

Сегменты спиральных рукавов Галактики по классическим цефеидам: эффекты возрастной неоднородности

А. В. Веселова, И. И. Никифоров

Санкт-Петербургский государственный университет

«Современная звёздная астрономия — 2019»

7–11 октября 2019 г.

Предыдущие результаты

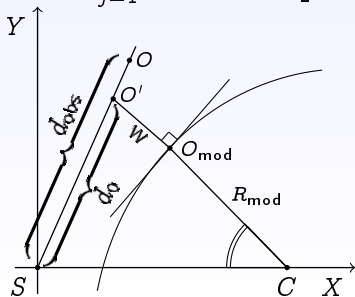
- Ранее был предложен и апробирован новый подход к определению расстояния до центра Галактики (R_0) по геометрии сегментов спиральных рукавов (Nikiforov, Veselova, 2015).
- В рамках метода наибольшего правдоподобия (МНП) был разработан алгоритм пространственного моделирования сегментов рукавов Галактики с учетом дисперсии поперек рукава и неопределенности гелиоцентрических расстояний. Алгоритм не требует жесткой привязки объекта к определенному сегменту.
- Применение алгоритма к 8 сегментам, выделенным по классическим цефеидам (каталог Mel'nik et al., 2015), дало оценку $R_0 = 7.71 \pm 0.28|_{\text{stat}} \pm 0.37|_{\text{cal}}$ кпк.

Метод наибольшего правдоподобия для отдельного сегмента

Модель отдельного сегмента спирального рукава:

$$R_{\text{mod}} = R_{\text{mod}}(\lambda, \vec{p}), \quad \vec{p} = (p_1, p_2, \dots, p_M).$$

$$L = \prod_{j=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_w} \exp\left[-\frac{w^2(d_{0,j}, \vec{p})}{2\sigma_w^2}\right] \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_d} \exp\left[-\frac{(d_{\text{obs},j} - d_{0,j})^2}{2\sigma_d^2}\right],$$



$$\begin{aligned} \mathcal{L} &= -\ln L = \\ &= N \ln(2\pi) + N \ln \sigma_d + N \ln \sigma_w + \\ &+ \sum_{j=1}^N \underbrace{\min_{d_{0,j}} \left[\frac{w^2(d_{0,j}, \vec{p})}{2\sigma_w^2} + \frac{(d_{\text{obs},j} - d_{0,j})^2}{2\sigma_d^2} \right]}_{s_j^2}, \quad (1) \\ \mathcal{L}(\vec{p}) &\longrightarrow \min. \end{aligned}$$

Определение границ доверительных интервалов

- Значения границ доверительного интервала параметра p_j для уровня $1 - \sigma$ удовлетворяют уравнению

$$\mathcal{L}_m(p_j) = \mathcal{L}_0 + \frac{1}{2}; \quad \mathcal{L}_0 = \min \mathcal{L}, \quad \mathcal{L}_m(p_j) = \min_{p_j = \text{const}} \mathcal{L}.$$

Здесь $\mathcal{L}_m(p_j)$ — профиль логарифмической функции правдоподобия для параметра p_j .

- Параболическое приближение для уровня $1 - \sigma$:

$$p_j^- = p_j^0 - \Delta p_j, \quad p_j^+ = p_j^0 + \Delta p_j;$$
$$\sigma^- = \frac{\Delta^2 p_j}{2(\mathcal{L}_m(p_j^-) - \mathcal{L}_0)}, \quad \sigma^+ = \frac{\Delta^2 p_j}{2(\mathcal{L}_m(p_j^+) - \mathcal{L}_0)}.$$

Доверительный интервал имеет вид $(p_j^0 - \sigma^-, p_j^0 + \sigma^+)$.

