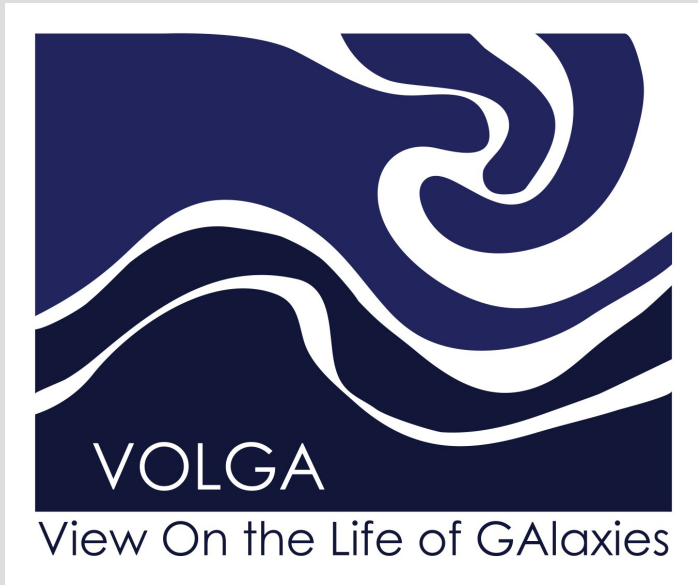


**Реферат статей Петти и др. (2014, 2015).
Морфология Млечного Пути.
Реконструкция L-V диаграмм**



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

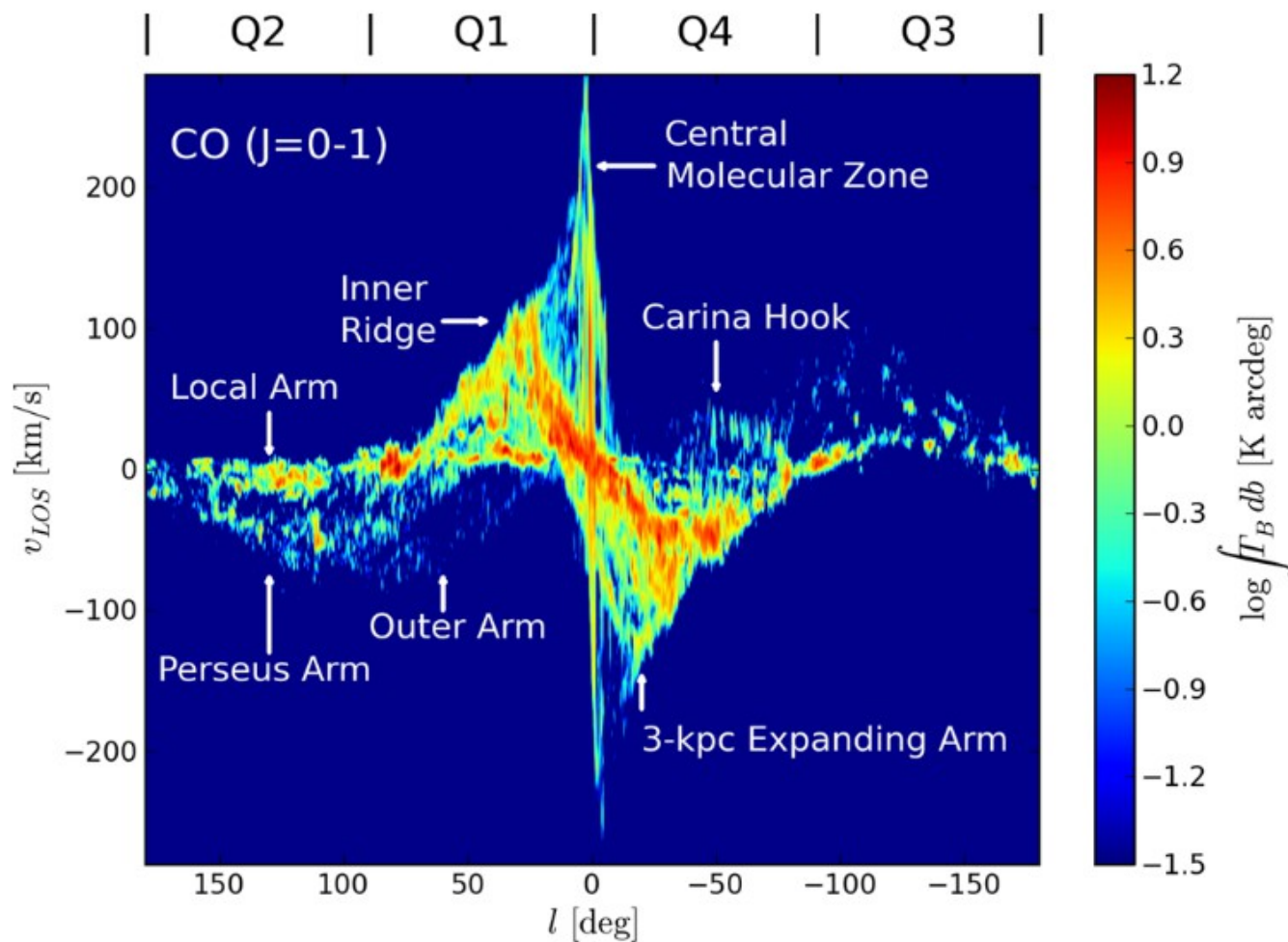
1 School of Physics and Astronomy, University of Exeter, UK

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 $i=10\text{--}15^\circ$.

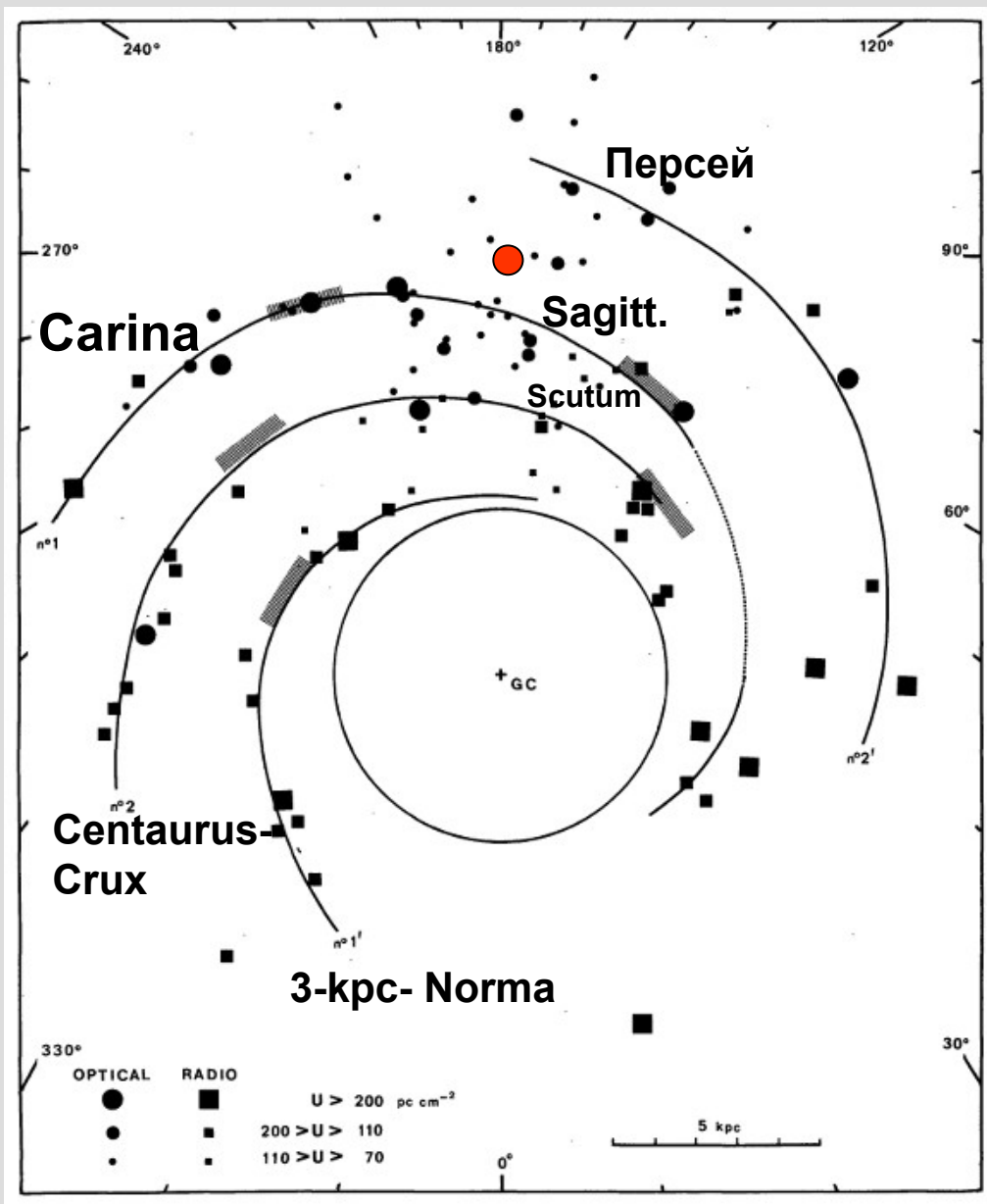
Longitude–velocity map of brightness temperature of the CO

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



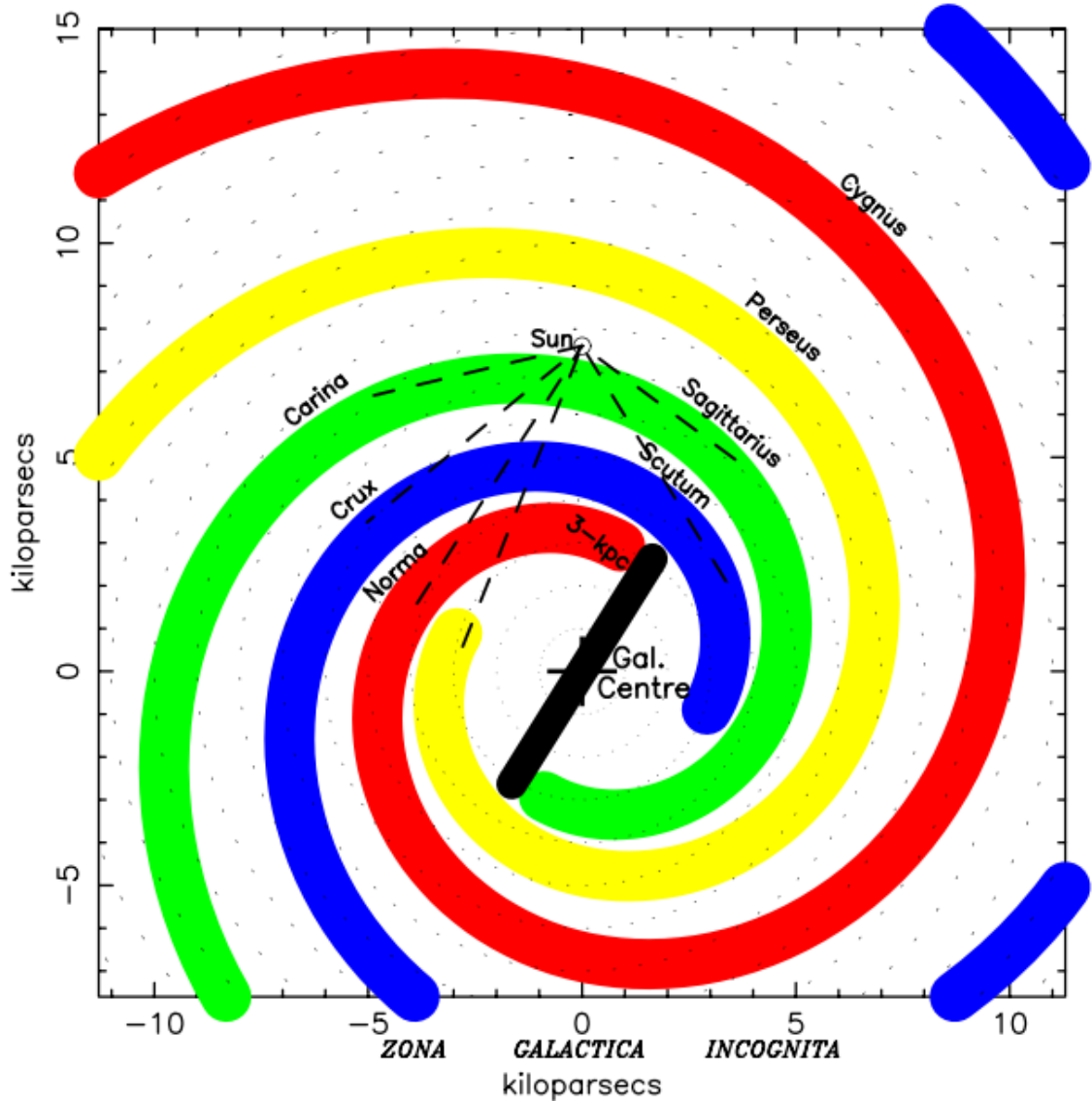
115 GHz

2.6 mm



Спиральная структура
Галактики из работы
Жоржелина и Жиржелина
(1976)

Рукав Киль-Стрельца –
основной



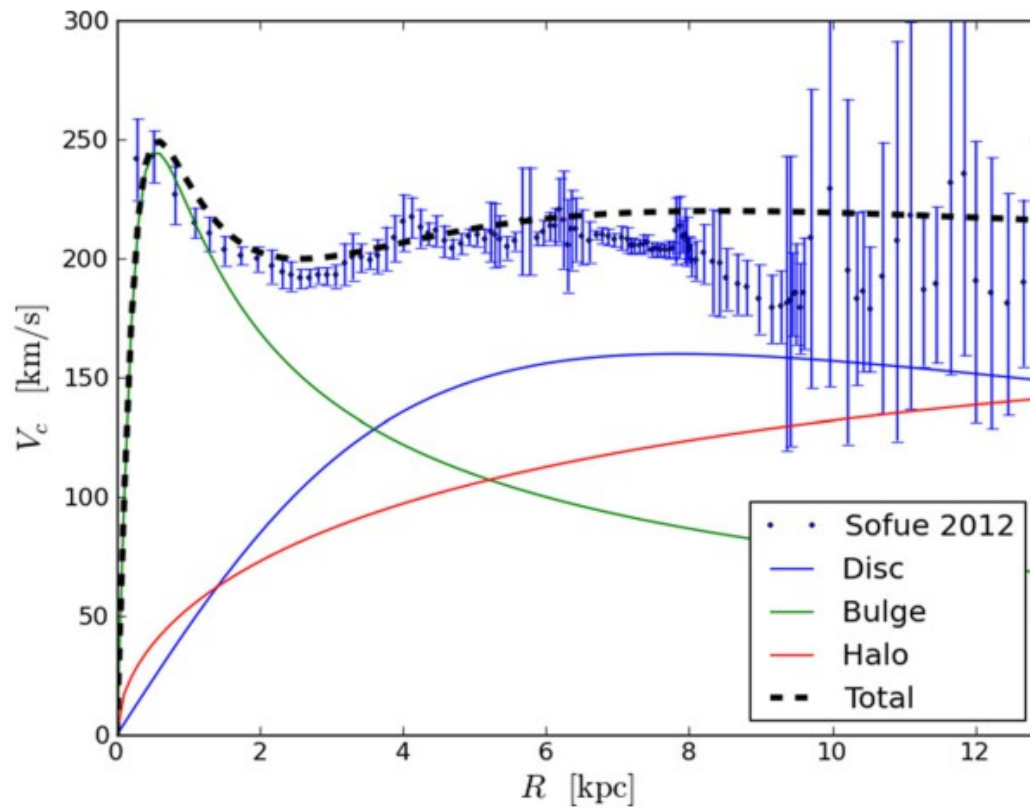
**Спиральный узор
Галактики
из работы
Валли (2008)**

