro, Frenk & White 1996)

$$\rho_h(r) = \frac{\rho_{h,0}}{r/r_h(1+r/r_h)^2}$$

$$\rho_{h,0} = \frac{M_h}{4\pi r_{200}^3} \frac{C_{\text{NFW}}^3}{\ln(1+C_{\text{NFW}}) + C_{\text{NFW}}/(1+C_{\text{NFW}})}$$

$C_{\text{NFW}}=5$  кpc       $r_{200}=122$  кpc

**Балдж**  
Пламмер сфера:

$$\rho_b(r) = \frac{3M_b}{4\pi} \frac{r_b^2}{(r_b^2 + r^2)^{5/2}},$$

$r_b=0.35$  кpc,  $0.1 \cdot 10^6$  star particles

**Газовая подсистема:**  
 $M_g=8 \cdot 10^9 M_\odot$   
 $3 \cdot 10^6$  SPH particles

**Диск:**

$$\rho_d(r, z) = \frac{M_d}{4\pi R_d^2 z_d} \exp(-r/r_d) \text{sech}^2(z/z_d),$$

$r_d=3.0$  кpc,  $z_d=0.3$  кpc,  $1 \cdot 10^6$  star particles

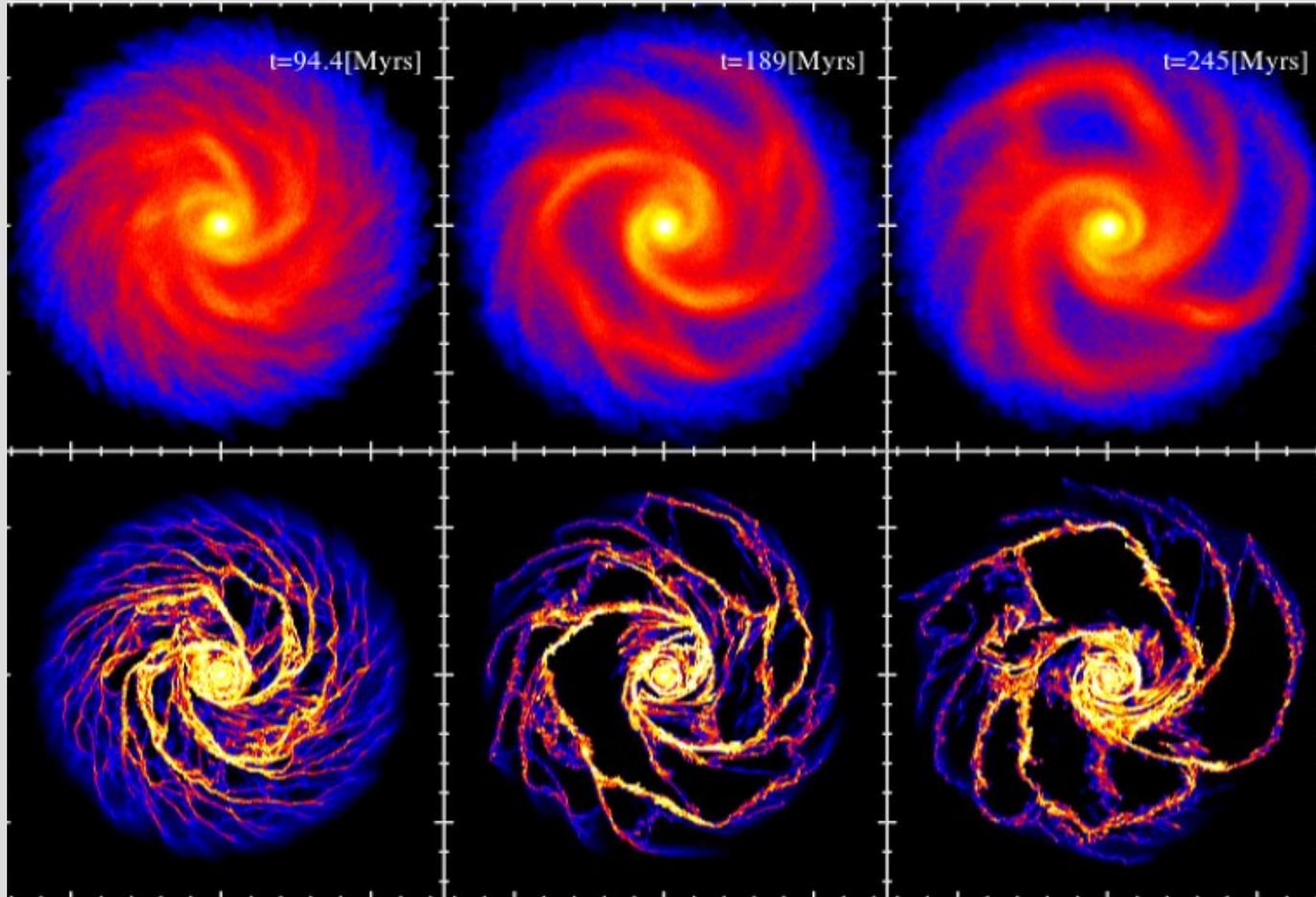
← Начальное  $Q$   
 $=1$

# Model Ba: Huge disk

T=94 Myr

T=189 Myr

T=245 Myr



← STARS

← GAS

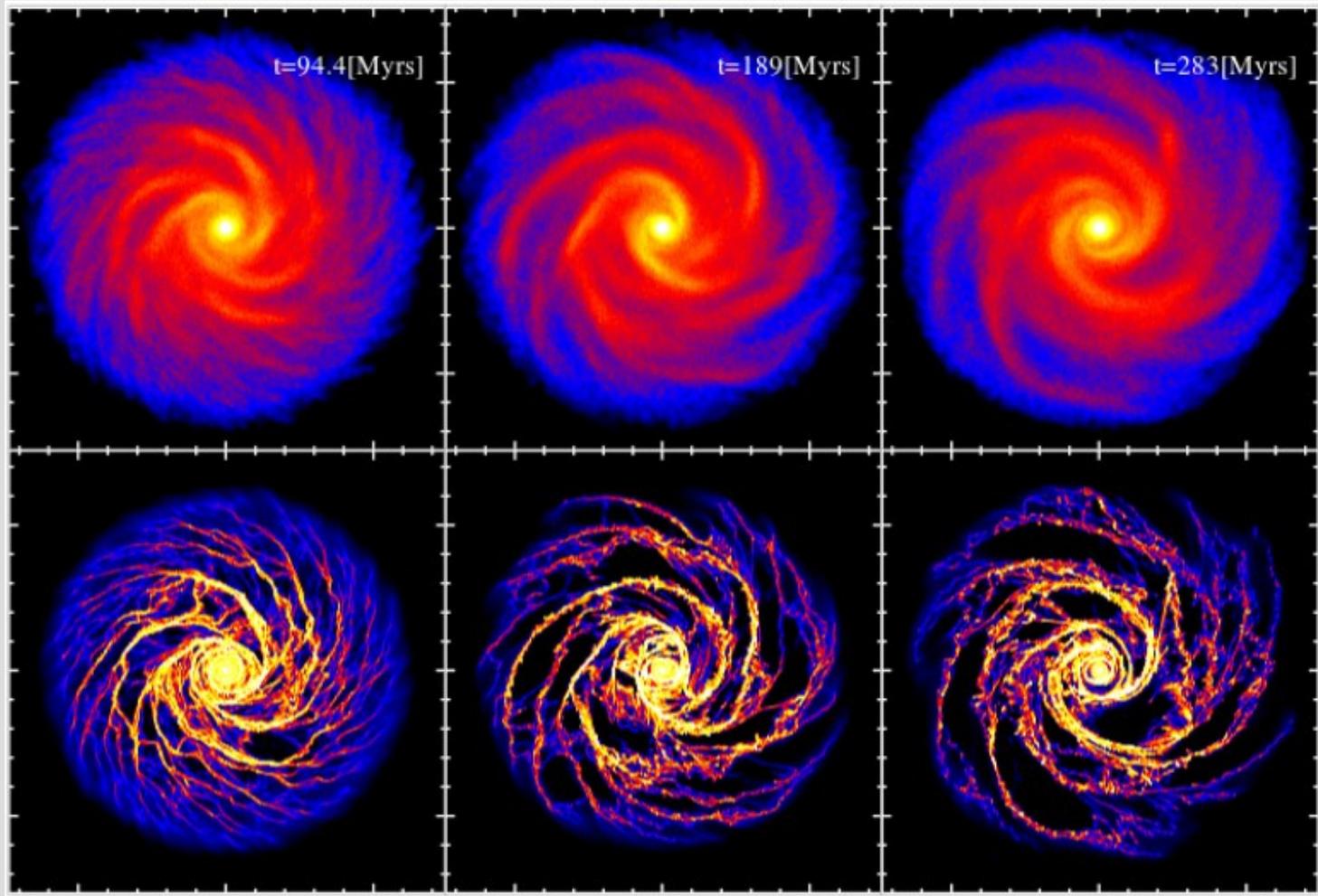
Фрейм – 15 x 15 кпк