Предположения. I

- 1 Сегмент спирального рукава представляется участком логарифмической спирали

$$R_{\text{mod}}(\lambda; R_0, k, X_s) = |R_0 - X_s| e^{k\lambda}, \quad (2)$$

$\lambda \in (-\infty; +\infty)$ — поворотная галактоцентрическая долгота, отсчет λ — по часовой стрелке (в направлении вращения Галактики) от направления на Солнце ($\lambda_{\odot} = 0 \pm 2\pi n$, $n \in \mathbb{Z}$);

R_0 — расстояние от Солнца до полюса спирали;

$k = \text{tg } i$, где i — угол закрутки спирали;

X_s — абсцисса точки пересечения сегментом направления на центр Галактики,

$$X_s = R_0 - R_{\text{mod}}(\lambda = 0). \quad (3)$$

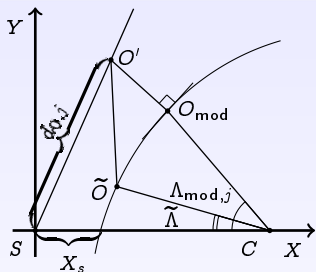
Предположения. II

- 2 Объекты, трассирующие спиральную ветвь, принадлежат одному ее витку:

$$\max_{j_1, j_2} |\lambda_{j_1} - \lambda_{j_2}| < 2\pi, \quad j_1, j_2 = 1, \dots, N. \quad (4)$$

- 3 Полуспираль S находится на прямой, задаваемой направлением от Солнца на центр Галактики, которое предполагается известным.

Расстояние от точки до спирали



$$O'(X_{0,j}, Y_{0,j}), \tilde{O}(X(\tilde{\Lambda}), Y(\tilde{\Lambda})).$$

$$X(\tilde{\Lambda}) = R_0 - |R_0 - X_s| e^{k\tilde{\Lambda}} \cos \tilde{\Lambda},$$

$$Y(\tilde{\Lambda}) = |R_0 - X_s| e^{k\tilde{\Lambda}} \sin \tilde{\Lambda}.$$

$$|O'\tilde{O}| = \sqrt{(X(\tilde{\Lambda}) - X_{0,j})^2 + (Y(\tilde{\Lambda}) - Y_{0,j})^2}.$$

$$\Lambda_{\text{mod},j} : |O'\tilde{O}| = \min. \quad (5)$$

$$(X_{0,j} - R_0) (\sin \Lambda_{\text{mod},j} - k \cos \Lambda_{\text{mod},j}) - k |R_0 - X_s| e^{k\Lambda_{\text{mod},j}} + \quad (6)$$

$$+ Y_{0,j} (k \sin \Lambda_{\text{mod},j} + \cos \Lambda_{\text{mod},j}) = 0.$$

Совместное определение параметров для нескольких сегментов. Общий случай

$$\mathcal{L} = N \ln(2\pi) + N \ln \sigma_d + \sum_{a=1}^{N_{\text{segm}}} N_a \ln \sigma_{w,a} +$$

$$+ \sum_{a=1}^{N_{\text{segm}}} \sum_{j=1}^{N_a} \min_{d_{0,j}} \left[\frac{w^2(d_{0,j}; R_0, i_a, X_{s,a})}{2\sigma_{w,a}^2} + \frac{(d_{\text{obs},j} - d_{0,j})^2}{2\sigma_d^2} \right]. \quad (7)$$

Неизвестные параметры (в общем случае $M = 3 \cdot N_{\text{segm}} + 1$)

	i_{segm_1}	X_{s, segm_1}	$\sigma_{w, \text{segm}_1}$
	i_{segm_2}	X_{s, segm_2}	$\sigma_{w, \text{segm}_2}$
R_0	i_{segm_3}	X_{s, segm_3}	$\sigma_{w, \text{segm}_3}$
	i_{segm_4}	X_{s, segm_4}	$\sigma_{w, \text{segm}_4}$

Общая схема алгоритма

- 1 Первичное разделение объектов на сегменты в соответствии с минимумами функции распределения значений X_s ; выделение выборки базовых объектов сегментов, не зависящей от предположений о R_0 .
- 2 Оптимизация параметров для выборки базовых объектов, приписывание сегментам остальных объектов выборки.
- 3 Итеративное переприписывание объектов конкретным сегментам на основе разделения выборки на базовую и спорную части, оптимизация параметров для финального разделения объектов на сегменты.
- 4 Коррекция дисперсий поперек рукава (σ_w) методом Монте-Карло.
- 5 Оптимизация параметров сегментов при постоянных скорректированных значениях σ_w .