**По сравнению с
Ж&Ж (1976)**

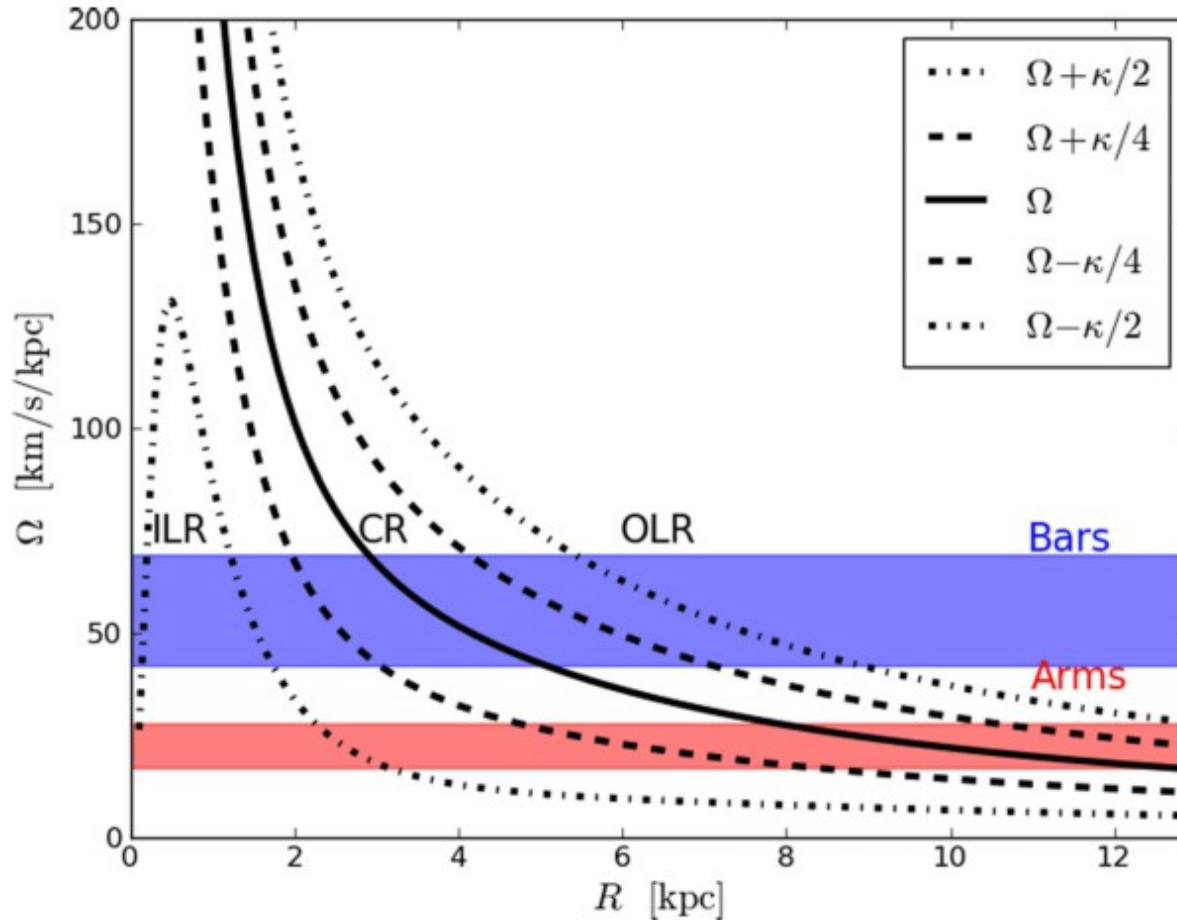
Спиральный узор

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

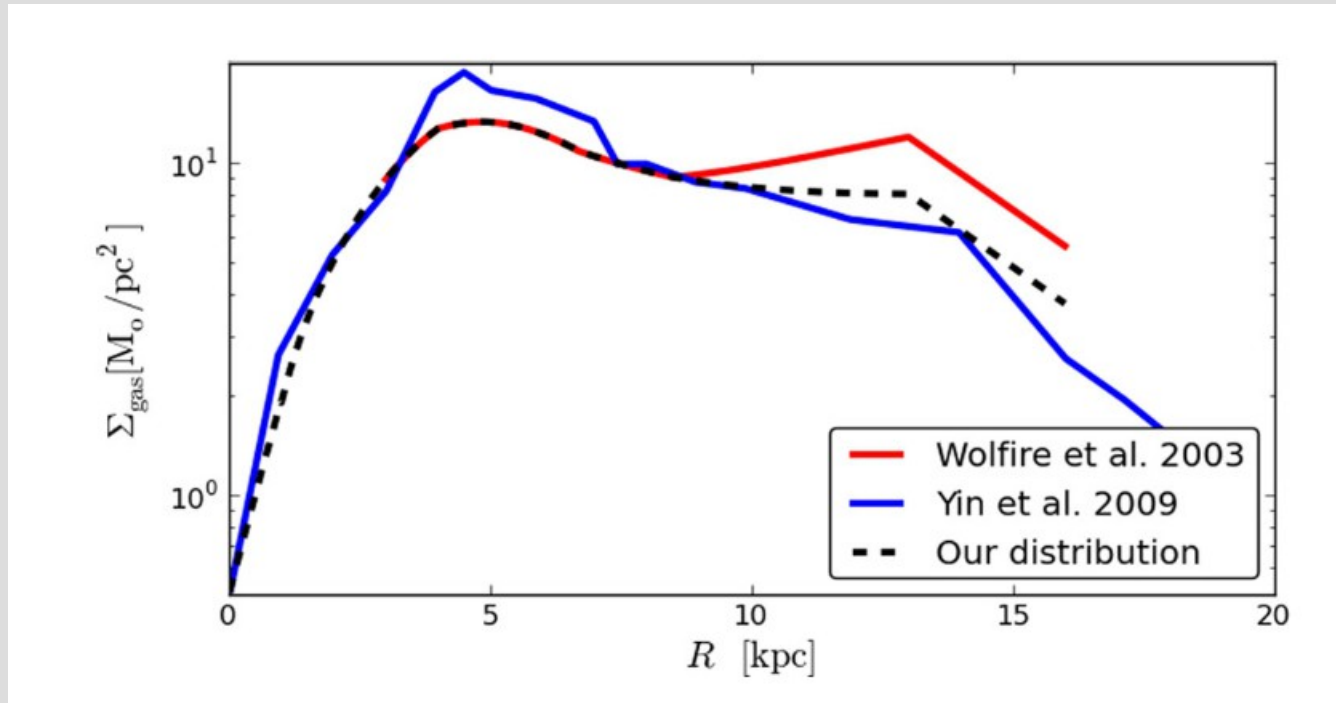
Вклад диска, балджа и гало в модельную кривую вращения



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



Начальное распределение газа в модельном диске



Sanders, Scoville, Solomon 1985

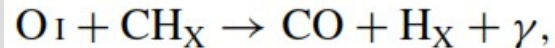
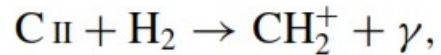
Химия

Каждая SPH частица имеет массив, отражающий содержание различных элементов

5 10^6 SPH particles

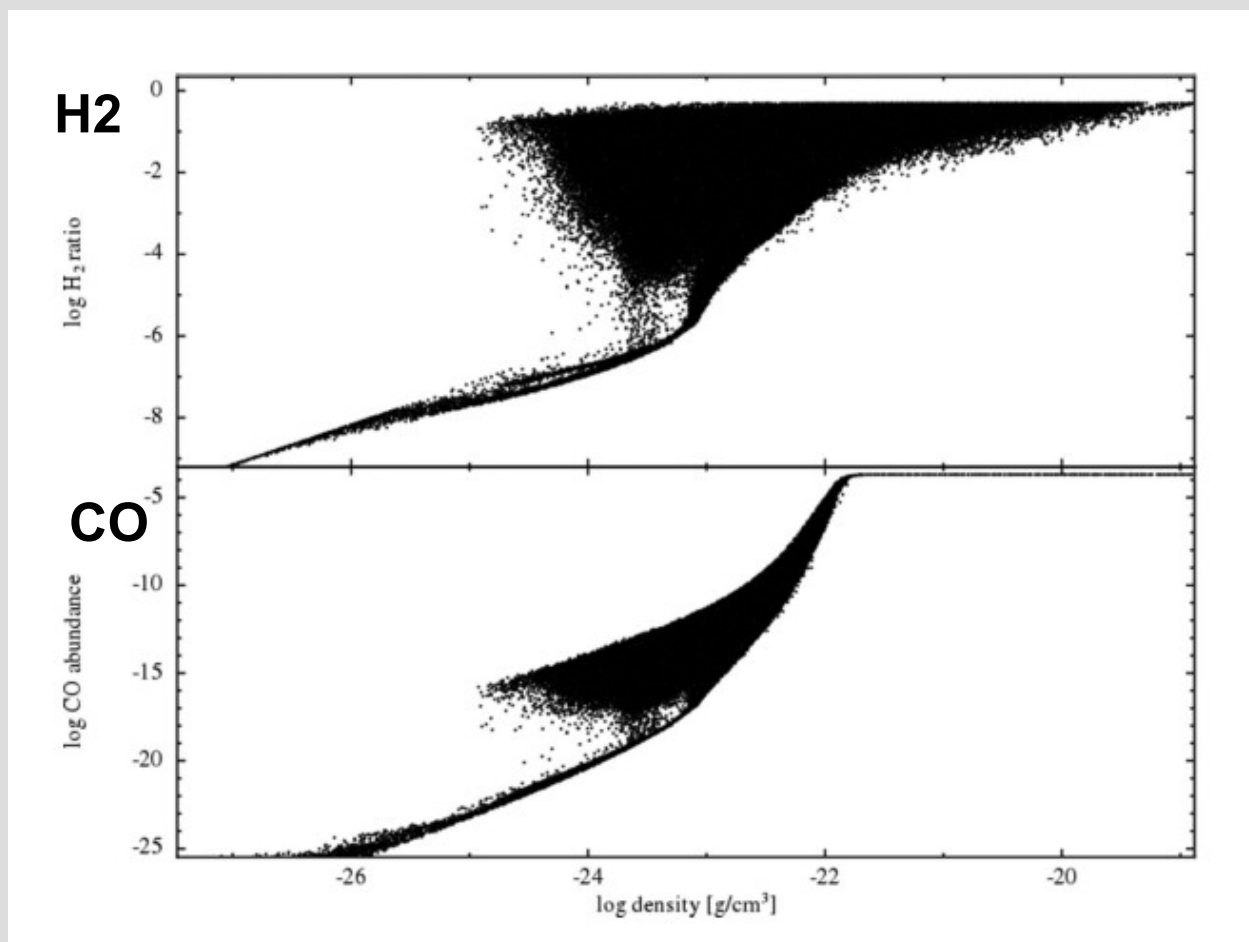
В начальный момент все частицы содержат 100% H I

H₂ формируется на поверхности пылинок и разрушается фотодиссоциацией, которая определяется поглощением и количеством H₂ (column density)



В моделях поддерживается начальное содержание C II и O I

Доля H₂ 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 ν обновляется

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

Через непрозрачность (κ), испускательную способность (ϵ) 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_{pixels} – число пиксель с ненулевым излучением