# Model Bb: Heavy disk

T=94 Myr

T=189 Myr

T=283 Myr



← STARS

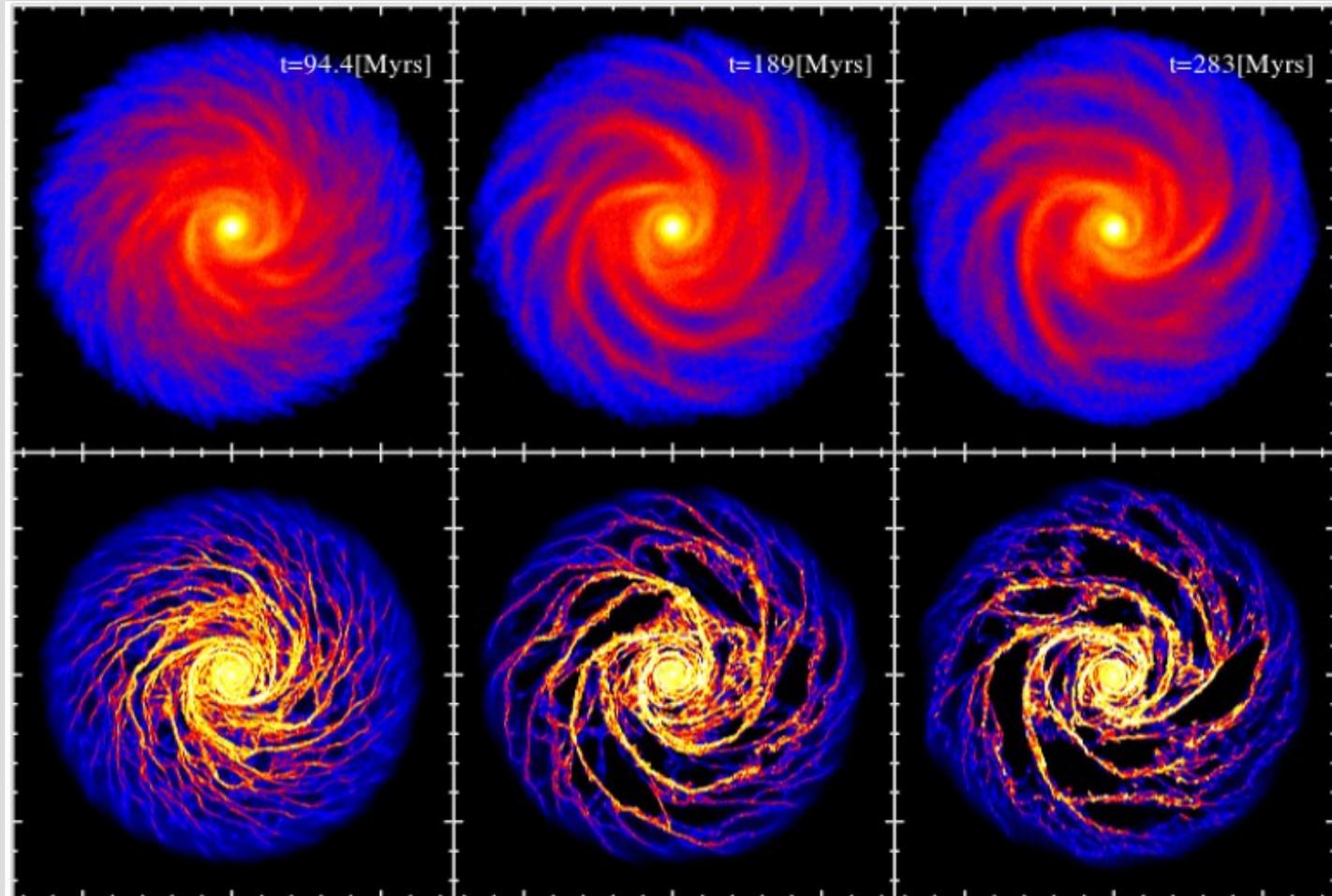
← GAS

# Model Bc: Normal disk

T=94 Myr

T=189 Myr

T=283 Myr



← STARS

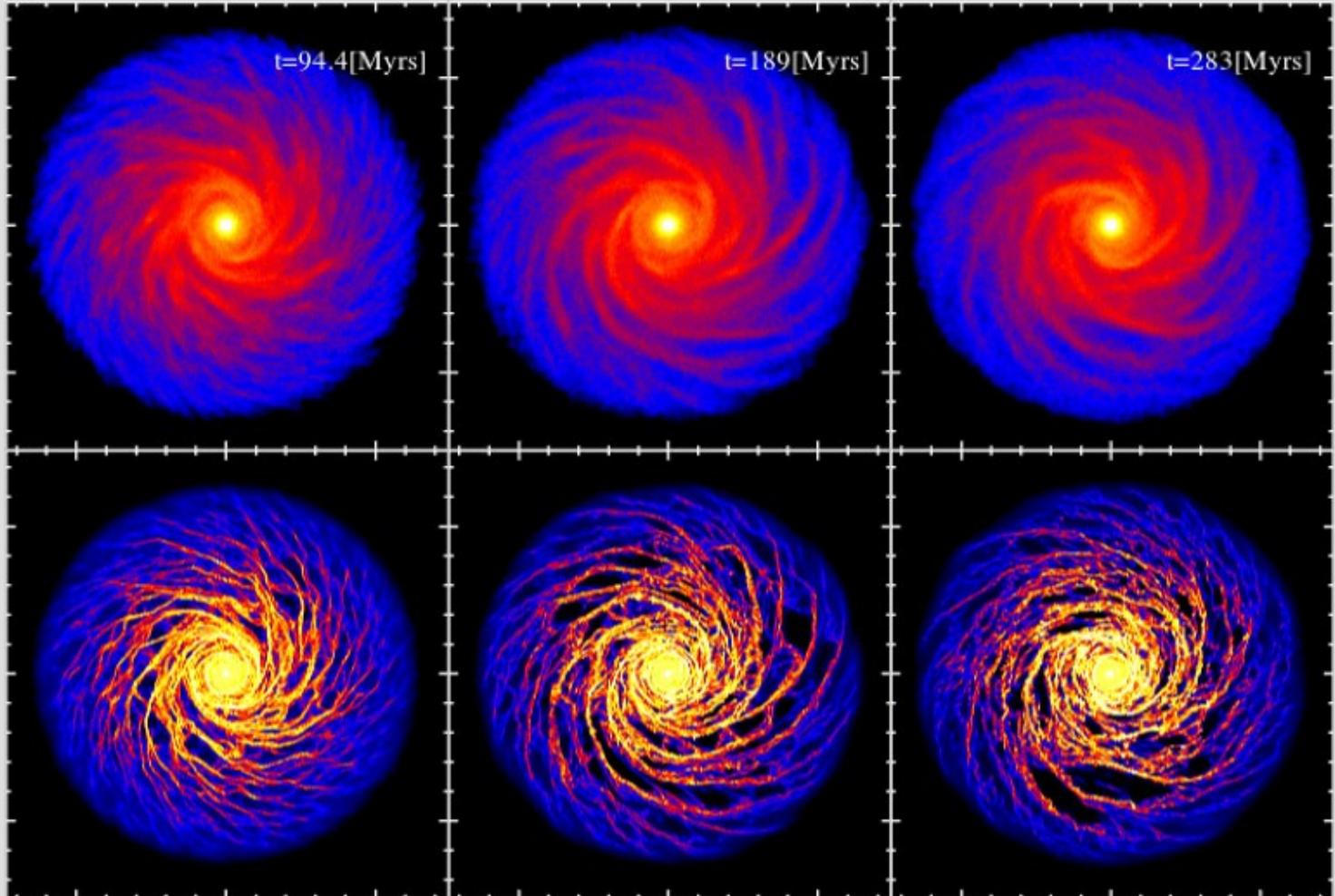
← GAS

# Model Bd: Light disk

T=94 Myr

T=189 Myr

T=283 Myr

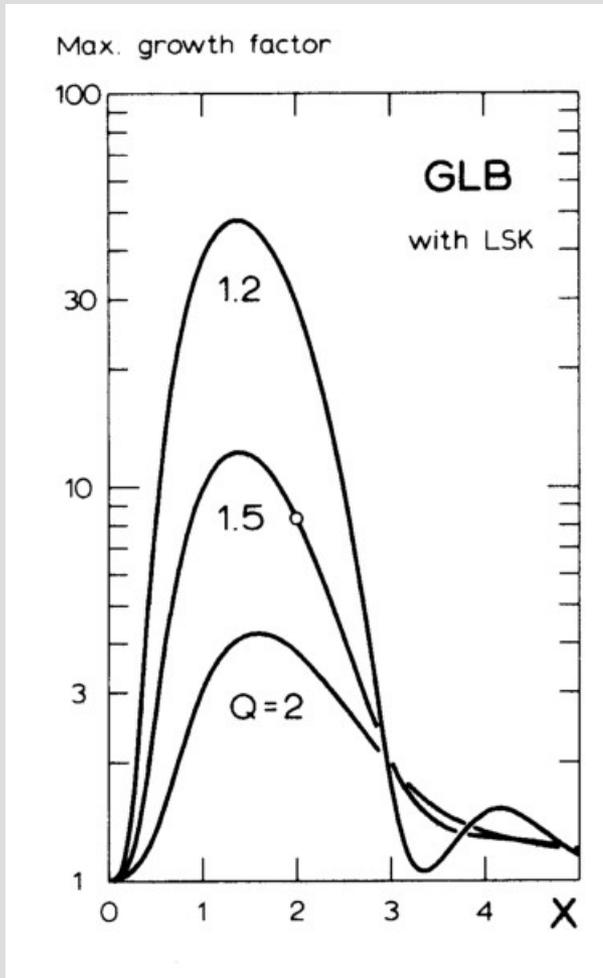


← STARS

← GAS

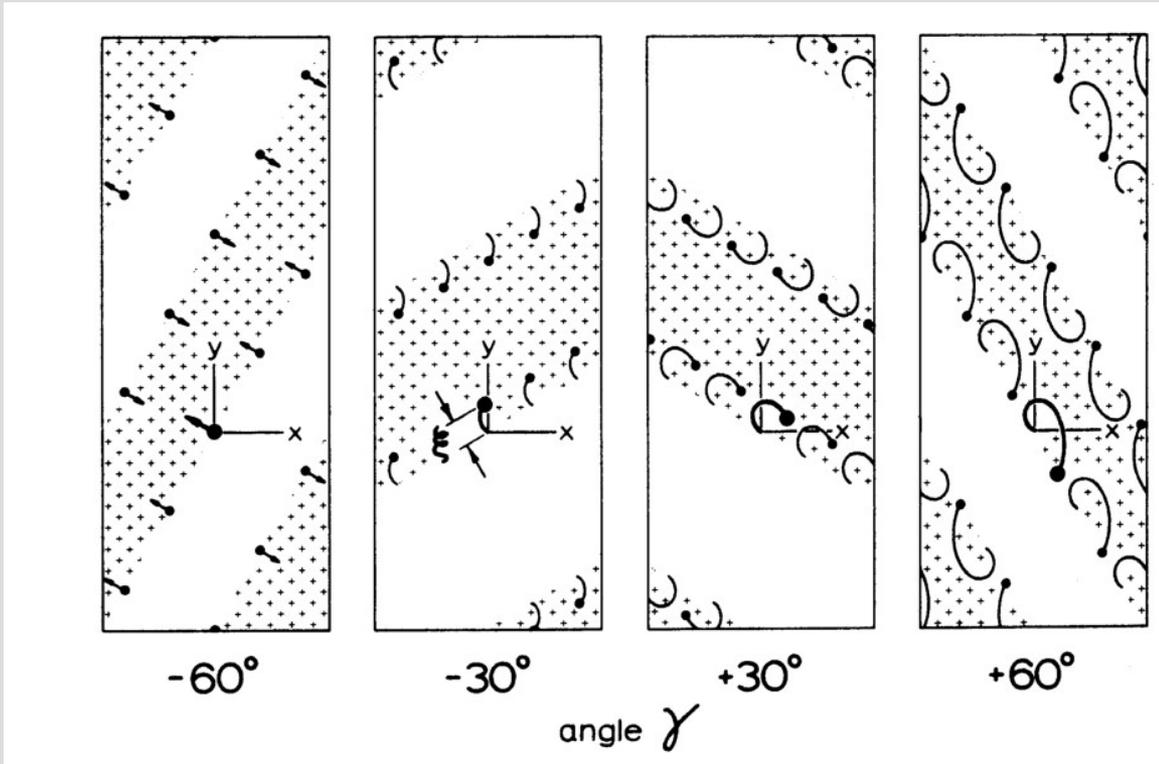
# Swing amplification (Julian & Toomre 1969; Toomre 1981)