Данные о цефеидах, модель с 8 сегментами

Berdnikov, Dambis & Vozyakova (2014): 674 классические цефеиды.

Бердников и др. (1996, 2000): $d_{\text{БМО}} = 18.25 \pm 0.05$.

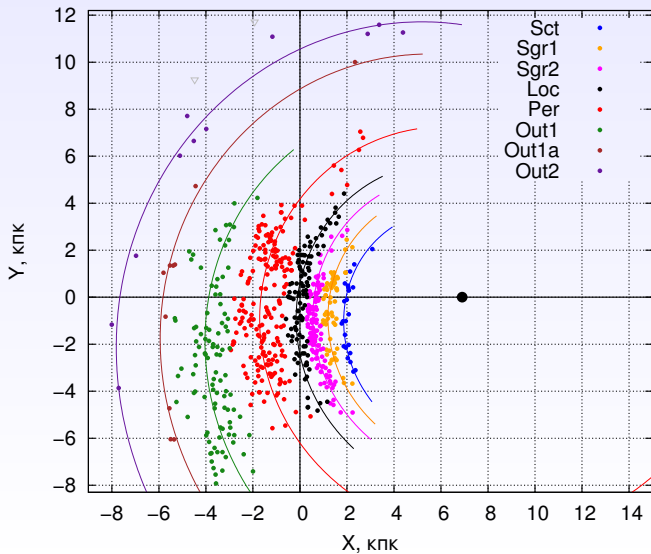
Веселова, Никифоров (2018): по данным о 636 цефеидах выделены 8 сегментов, $R_0 = 6.90 \pm 0.25$ кпк.

de Grijs et al. (2014): $d_{\text{БМО}} = 18.49 \pm 0.09$.

$$\frac{r + \Delta r}{r} = 10^{0.2\Delta d} = 1.117_{-0.050}^{+0.053}.$$

$$R_0 = 6.90 \pm 0.25 \text{ кпк} \longrightarrow R_0 = 7.71 \pm 0.28 \Big|_{\text{stat}} \pm 0.37 \Big|_{\text{cal}} \text{ кпк.}$$

Итоговое решение для модели с 8 сегментами



Деление выборки цефеид на две группы

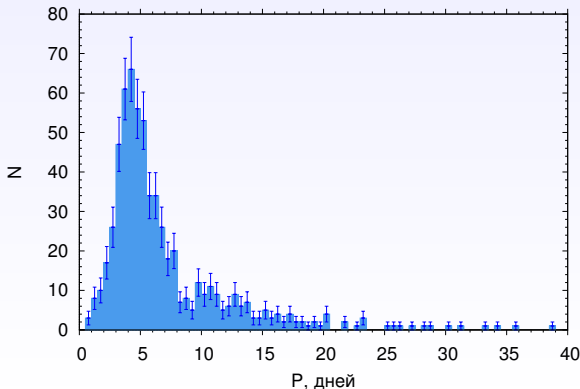
$P = 9^d$ — минимум на гистограмме для распределения периодов пульсации цефеид.

$\lg T = 8.50 - 0.65 \lg P \approx 7.6 \cdot 10^7$ лет (Ефремов, 2003);

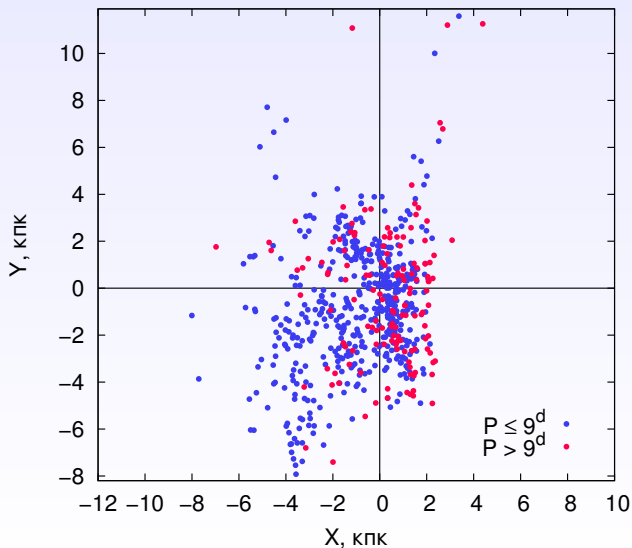
$\lg T = 8.60 - 0.77 \lg P \approx 7.3 \cdot 10^7$ лет (Joshi & Joshi, 2014).