Пиксель – 0.125° 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

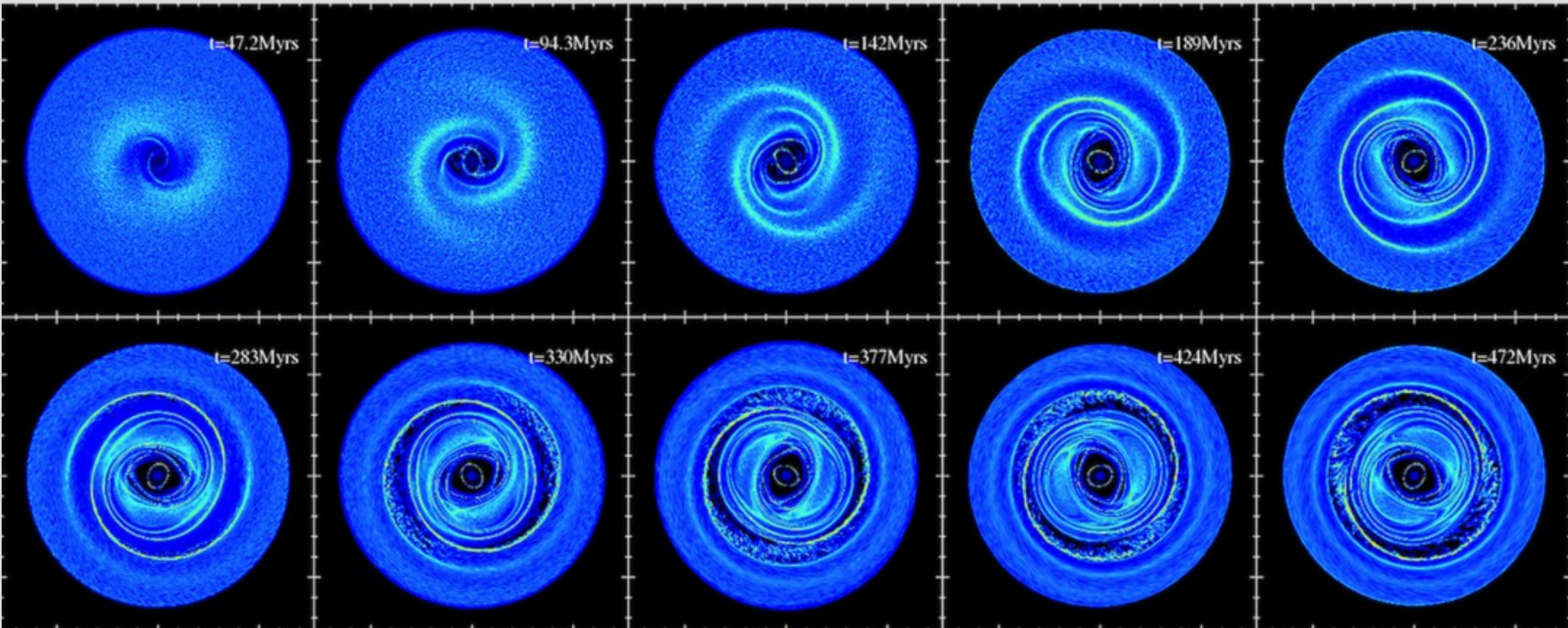
Wkr2 $\rightarrow r_c=1.4$ крс

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

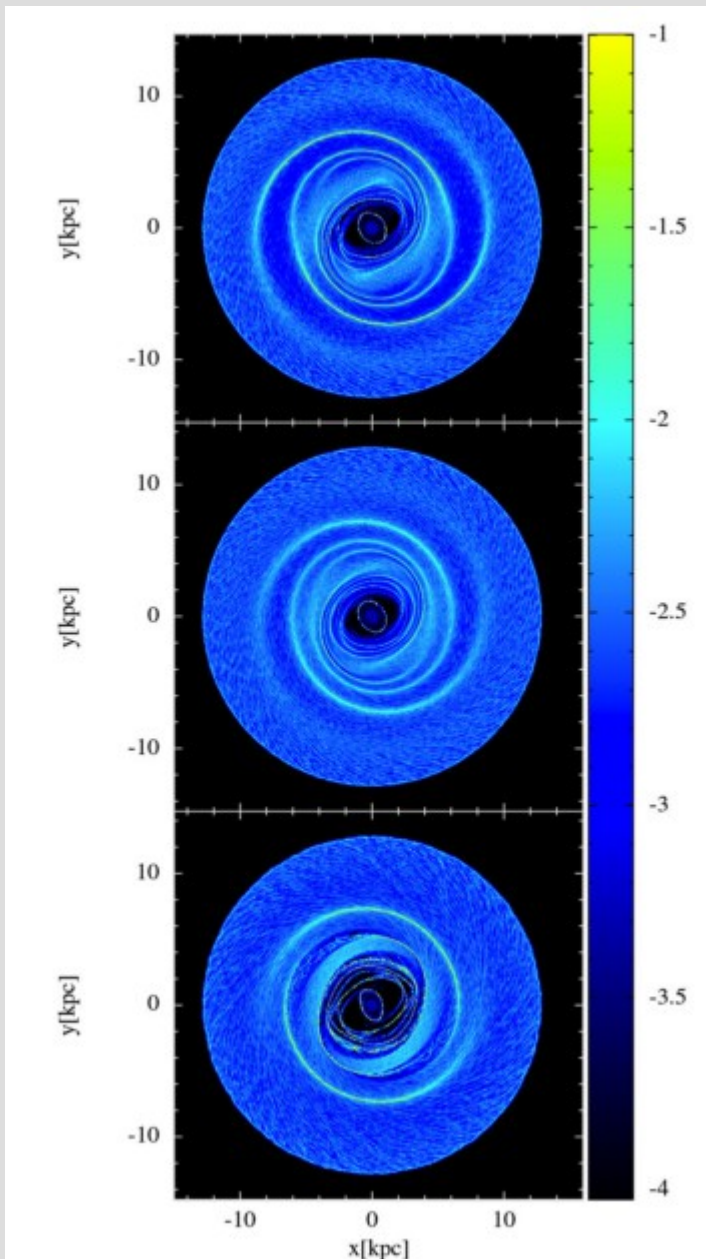
После ~ 4 оборотов бара спиральные рукава формируют “elliptical/ring-like structure at the OLR”

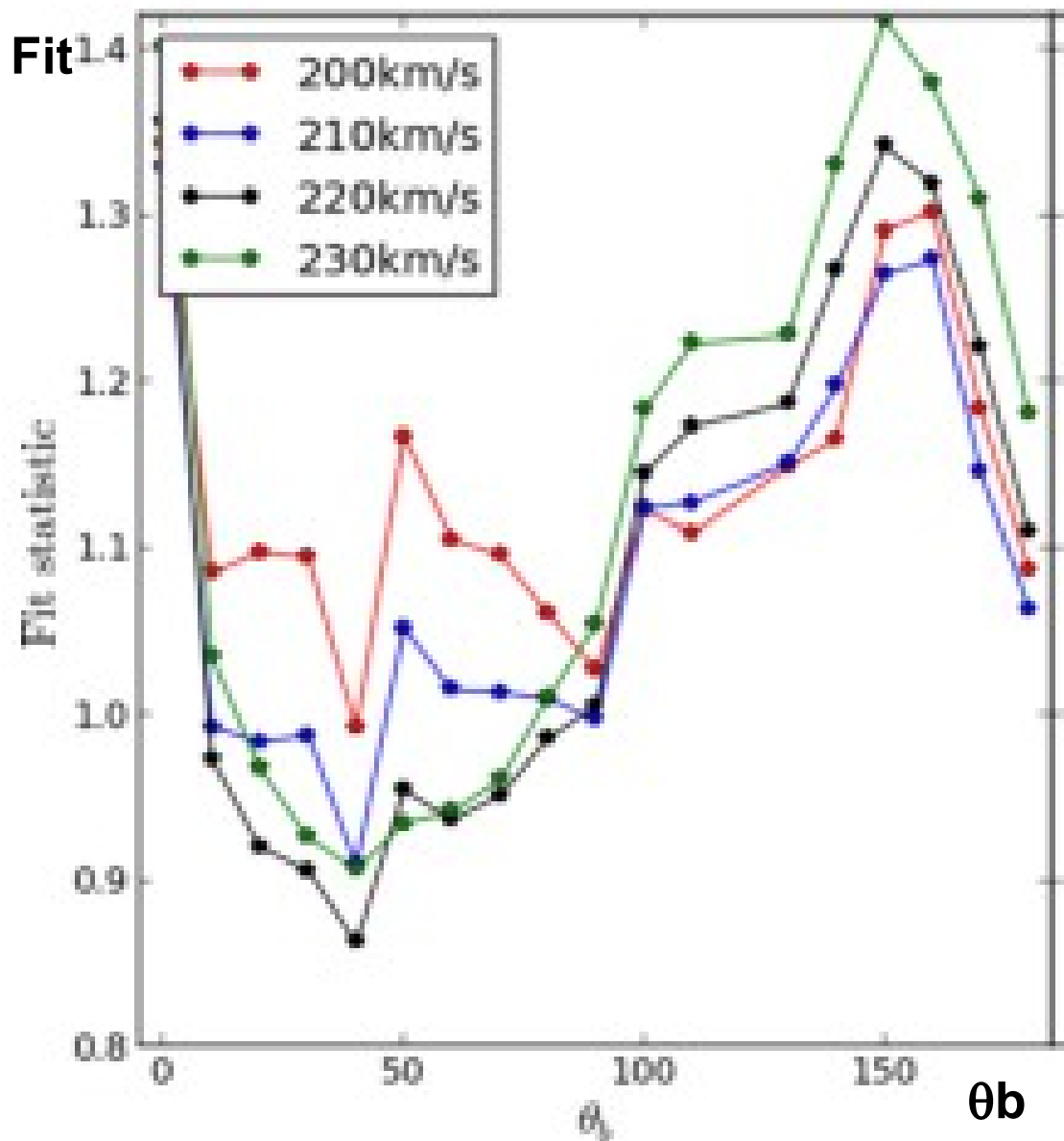
$T=236 \text{ Myr}$, $\Omega_b=50 \text{ km/s/kpc}$, $\theta_b=45^\circ$

← WK

← WKr2

← LM





Fit статистика

**для моделей
с баром WK**

T=470 Myr

**для различных
значений θ_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

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

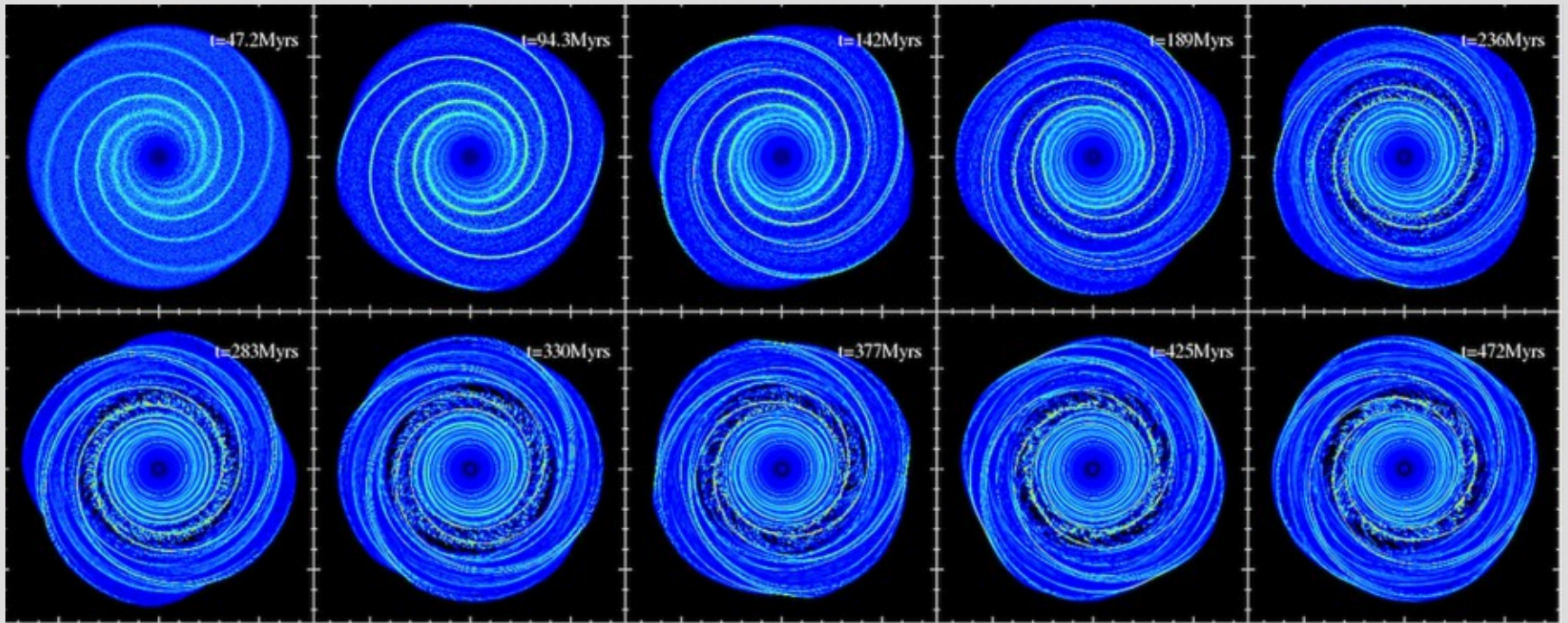
$$K_n = nN/r \sin(\alpha).$$

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

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

**Cox & Gomez
(2002)**

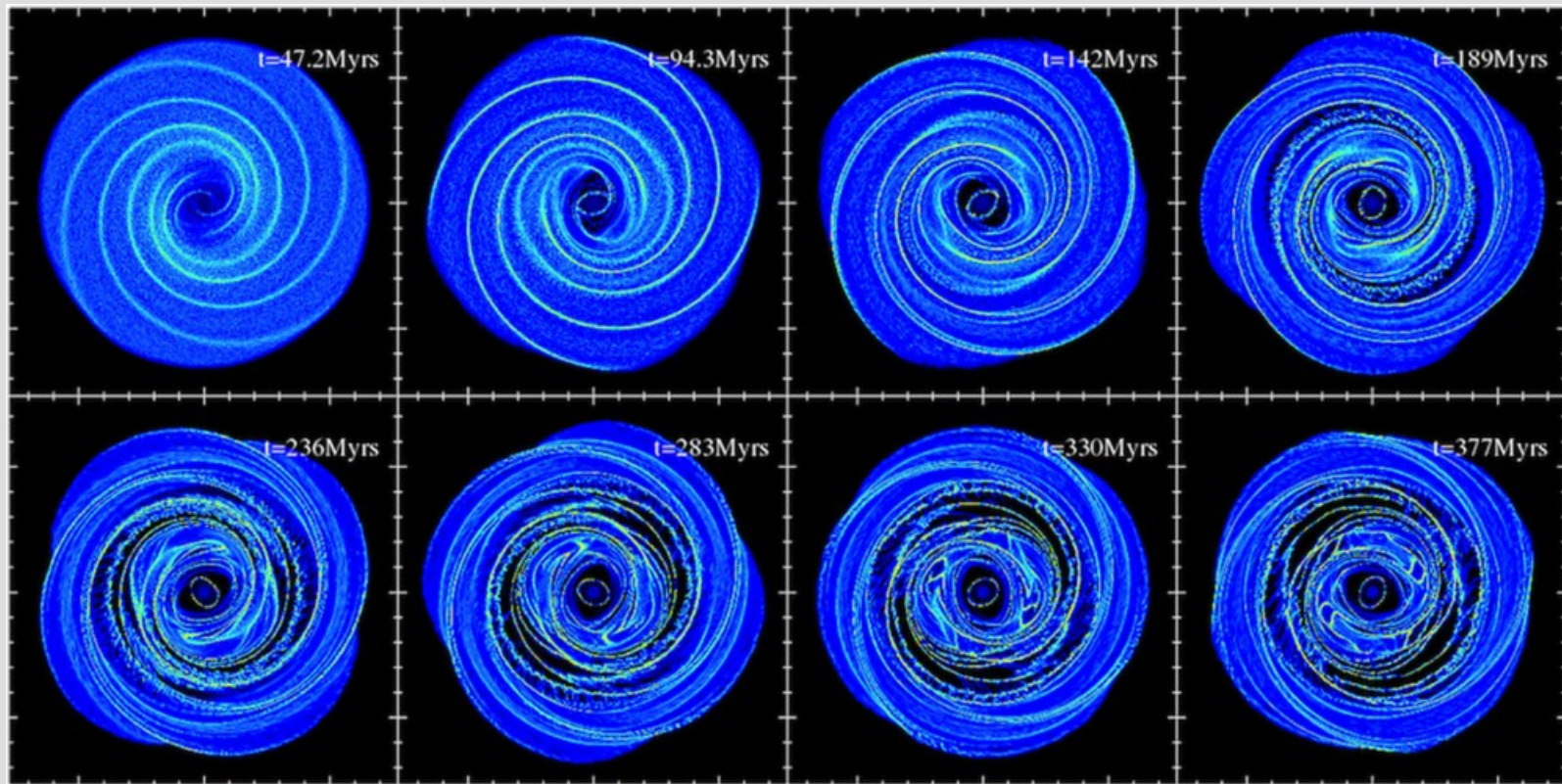
Эволюция $m=4$ спирального узора $\Omega_s = 20$ км/с/кпк, $i=15^\circ$