## Усиление при перевороте



$$\lambda_c = \frac{4\pi^2 G \Sigma}{\kappa^2},$$

$$X = \lambda_y / \lambda_c$$



# Swing amplification (Julian & Toomre 1969; Toomre 1981)

## Усиление при перевороте

$$\lambda_c = \frac{4\pi^2 G \Sigma_0}{\kappa^2},$$

$$X = \lambda_y / \lambda_c,$$

$$\lambda_y = 2\pi R / m$$

$$m = \frac{\kappa^2 R}{2\pi G \Sigma_0 X} \approx \frac{\kappa^2 R}{4\pi G \Sigma_0},$$

при  $X=2$

Число рукавов растет с ростом  $R$  и уменьшается с ростом  $\Sigma_0$

# Предсказанное Тумре (1981) число спиральных рукавов

$$m = \frac{\kappa^2 R}{4\pi G \Sigma_0}$$

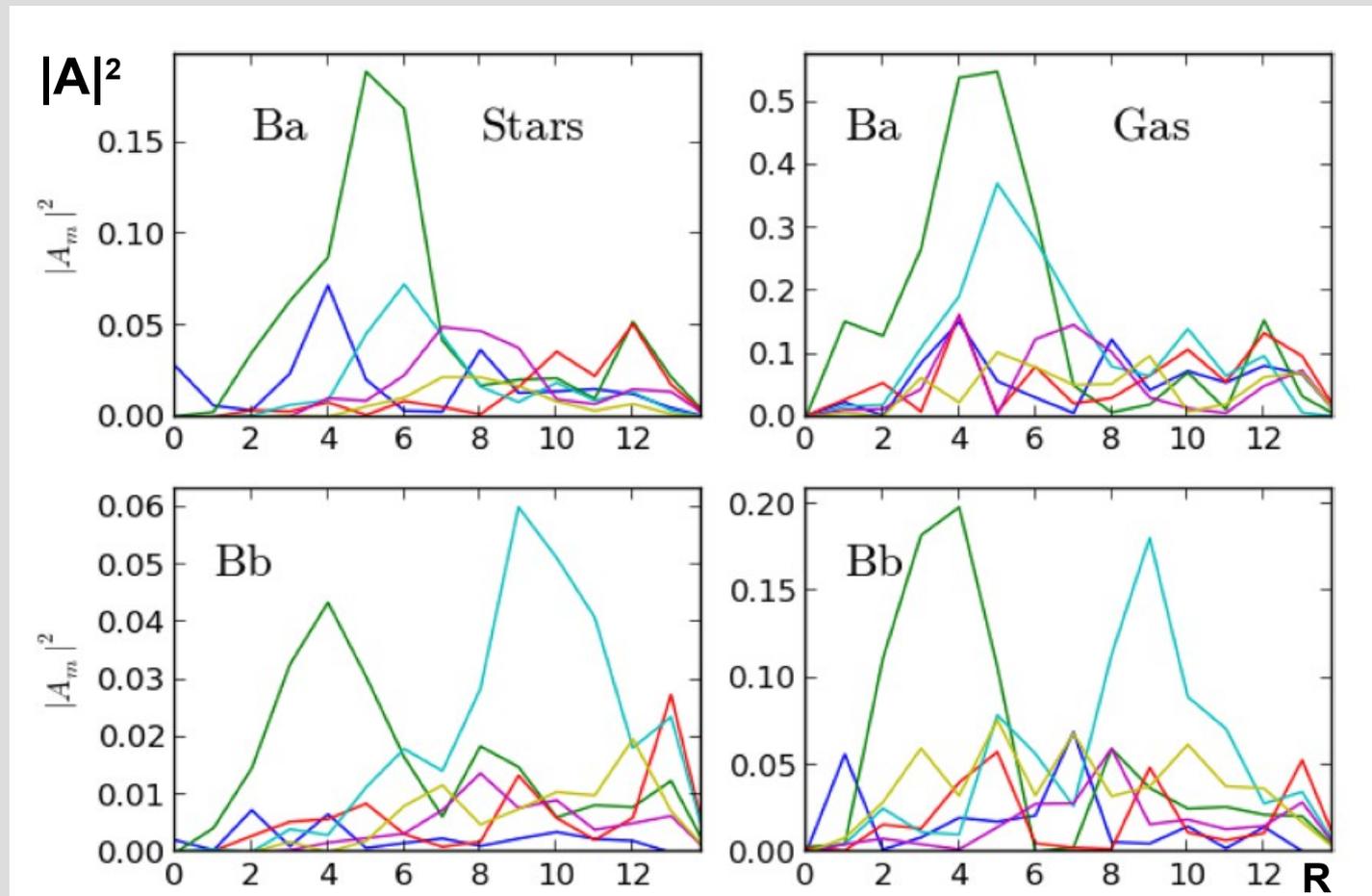
|    |               |     | m              |                |                 |
|----|---------------|-----|----------------|----------------|-----------------|
|    |               |     | R=5 кпс        | R=7.5 кпс      | R=10 кпс        |
| Ba | <b>Huge</b>   | 5.3 | 2.0 <b>(2)</b> | 2.8            | 4.0             |
| Bb | <b>Heavy</b>  | 4.1 | 2.5            | 3.6            | 5.7 <b>(4)</b>  |
| Bc | <b>Normal</b> | 3.2 | 3.1            | 4.8 <b>(4)</b> | 8.2             |
| Bd | <b>Light</b>  | 2.5 | 4.0            | 6.5            | 11.5 <b>(5)</b> |

m в доминирующей моде в N-body модели

в среднем согласуется с числом рукавов в модельных дисках

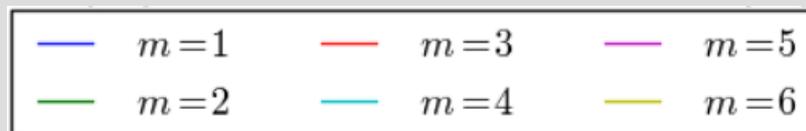
для доминирующих мод в области R=5—8 кпк