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

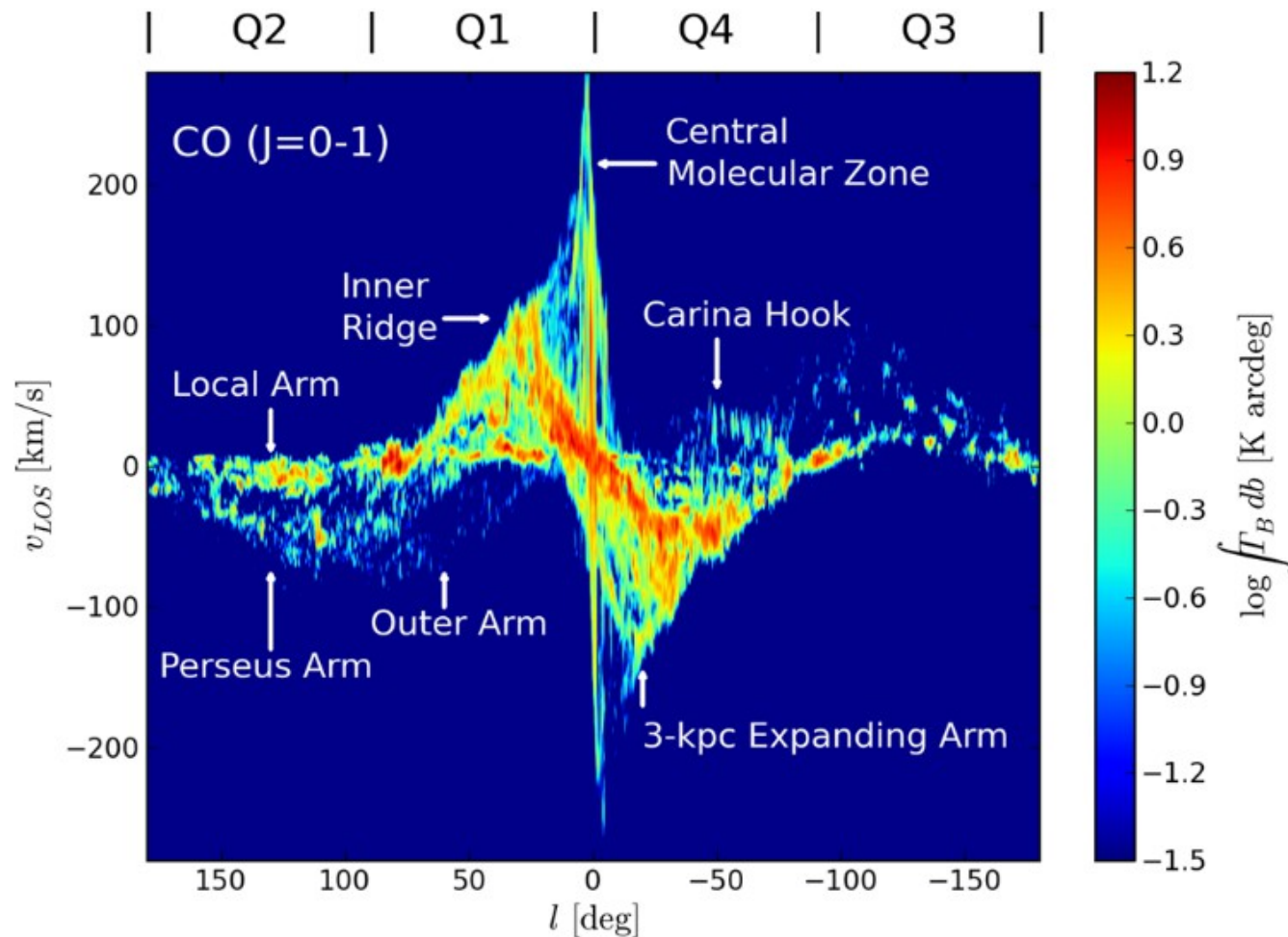


Bar model			
Best-fitting parameter	WK	WKR2	LM
Ω_b [km s ⁻¹ kpc ⁻¹]	50	60	70
V_{obs} [km s ⁻¹]	215	220	235
R_{obs} [kpc]	8.5	8.5	7.0
θ_b [°]	56	51	41
Arm model			
Best-fitting parameter	CGN2	CGN4	
Ω_{sp} [km s ⁻¹ kpc ⁻¹]	20	20	
V_{obs} [km s ⁻¹]	210	205	
R_{obs} [kpc]	8.0	8.5	
α [°]	12.5	10.0	
Mix model			
Best-fitting parameter	CGN2+WK	CGN4+WK	
Ω_b [km s ⁻¹ kpc ⁻¹]	50	60	
V_{obs} [km s ⁻¹]	220	215	
R_{obs} [kpc]	8.5	8.5	
α [°]	15	10	

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

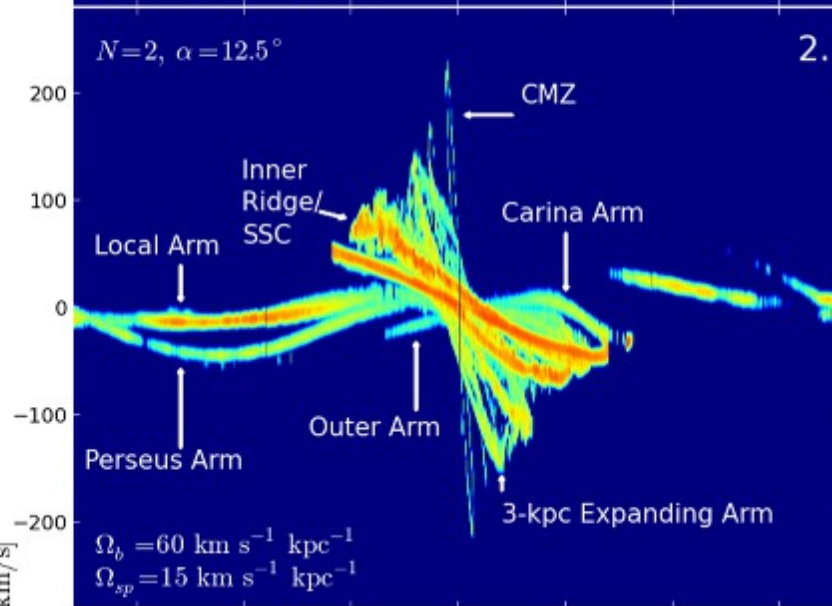
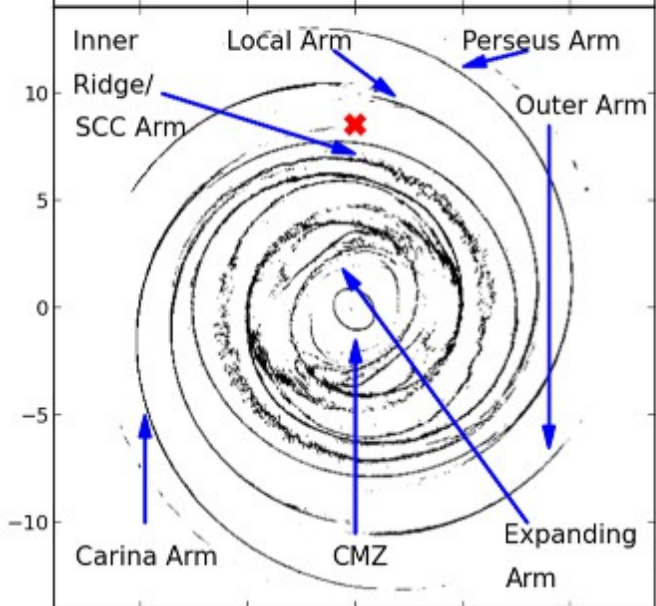
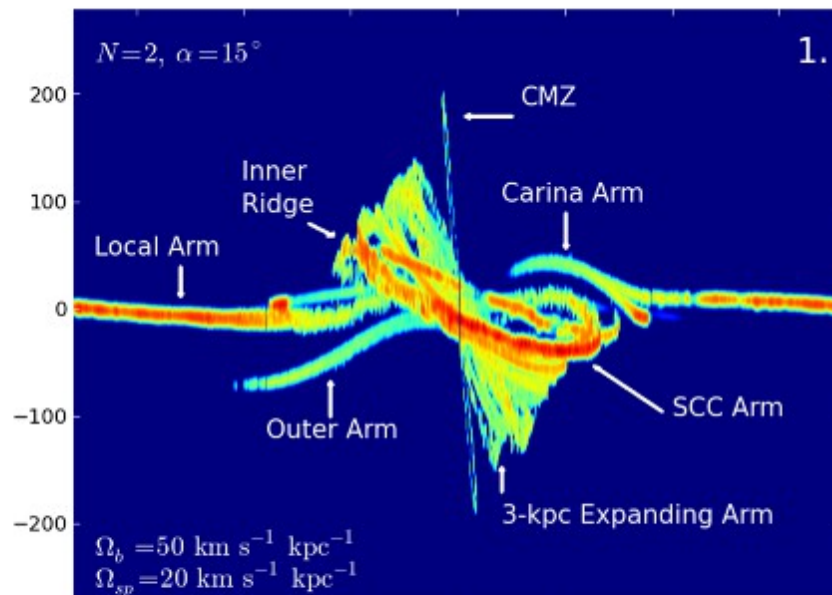
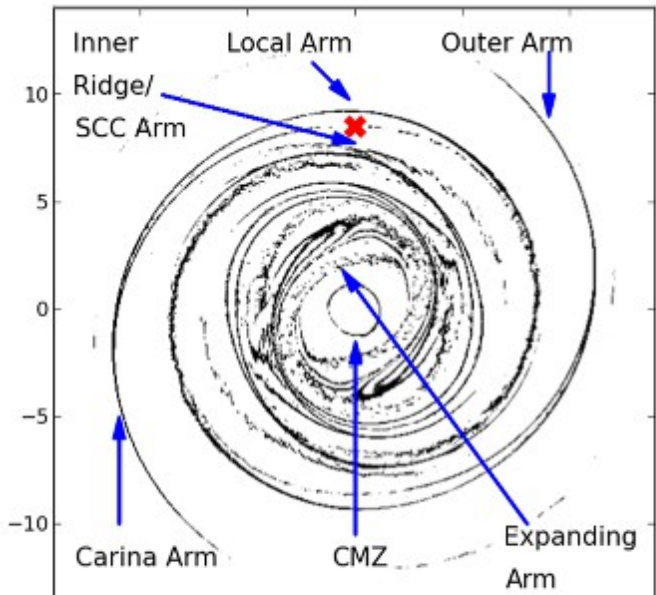
Longitude–velocity map of brightness temperature of the CO

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



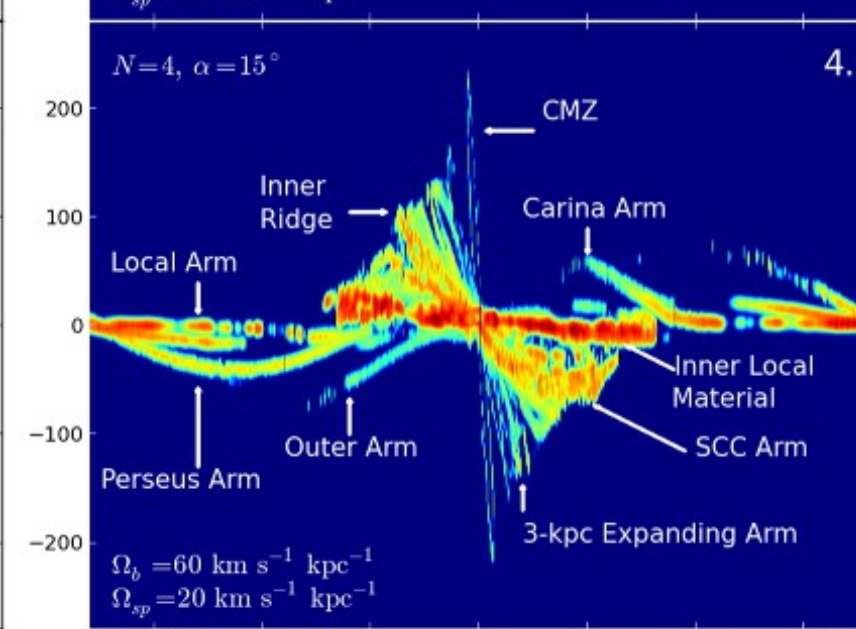
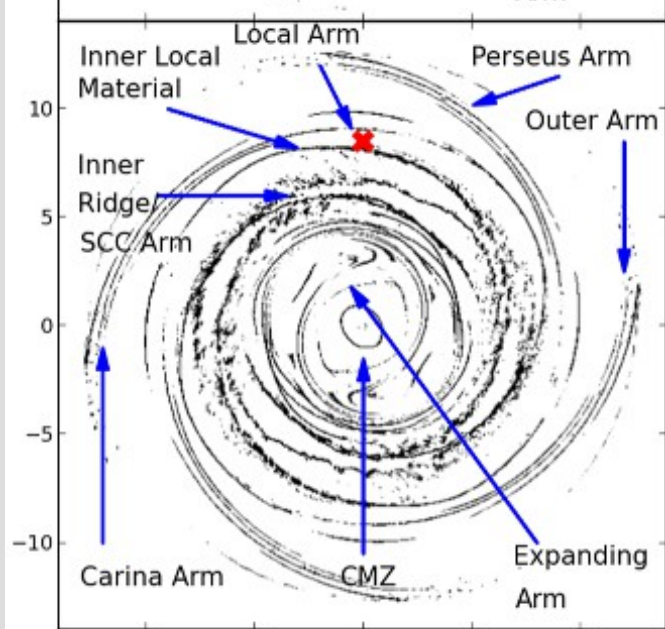
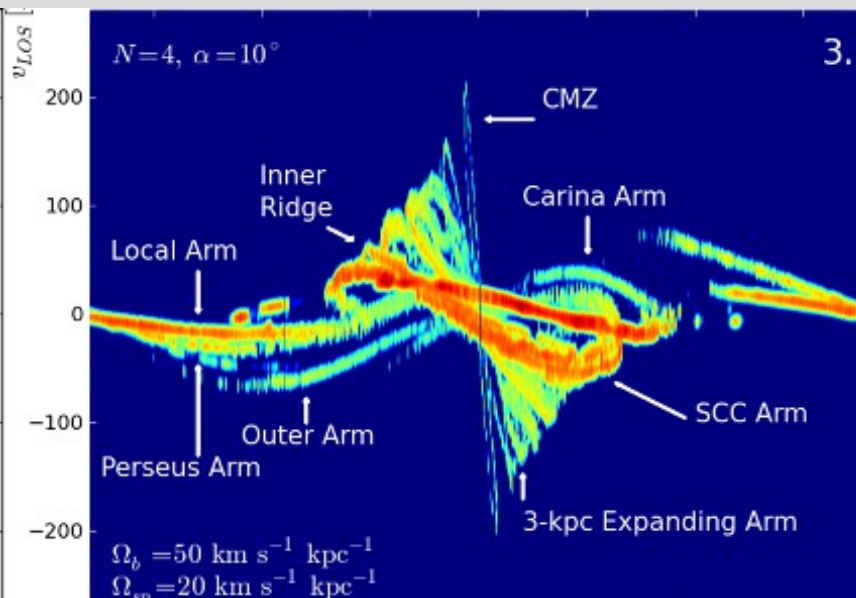
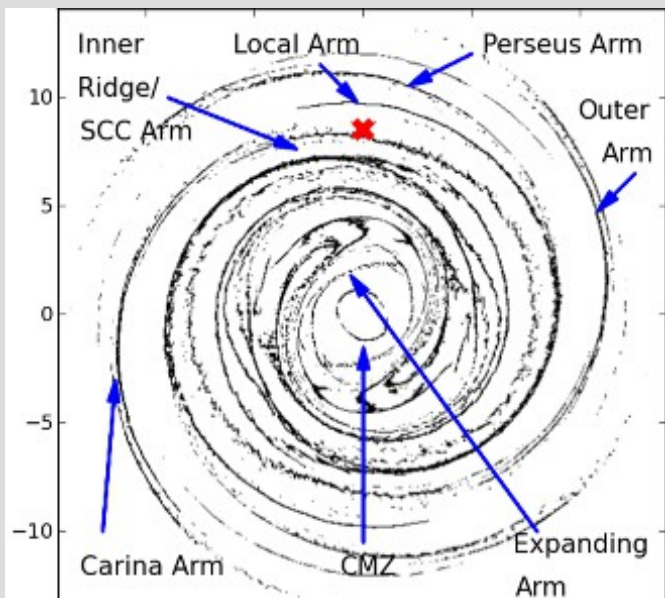
Наилучшие модели. Распределение газа

$m=2$



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

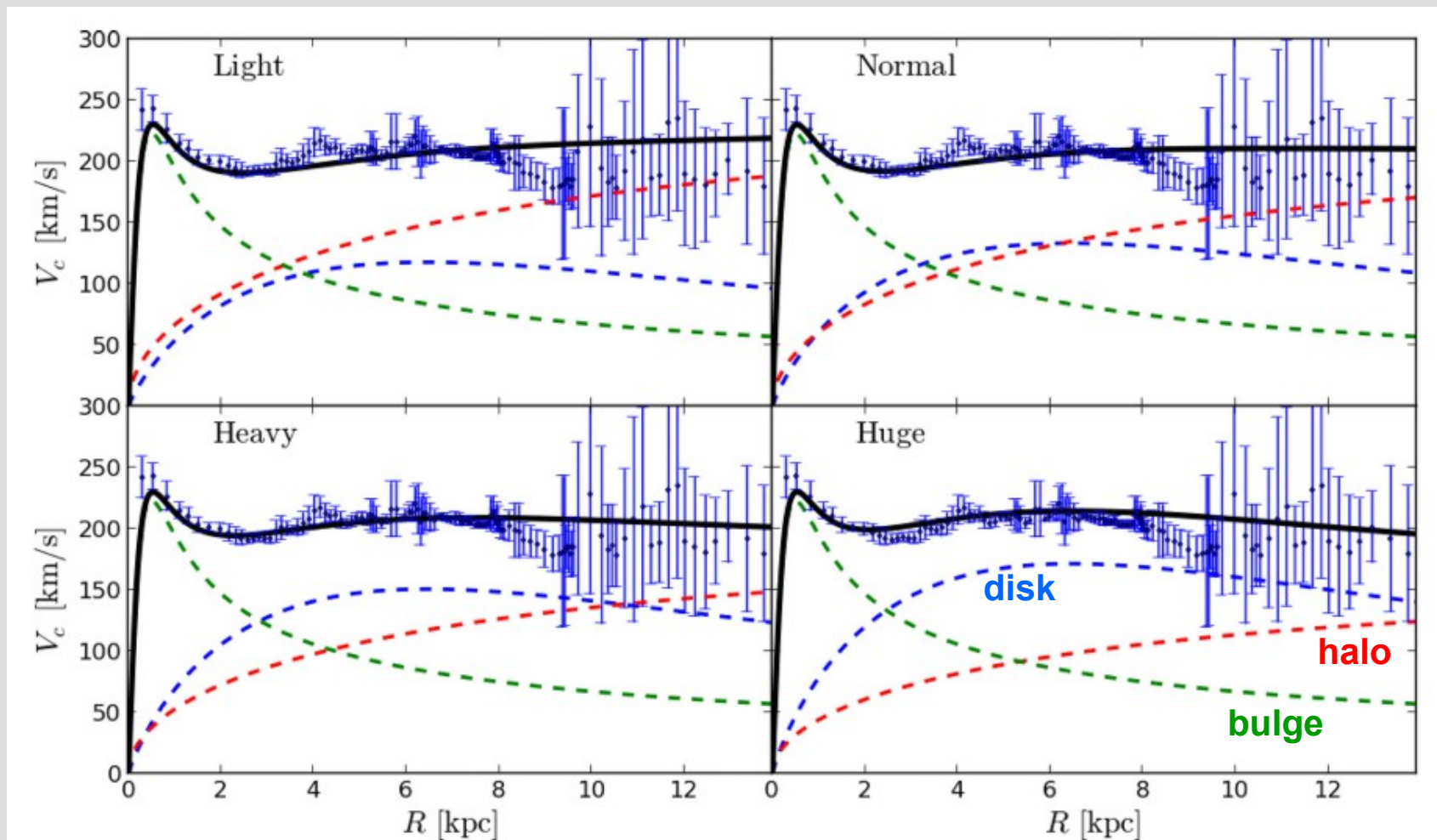
Авторы строят N-body модели Галактики. N-body частицы представляют диск и балдж. Спиральный узор имеет нестационарную (transient) природу. Модельные L-V диаграммы лучше согласуются с наблюдаемыми диаграммами (Дейм и др. 2001), чем в случае аналитически заданных потенциалов. Наилучшее согласие дают модели 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	Huge disk	44	1.05
Bb	4.1	Heavy disk	63	1.05
Bc	3.2	Normal disk	83	1.05
Bd	2.5	Light disk	101	1.05
Db	4.1		63	– No bulge
Dc	3.2		83	– No bulge
Hb	4.1		63 Live halo	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