# Амплитуда спиральных мод с различным порядком симметрии $m$ в N-body моделях

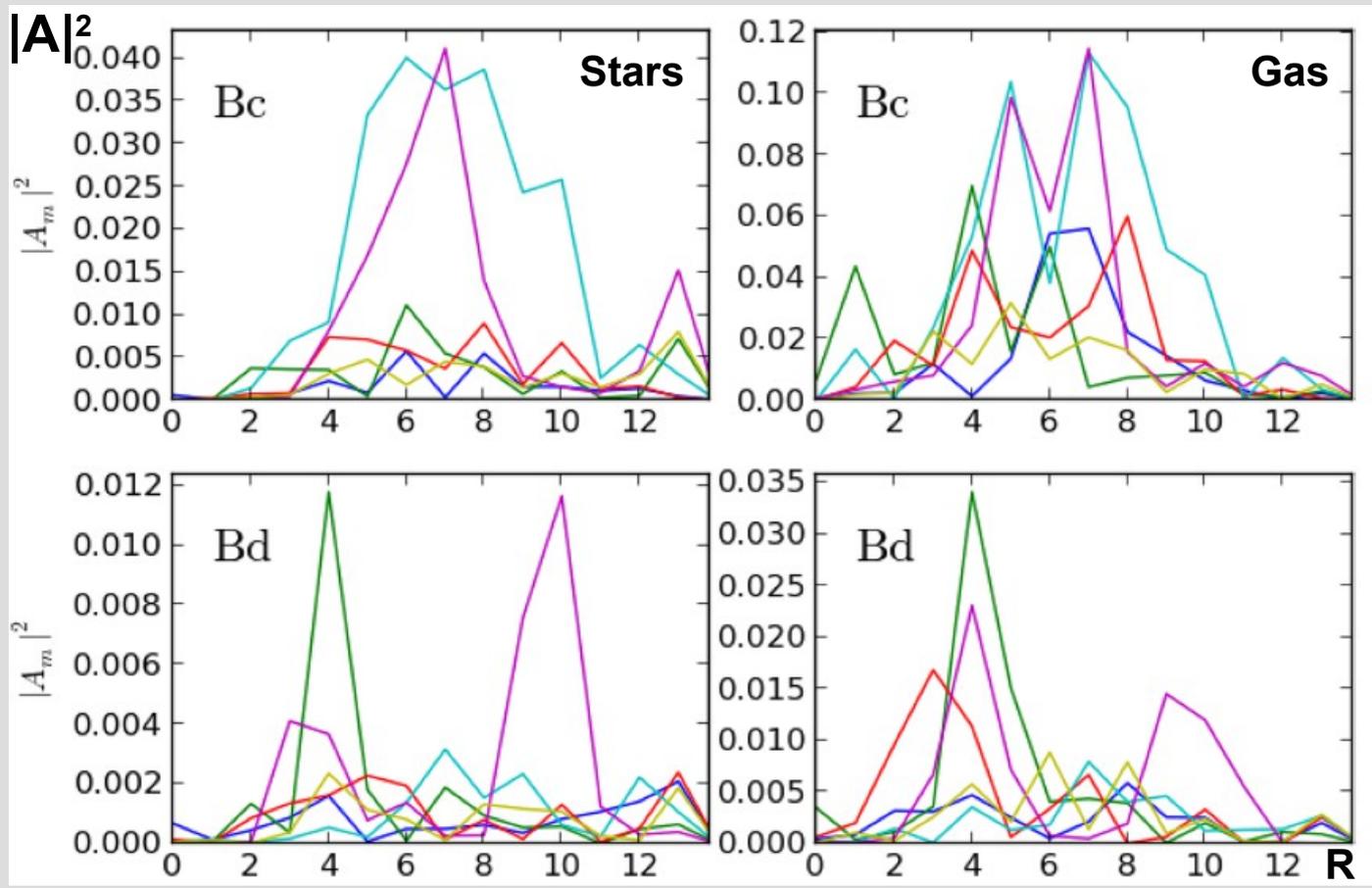


← Huge disk

← Heavy disk

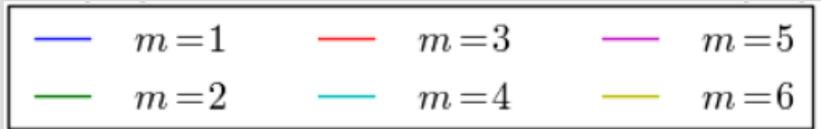


# Амплитуда спиральных мод



← Normal disk

← Light disk



Угловая скорость вращения спирального узора  $\Omega_p$  на разных расстояниях  $R$  и угол закрутки рукавов  $\alpha$  в модельных дисках

| $\Omega_p$ (R=5 kpc) |             | $\Omega_p$ (R=7.5 kpc) | $\Omega_p$ (R=10 kpc) | $\alpha$ [°] |
|----------------------|-------------|------------------------|-----------------------|--------------|
| <b>Huge</b>          | 38 km/s/kpc | 44                     | 33                    | 19           |
| <b>Heavy</b>         | 34          | 25                     | 21                    | 20           |
| <b>Normal</b>        | 37          | 27                     | 25                    | 23           |
| <b>Light</b>         | 39          | 35                     | 28                    | 22           |

$\Omega_p$  уменьшается с ростом  $R$ , что указывает на материальную природу рукавов.

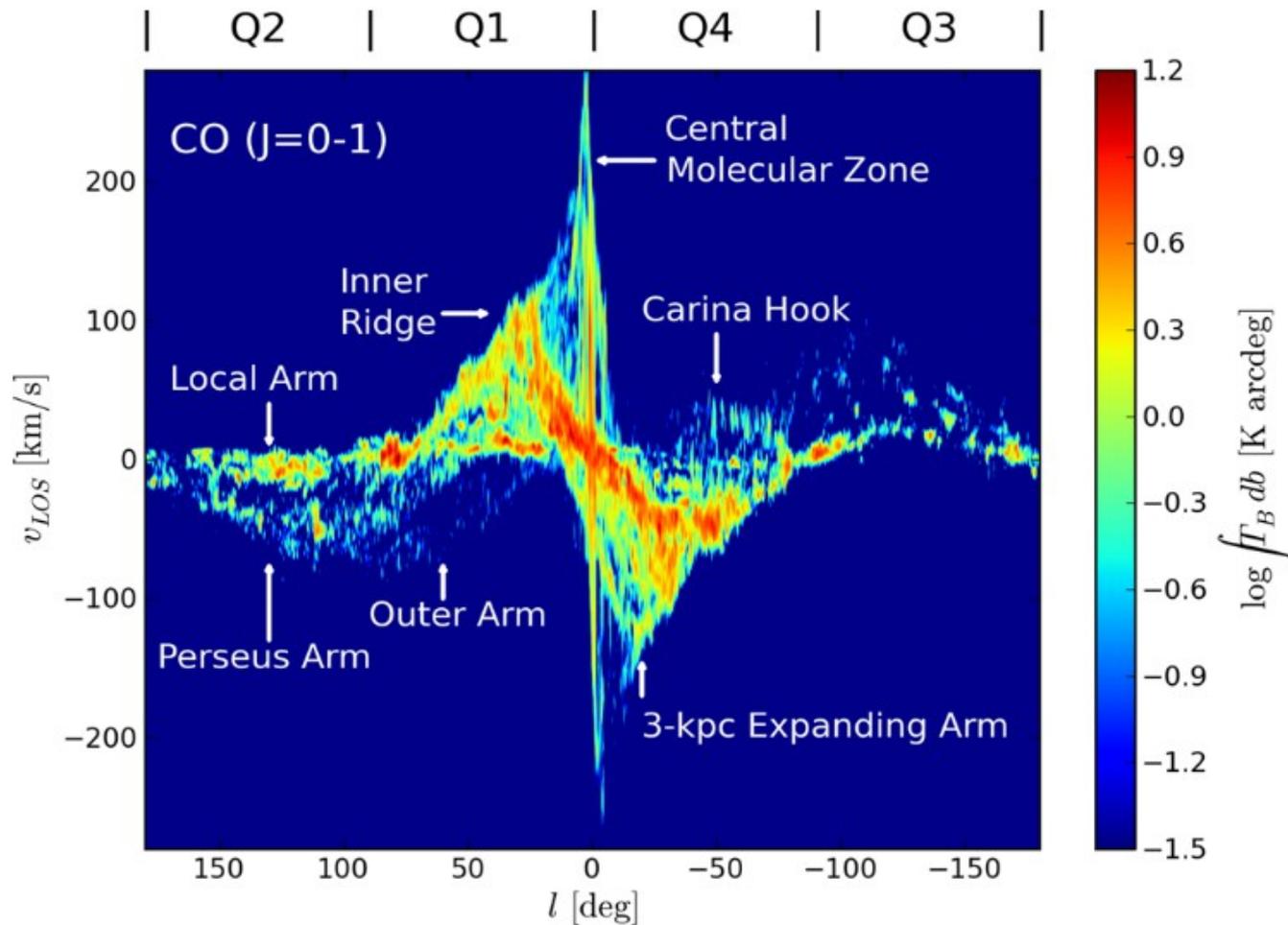
Угол закрутки рукавов  $\alpha$  составляет в среднем  $\alpha = 21^\circ$