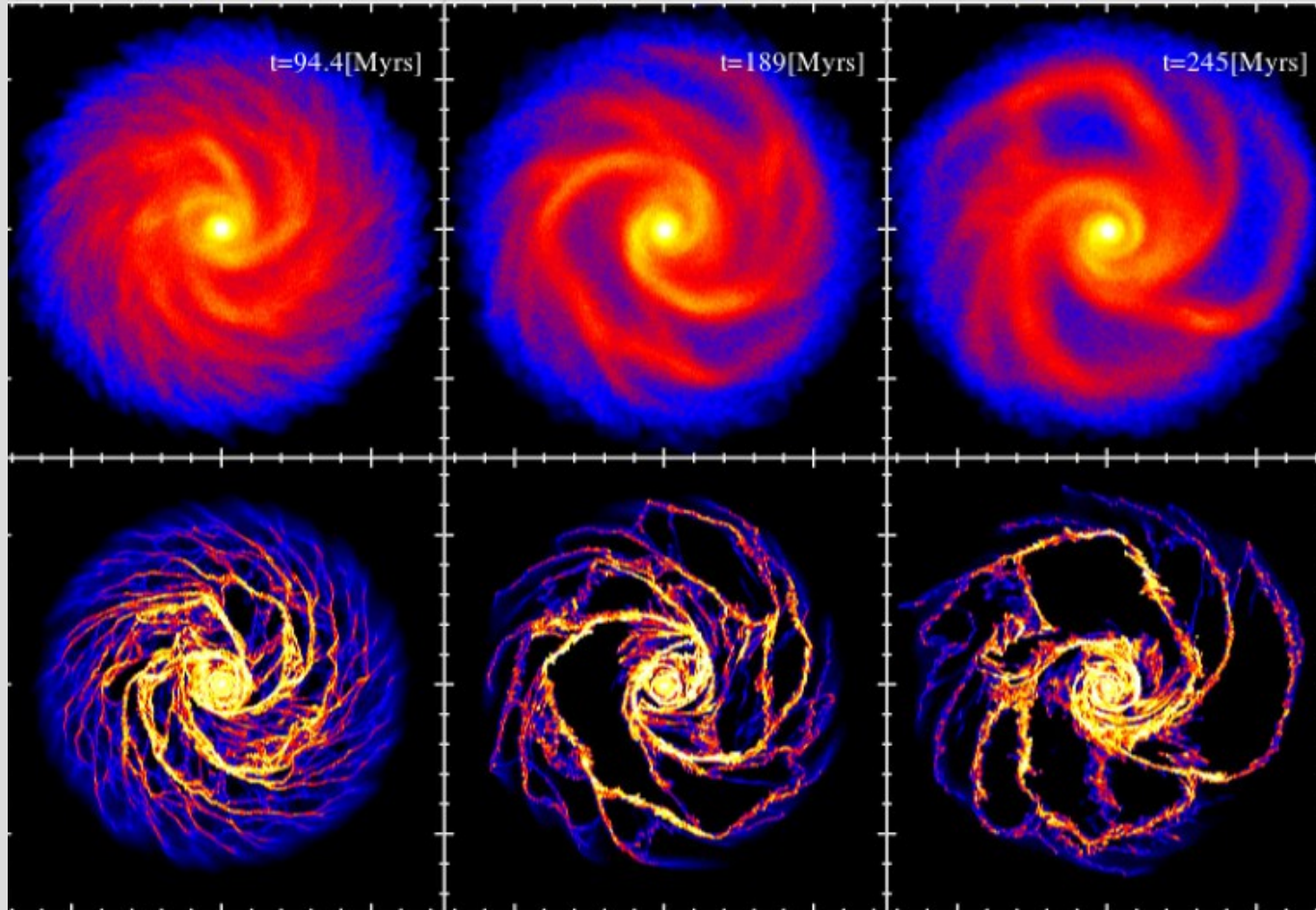
← Начальное Q
=1

Model Ba: Huge disk

T=94 Myr

T=189 Myr

T=245 Myr



← STARS

← GAS

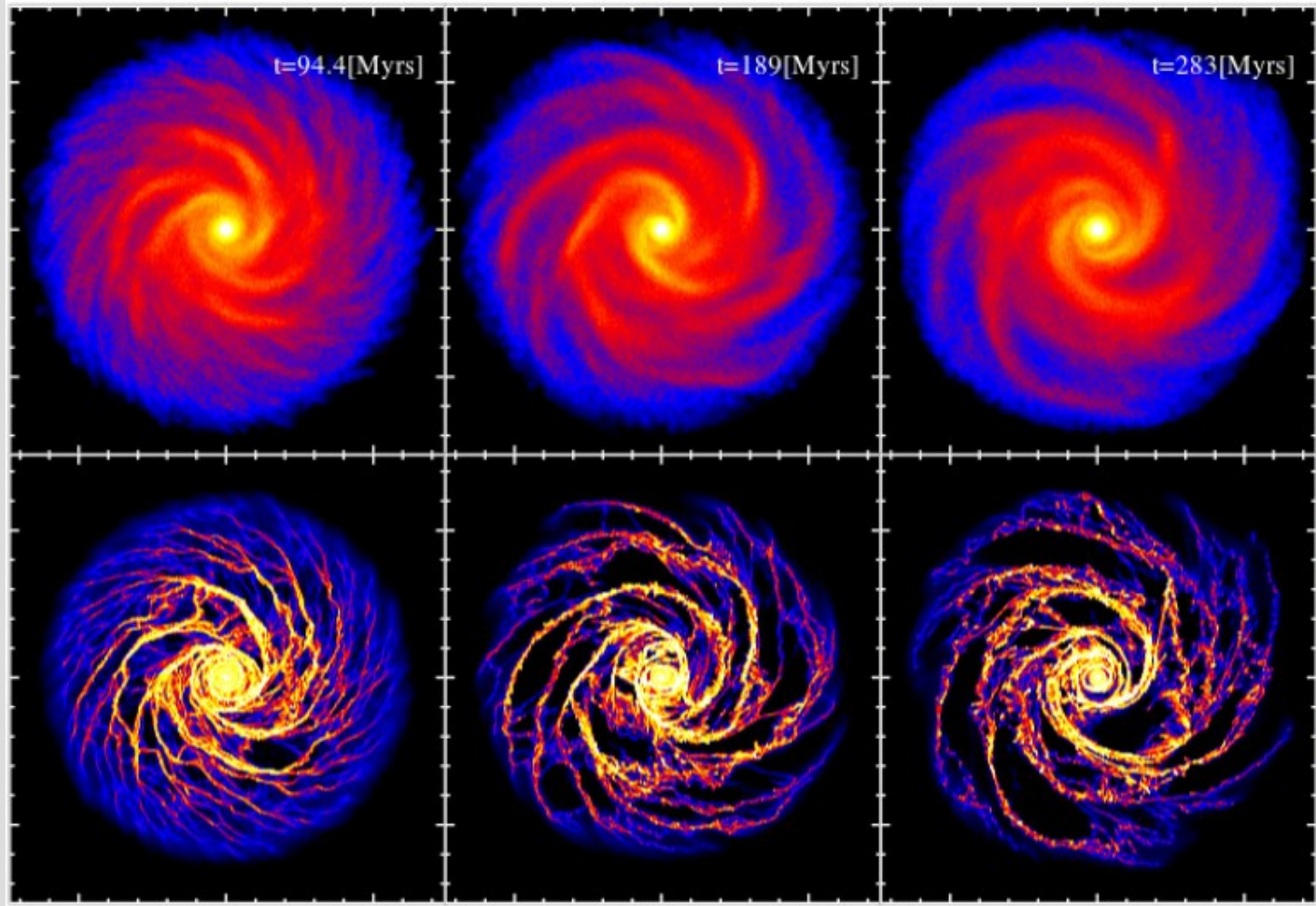
Фрейм – 15 x 15 кпк

Model Bb: Heavy disk

T=94 Myr

T=189 Myr

T=283 Myr



← STARS

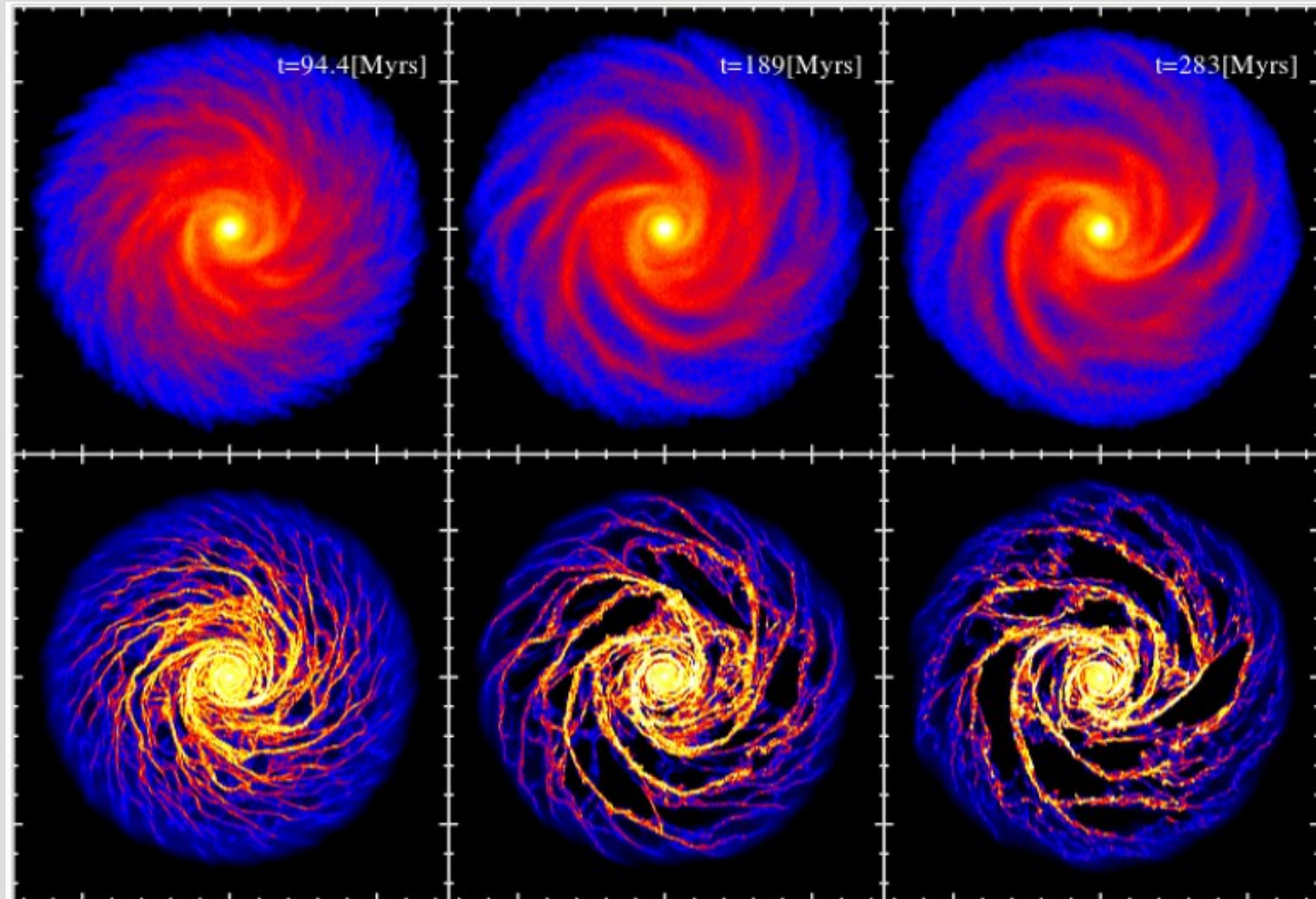
← GAS

Model Bc: Normal disk

T=94 Myr

T=189 Myr

T=283 Myr

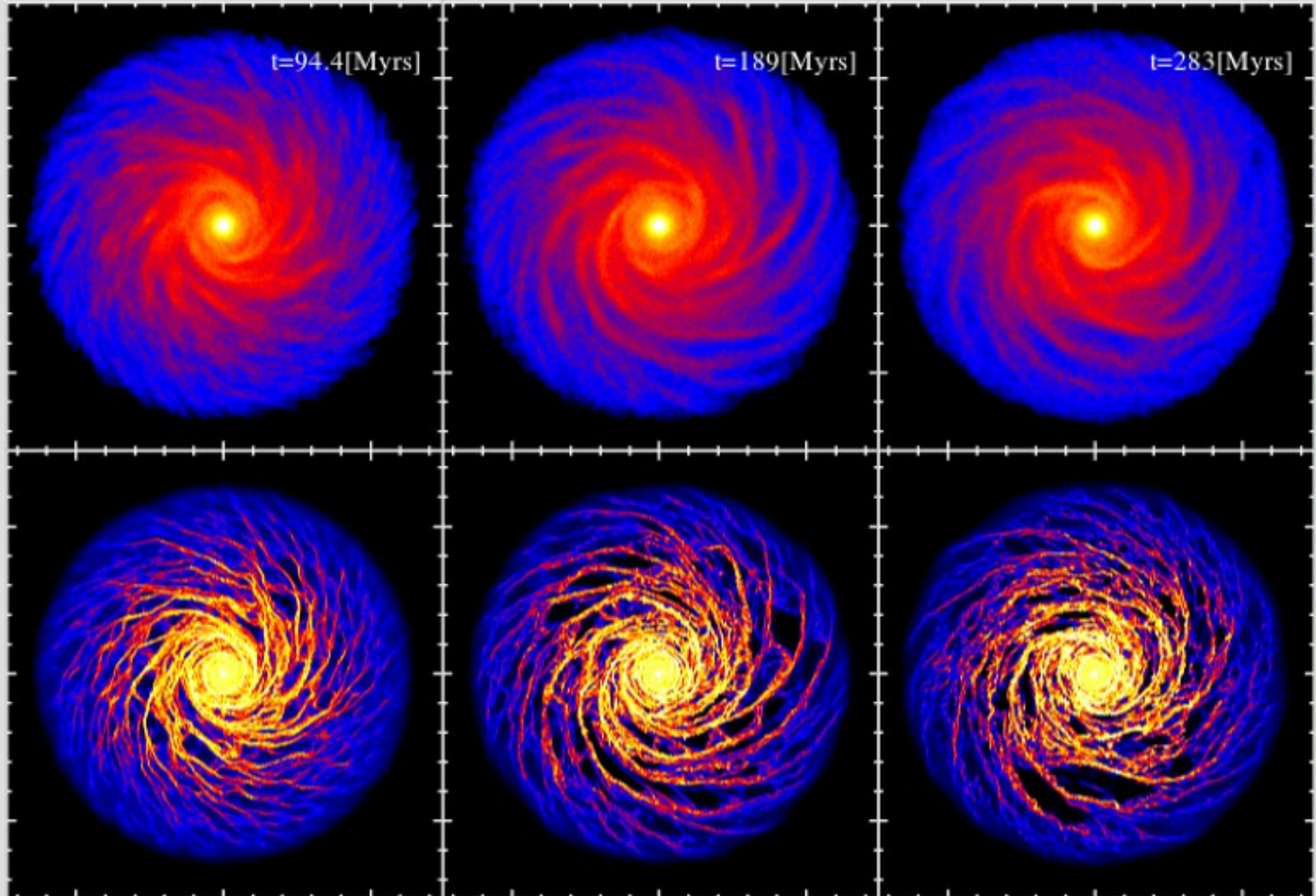


Model Bd: Light disk

T=94 Myr

T=189 Myr

T=283 Myr

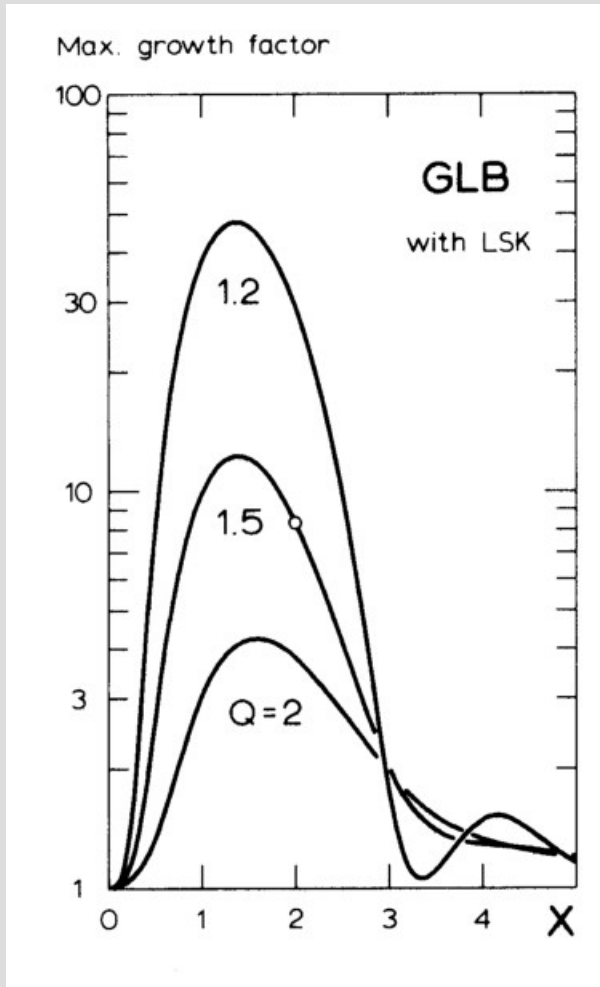


← STARS

← GAS

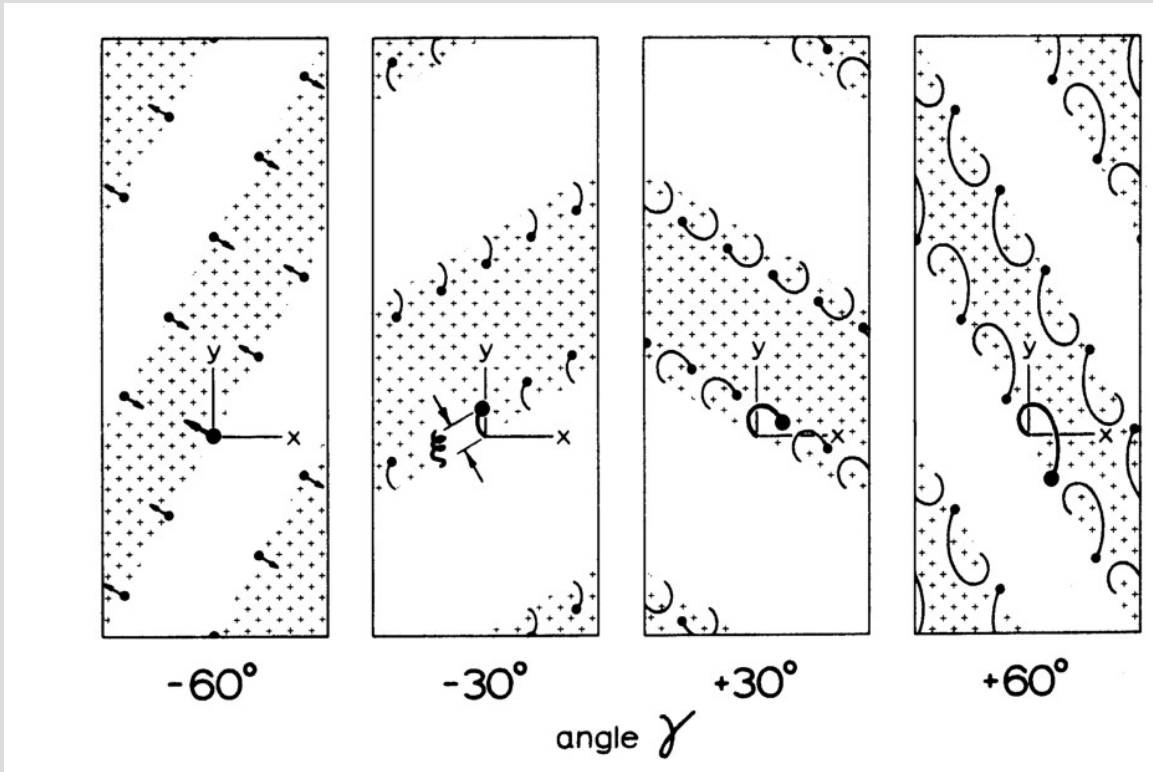
Swing amplification (Julian & Toomre 1969; Toomre 1981)

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 Σ_0

Предсказанное Тумре (1981) число спиральных рукавов

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

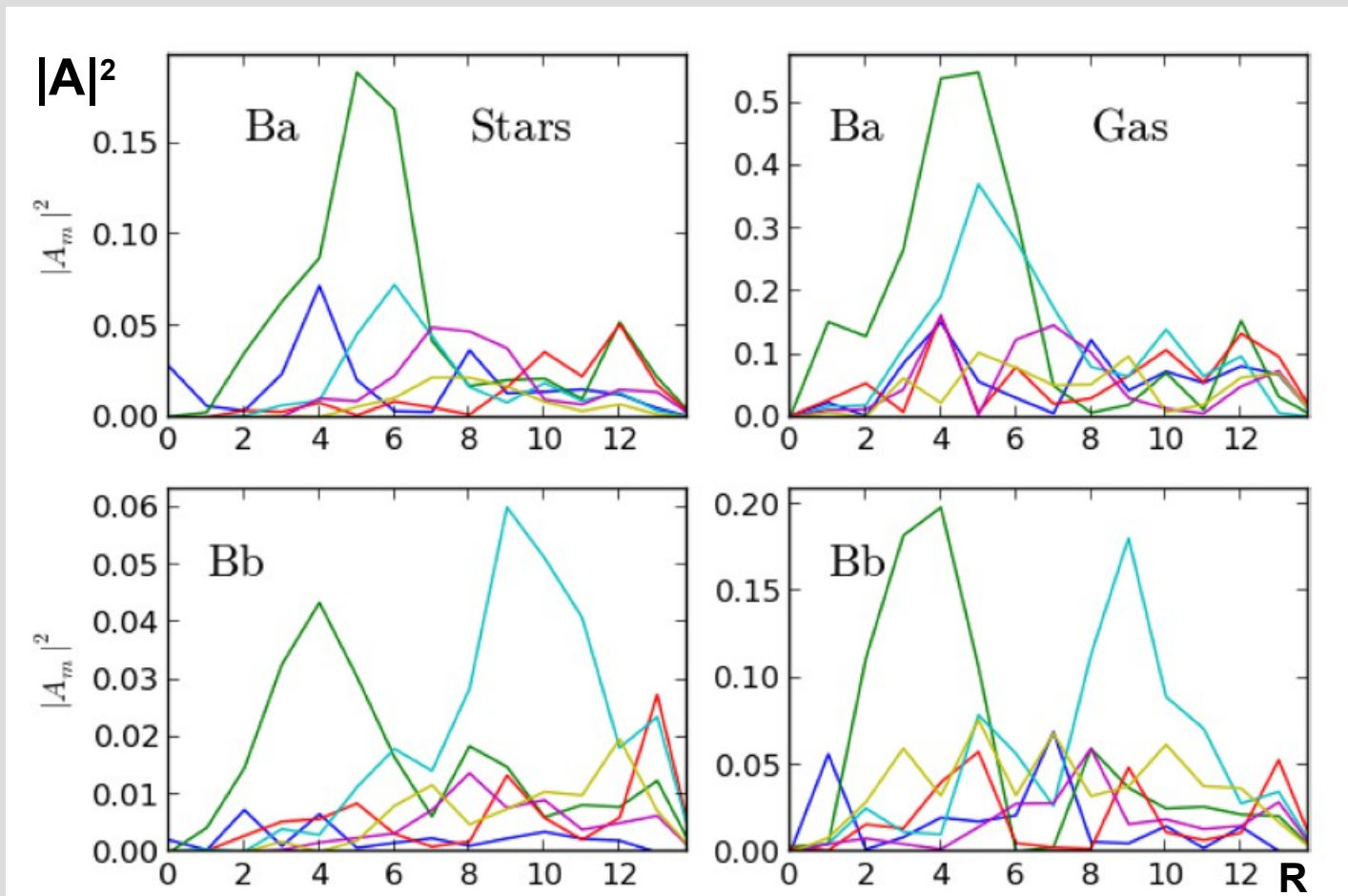
			m		
			R=5 кпс	R=7.5 кпс	R=10 кпс
Ba	Huge	5.3	2.0 (2)	2.8	4.0
Bb	Heavy	4.1	2.5	3.6	5.7 (4)
Bc	Normal	3.2	3.1	4.8 (4)	8.2
Bd	Light	2.5	4.0	6.5	11.5 (5)

m в доминирующей моде в N-body модели

в среднем согласуется с числом рукавов в модельных дисках

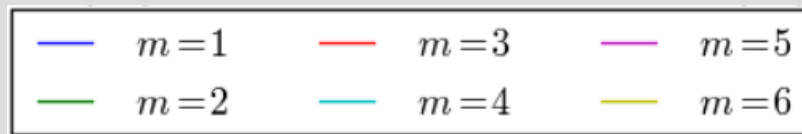
для доминирующих мод в области R=5—8 кпк

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

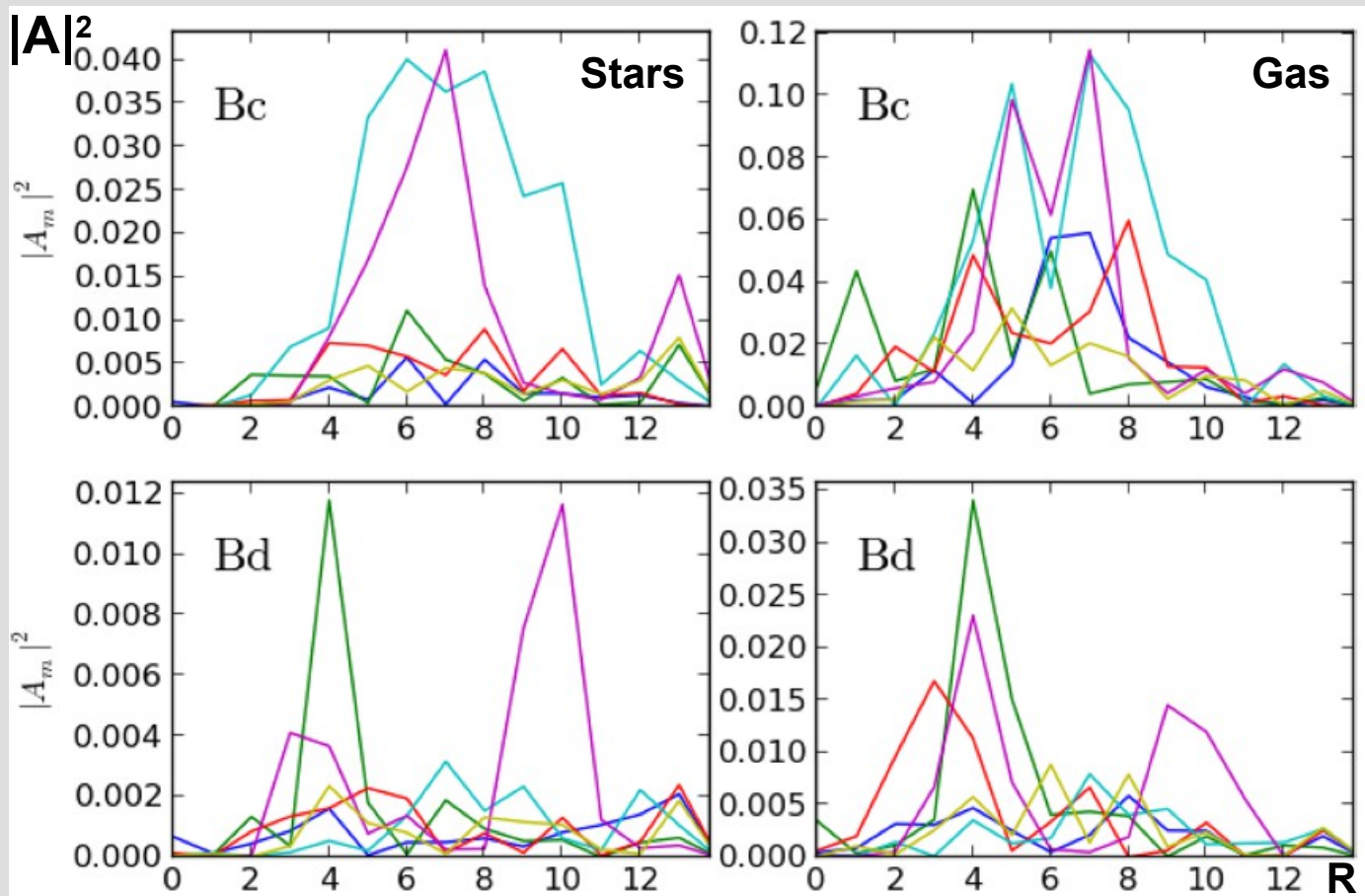


← Huge disk

← Heavy disk

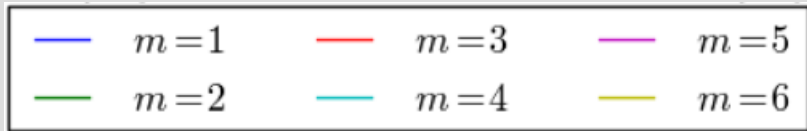


Амплитуда спиральных мод



← Normal disk

← Light disk



Угловая скорость вращения спирального узора Ω_p на разных расстояниях R и угол закрутки рукавов α в модельных дисках

Ω_p (R=5 kpc)		Ω_p (R=7.5 kpc)	Ω_p (R=10 kpc)	α [°]
Huge	38 km/s/kpc	44	33	19
Heavy	34	25	21	20
Normal	37	27	25	23
Light	39	35	28	22

Ω_p уменьшается с ростом R , что указывает на материальную природу рукавов.

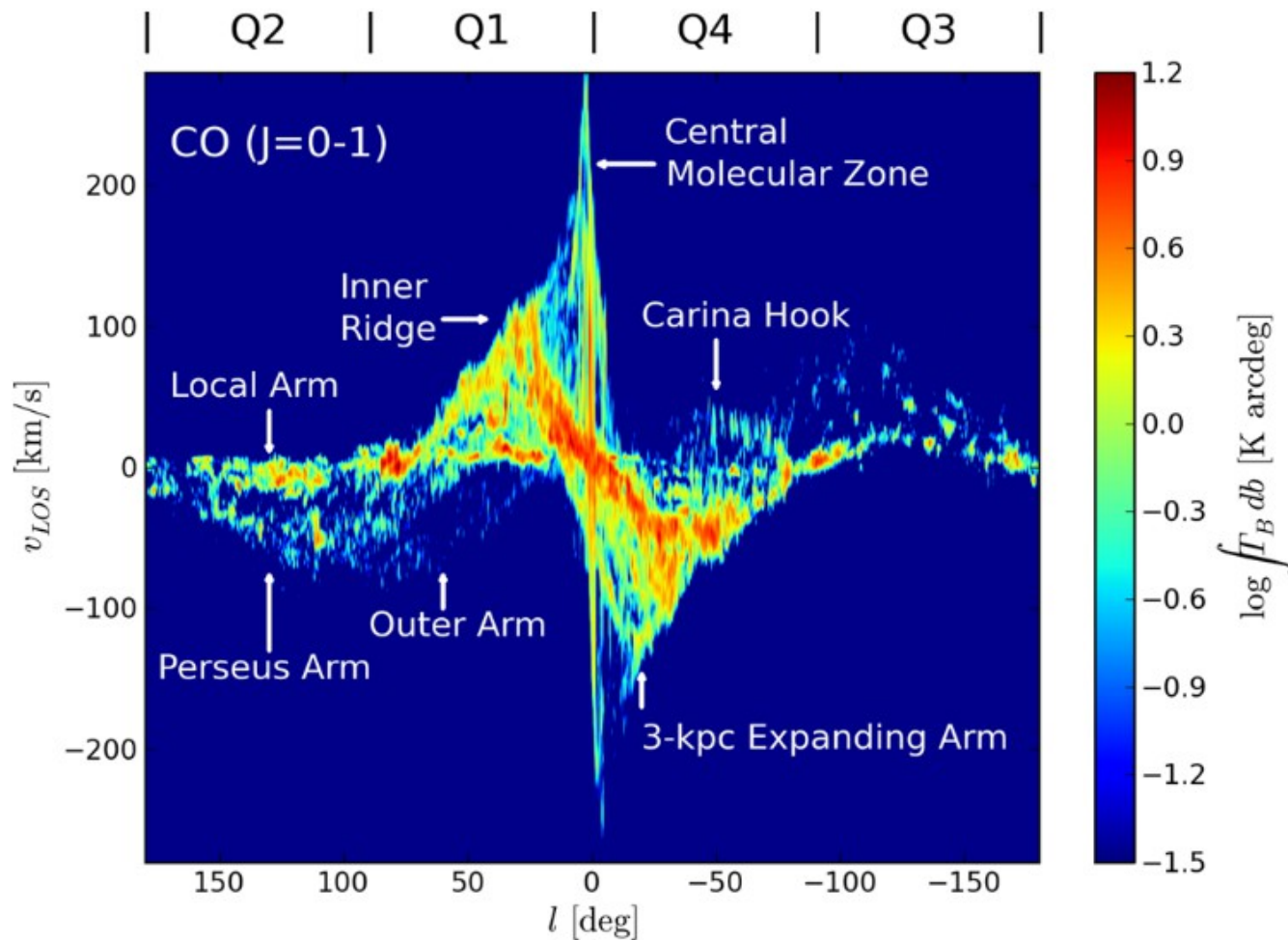
Угол закрутки рукавов α составляет в среднем $\alpha = 21^\circ$

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

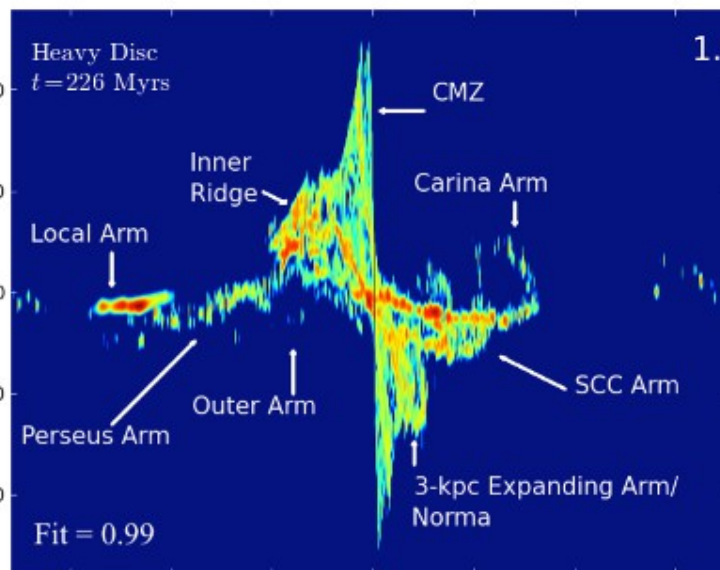
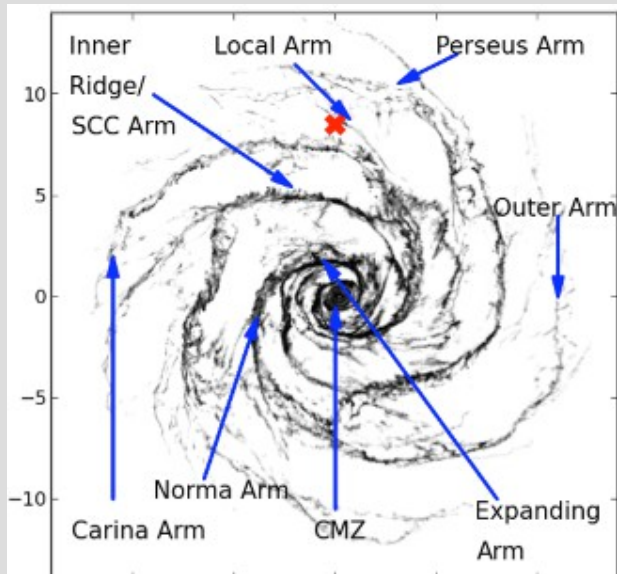
Model	t_{bf} (Myr)	R_{obs} (kpc)	V_{obs} (km s ⁻¹)	Fit stat.
Ba	197	8.5	215	0.994
Bb	226	8.5	200	0.857
Bc	207	7.0	200	0.833
Bd	207	7.0	205	<u>0.768</u>
Db	235	8.5	200	0.974
Dc	216	8.0	200	0.931
Hb	216	8.0	205	0.925