## Результаты сравнения различных моделей с L-V диаграммами Дейма и др. 2001

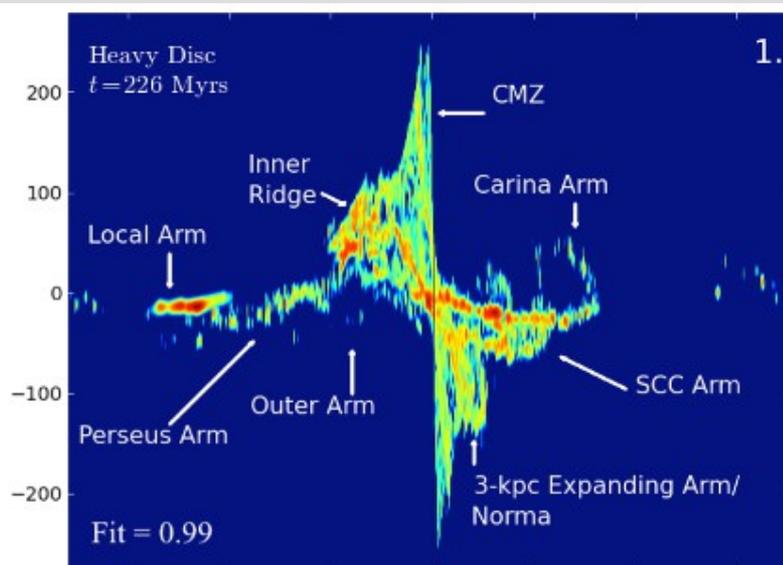
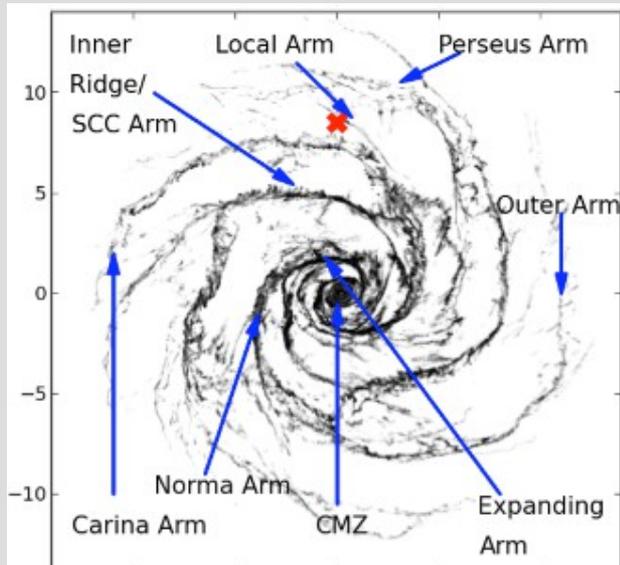
| Model | $t_{\text{bf}}$ (Myr) | $R_{\text{obs}}$ (kpc) | $V_{\text{obs}}$ (km s <sup>-1</sup> ) | Fit stat.    |
|-------|-----------------------|------------------------|----------------------------------------|--------------|
| Ba    | 197                   | 8.5                    | 215                                    | 0.994        |
| Bb    | 226                   | 8.5                    | 200                                    | 0.857        |
| Bc    | 207                   | 7.0                    | 200                                    | 0.833        |
| Bd    | 207                   | 7.0                    | 205                                    | <u>0.768</u> |
| Db    | 235                   | 8.5                    | 200                                    | 0.974        |
| Dc    | 216                   | 8.0                    | 200                                    | 0.931        |
| Hb    | 216                   | 8.0                    | 205                                    | 0.925        |

# Longitude–velocity map of brightness temperature of the CO

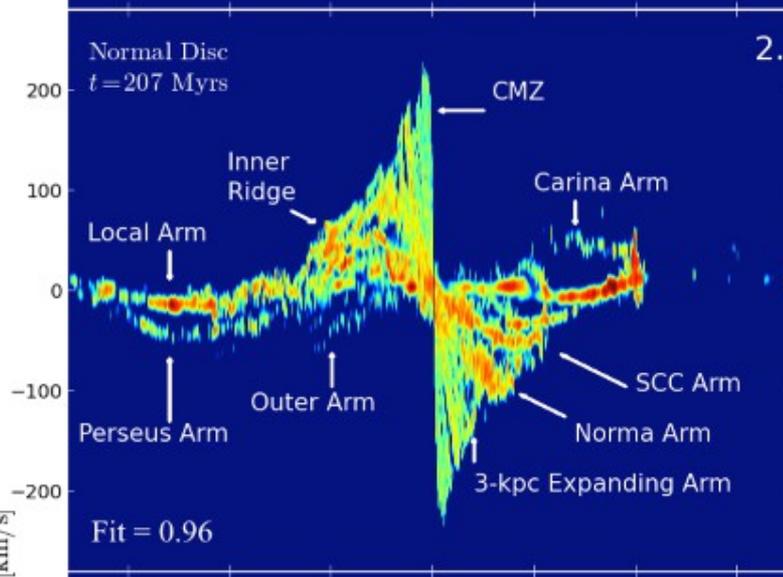
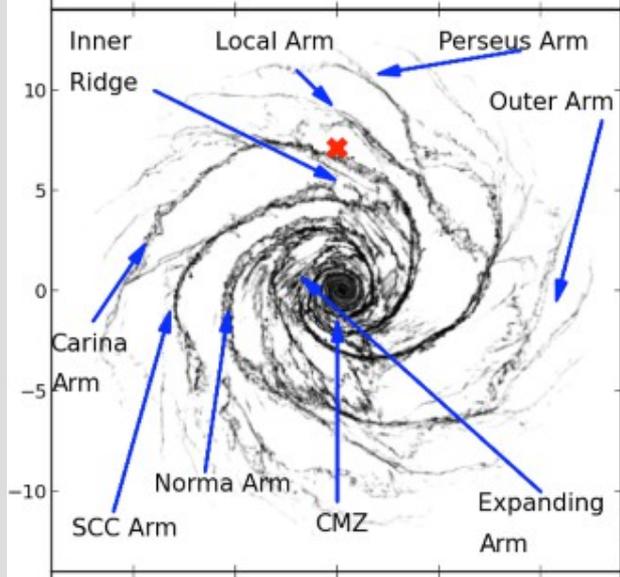
( $J = 0-1$ ) transition (Dame, Hartmann & Thaddeus 2001)



# Наилучшие N-body модели

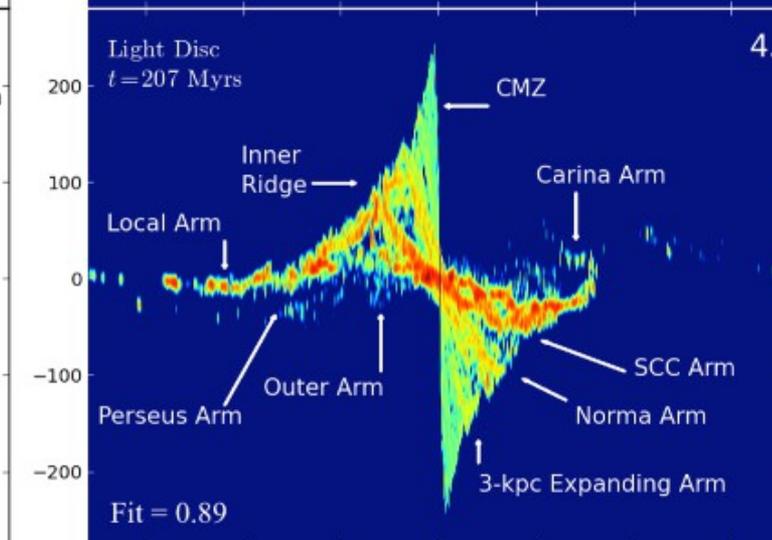
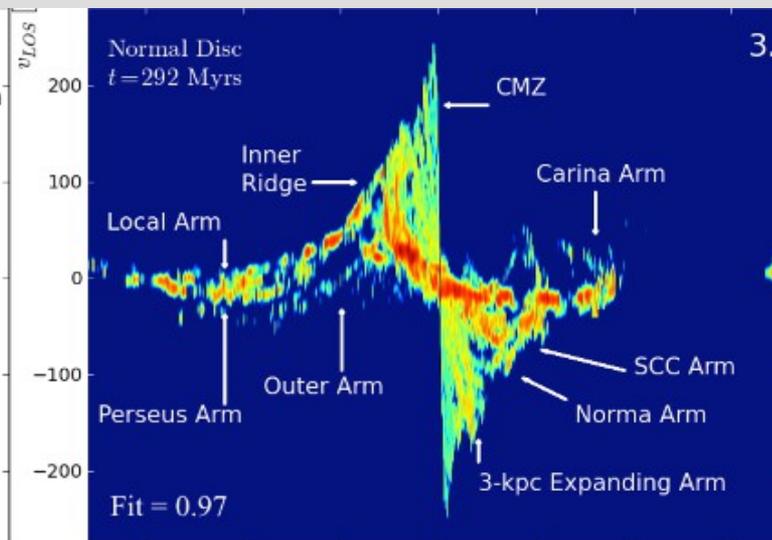
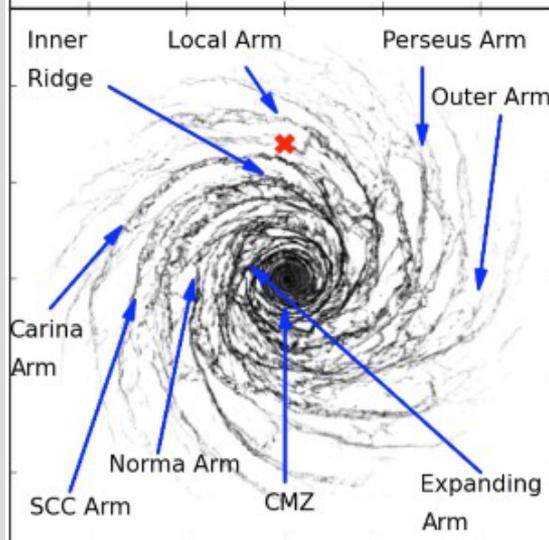
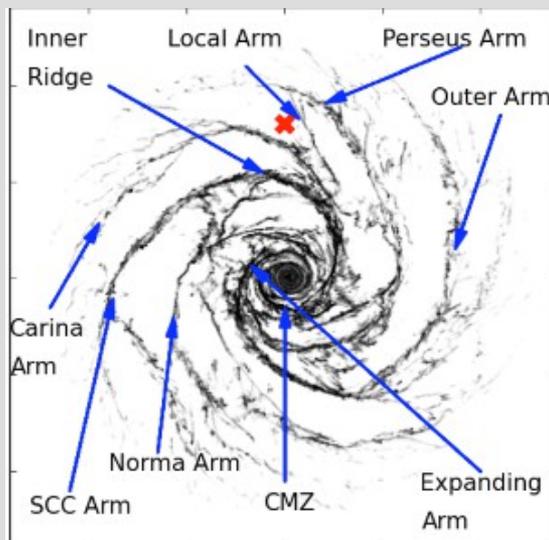