Longitude–velocity map of brightness temperature of the CO

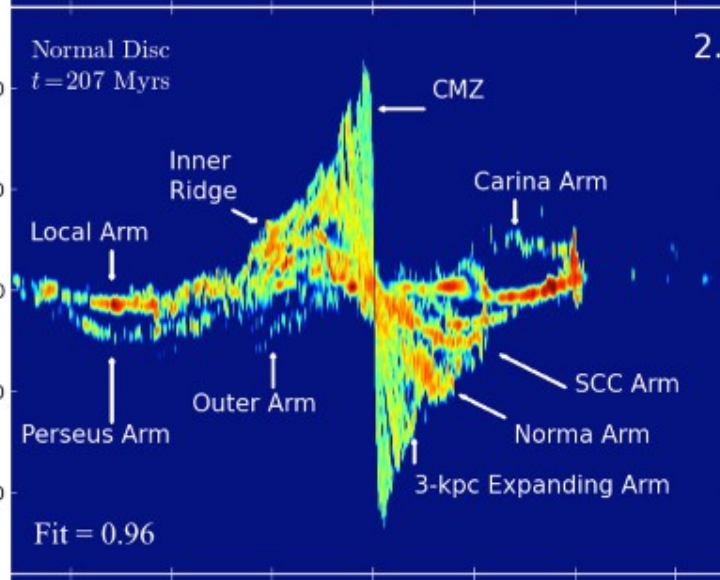
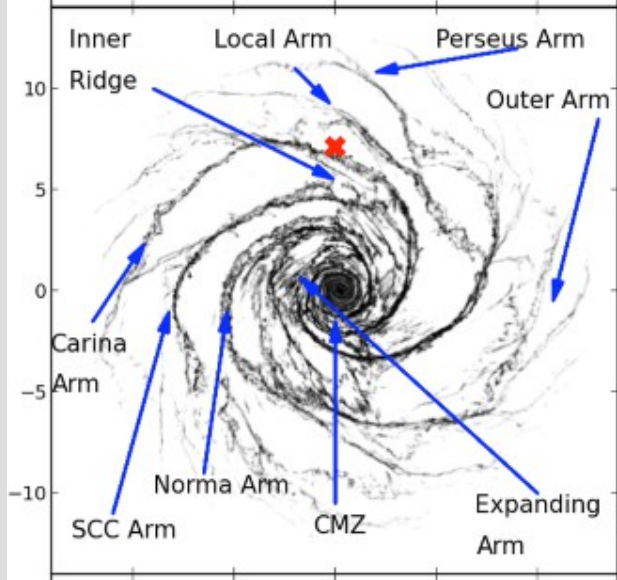
($J = 0-1$) transition (Dame, Hartmann & Thaddeus 2001)



Наилучшие N-body модели

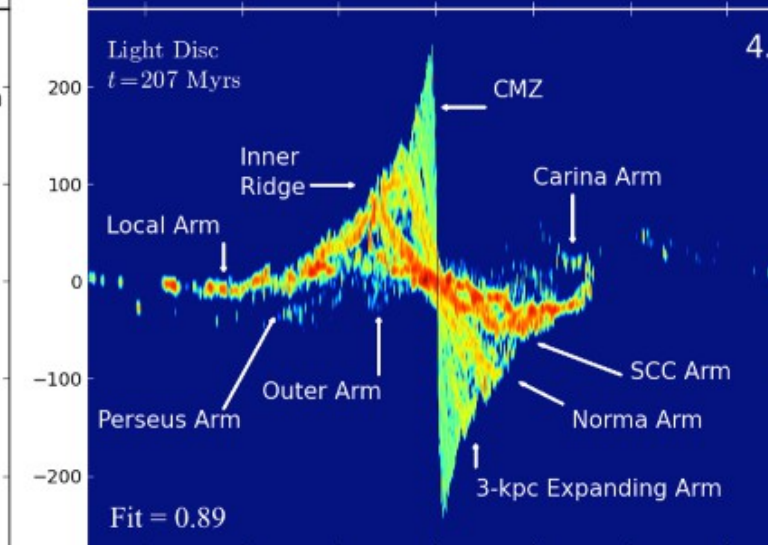
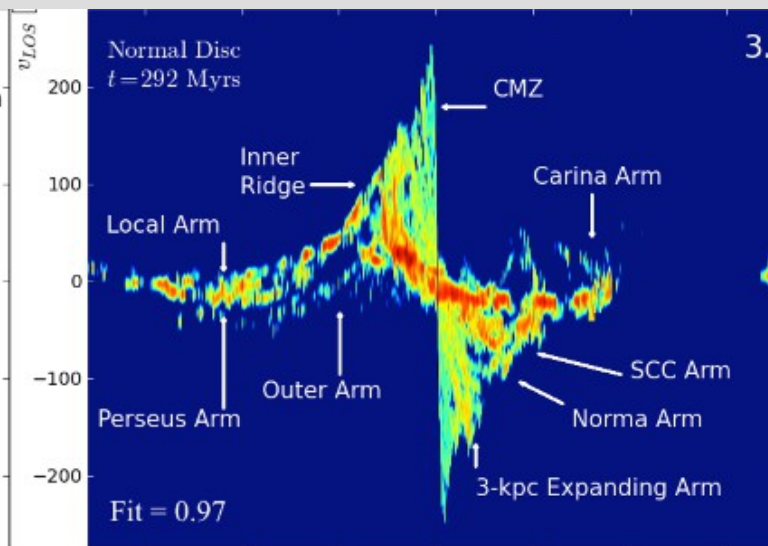
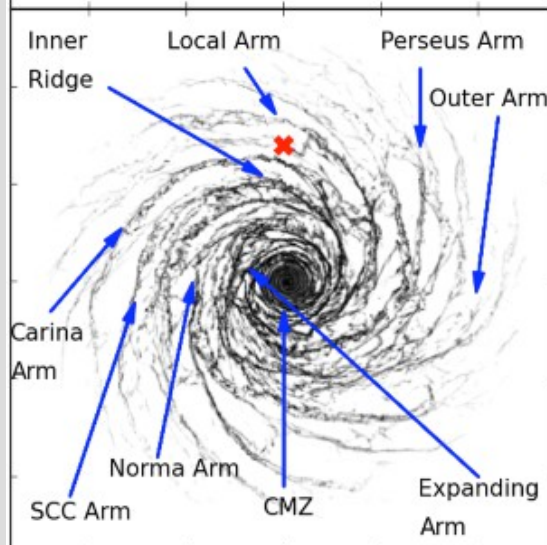
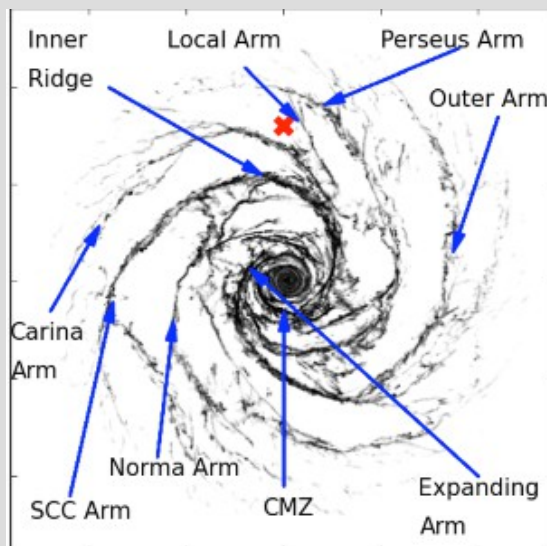


**Heavy
Disk
T=226 Myr
Fit=0.99**



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

Наилучшие N-body модели



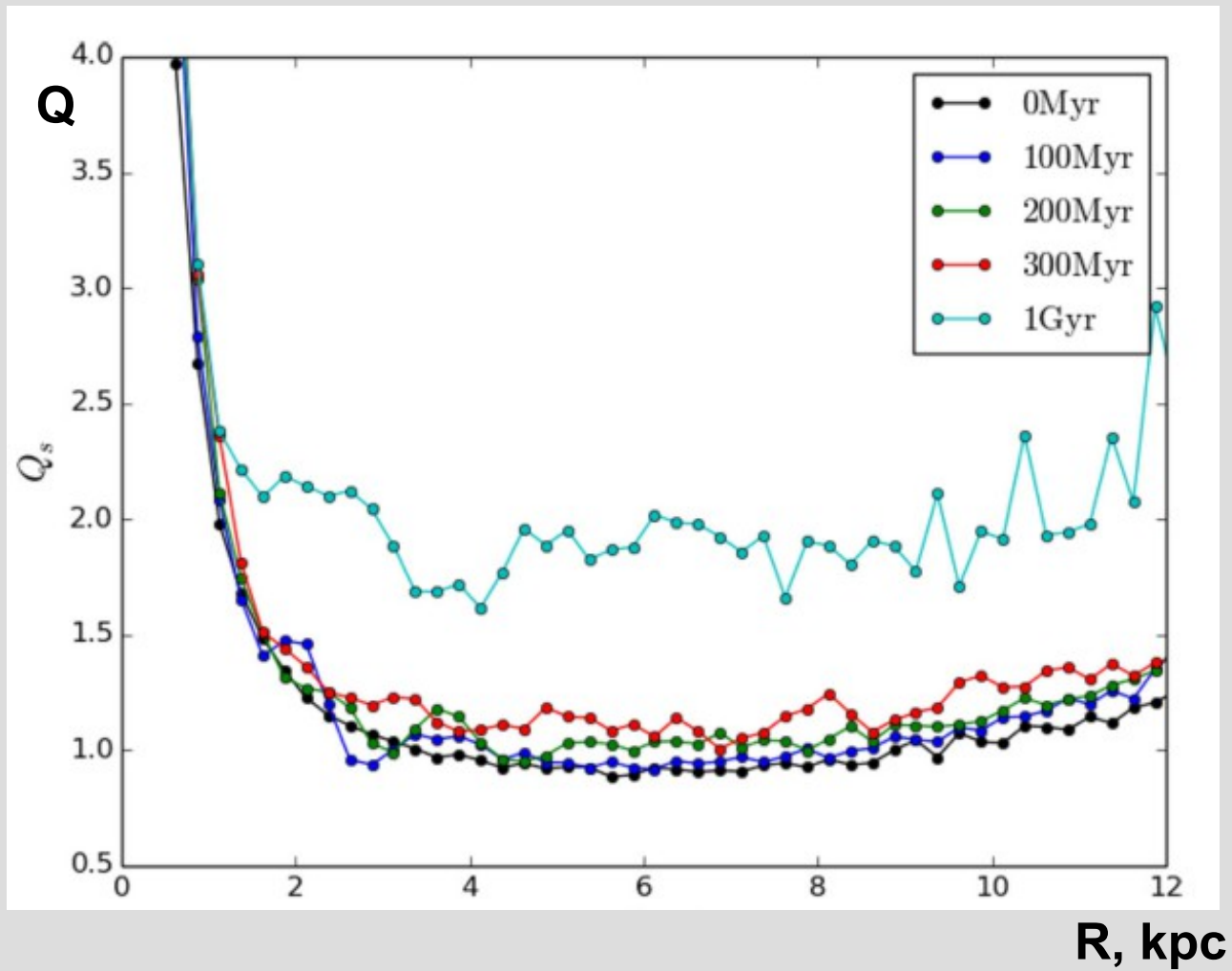
**Normal
Disk
T=292 Myr
Fit=0.97**

**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 Ω_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.**

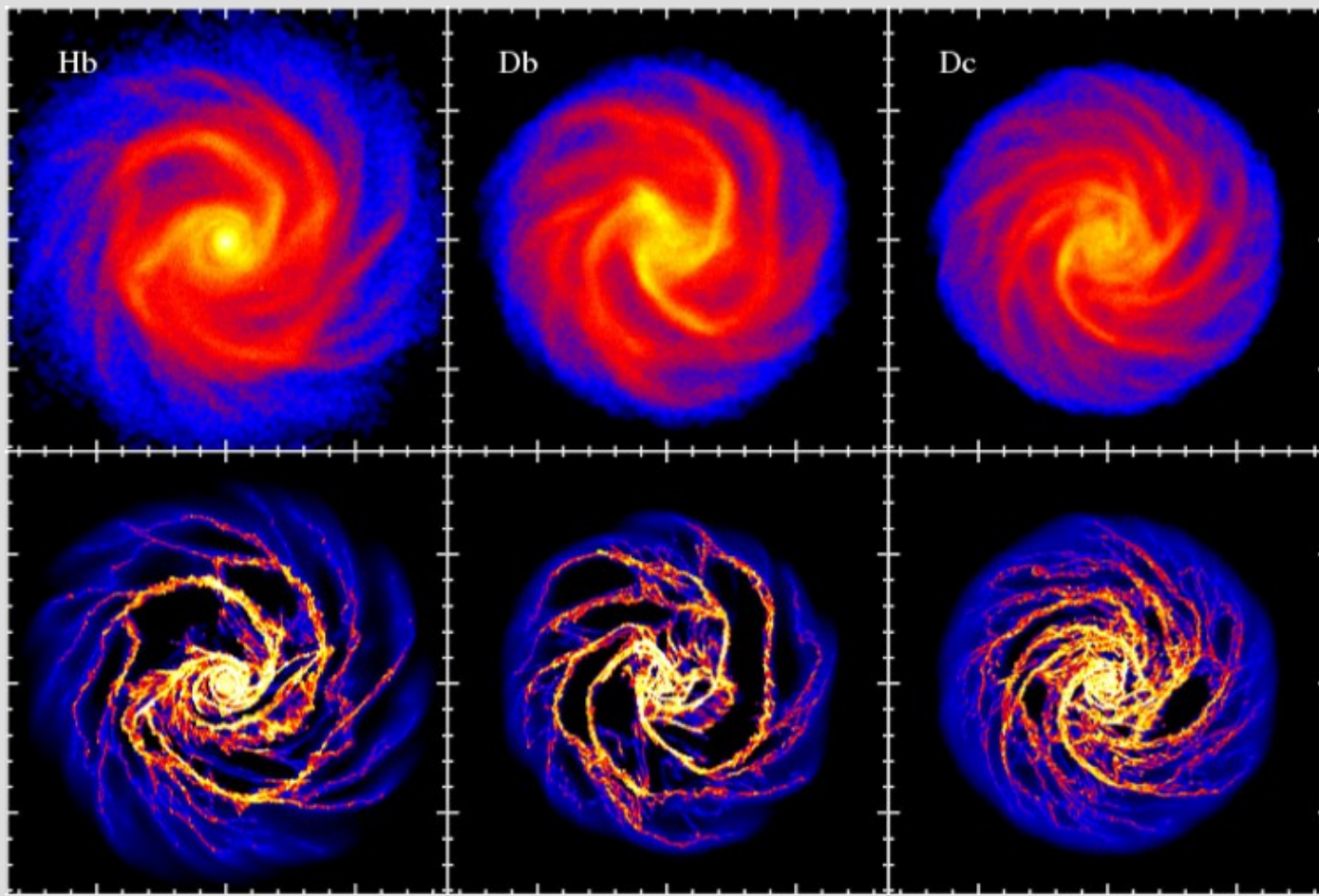
Эволюция параметра устойчивости Тумре Q звездного диска



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.