**Heavy  
Disk  
T=226 Myr  
Fit=0.99**



**Normal  
Disk  
T=207 Myr  
Fit=0.96**

# Наилучшие N-body модели



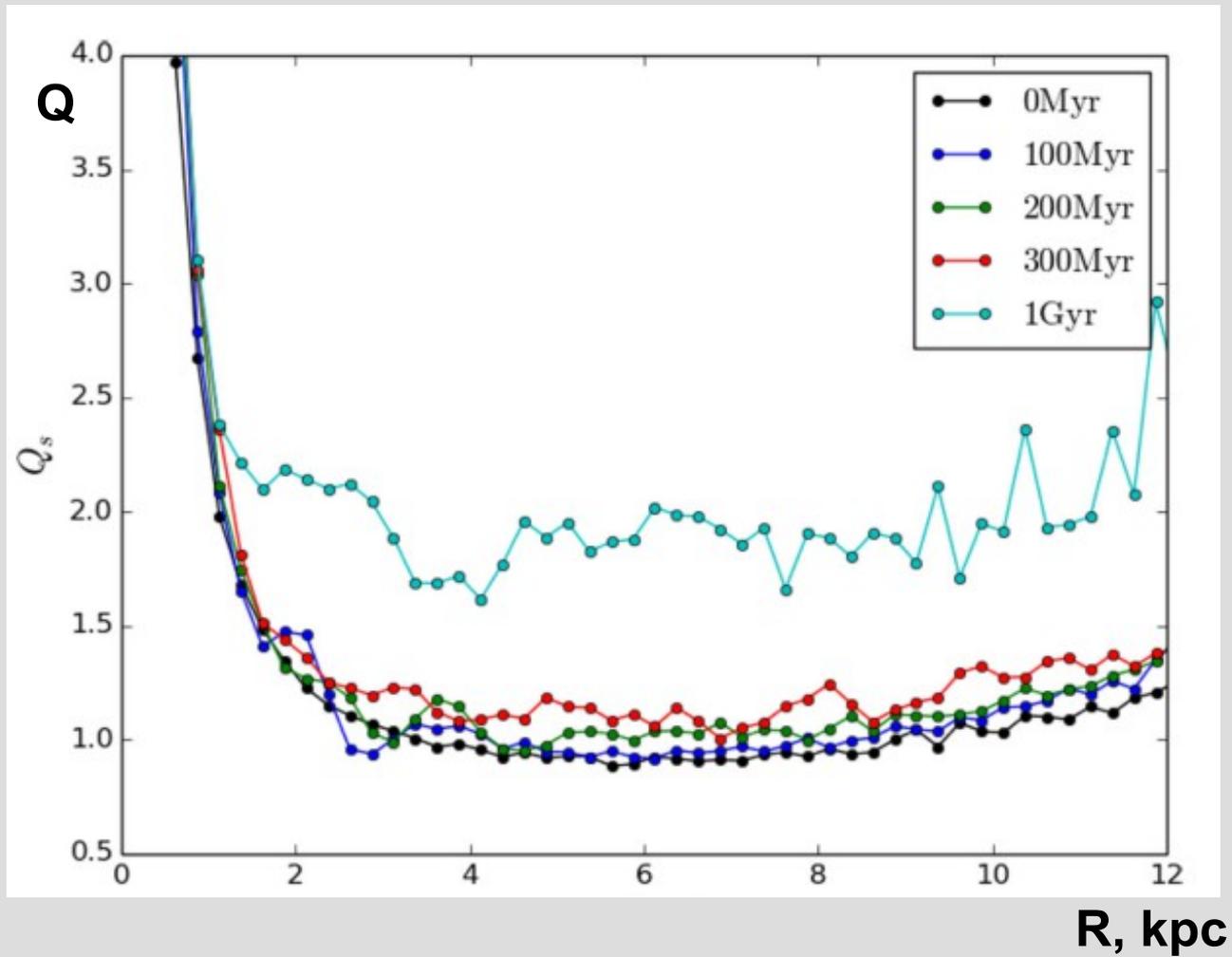
**Normal  
Disk  
T=292 Myr  
Fit=0.97**

**Light  
Disk  
T=207 Myr  
Fit=0.89**

## **Выводы:**

- 1. N-body диски формируют коротко-живущие материальные (не волны плотности) спиральные рукава.**
- 2. Число спиральных рукавов  $m$  увеличивается с уменьшением “disk-to-halo mass” и с ростом  $R$ , что согласуется с теорией “swing amplification” (Джулиан Тумре 1969, Тумре 1981).**
- 3. Угол закрутки спиральных рукавов  $18^\circ < \alpha < 25^\circ$**
- 4. Угловая скорость спиральных рукавов  $\Omega_s$  уменьшается с расстоянием  $R$ .**
- 5. Авторы считают, что N-body модели с нормальным диском ( $M_d = 3.2 \cdot 10^{10} M_\odot$ ),  $m=4$  и  $\alpha=20^\circ$  очень хорошо согласуются с наблюдениями.**

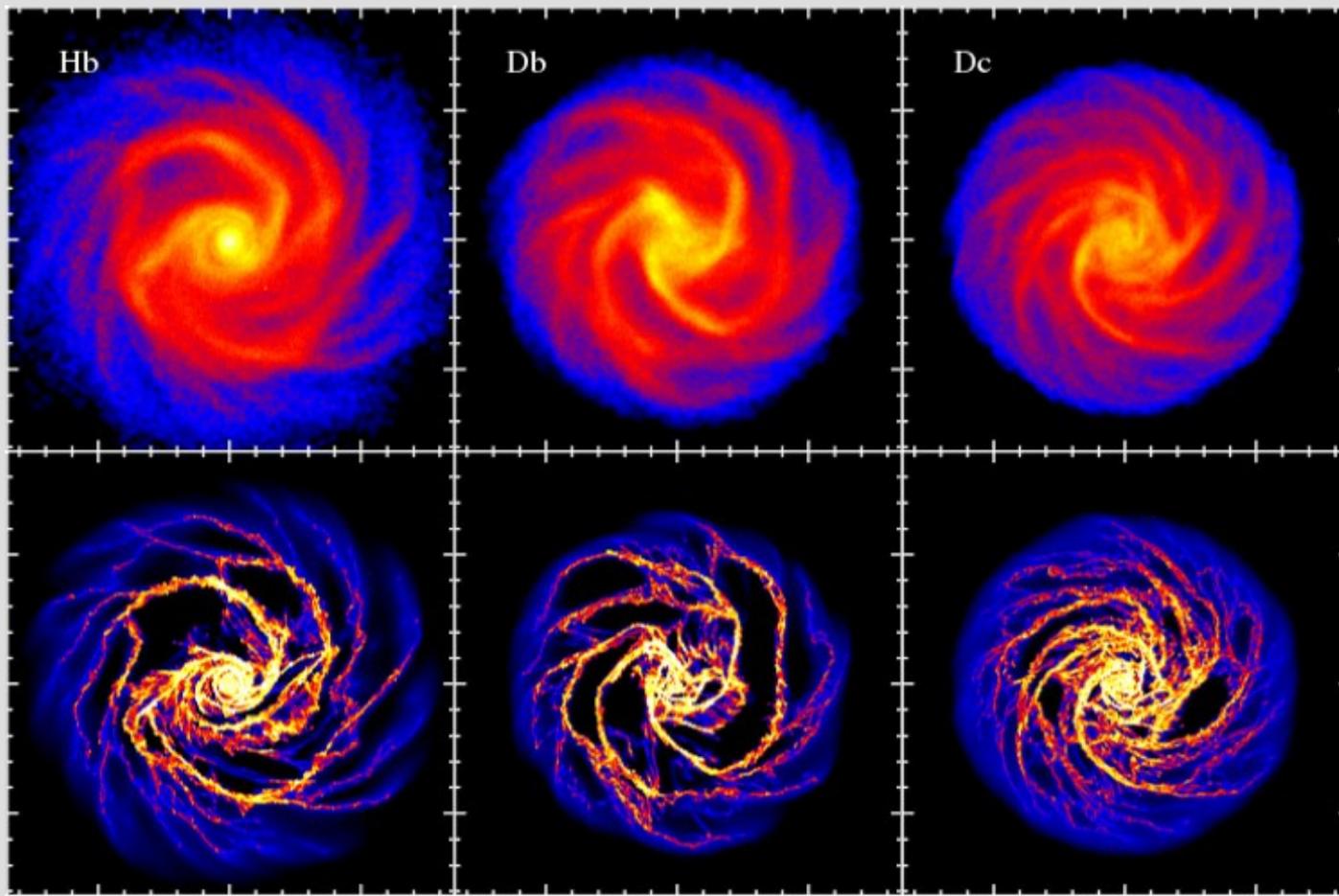
# Эволюция параметра устойчивости Тумре $Q$ звездного диска



Live halo

Without bulge  
Moderate disk

Without bulge  
Light disk



← STARS

← GAS

Модели демонстрируют  $m=3$  моду в центральной области.  
Db и Dc формируют бар.