«Молодые
цефеиды»: $P > 9^d$,
140 объектов.

«Старые цефеиды»:
 $P \leq 9^d$, 494 объекта.



Деление выборки цефеид на две группы



Решение для групп по отдельности

Алгоритм:

выделение базовой выборки цефеид (127 и 481 объектов)
→ приписывание спорных объектов (13 и 13 цефеид) →
переприписывание.

- $P > 9^d$: $R_0 = 7.15 \pm 0.24$ кпк.
Отсутствует сегмент Внешний-1а, всего 7 сегментов.
- $P \leq 9^d$: $R_0 = 7.33 \pm 0.29$ кпк.
8 сегментов.

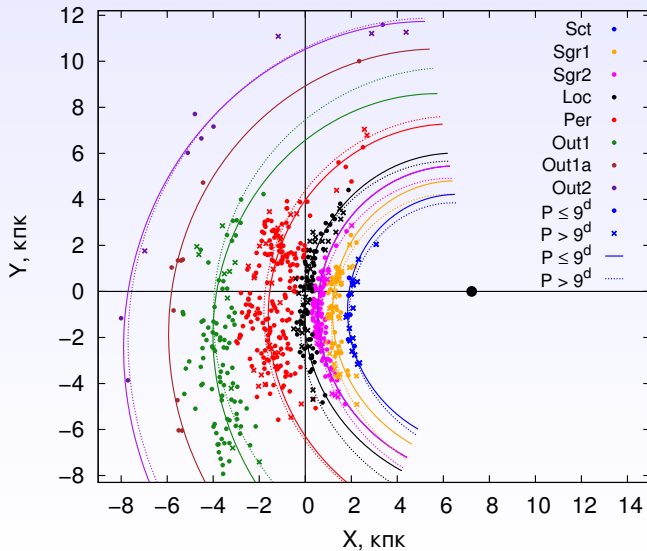
Совместное решение для двух систем

15 сегментов, 41 параметр.

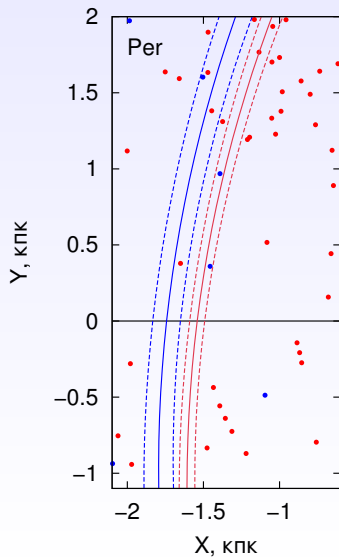
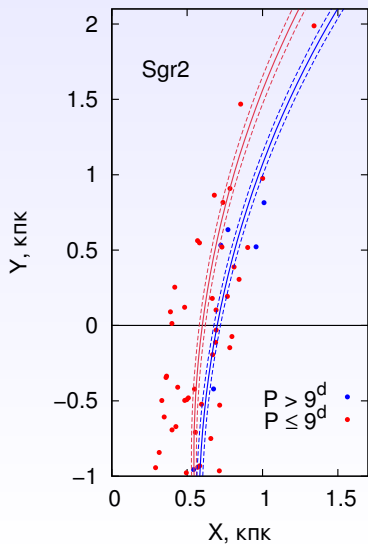
$$R_0 = 7.23_{-0.18}^{+0.19} \text{ кпк.}$$

Рукав	N_o	N_y	Δi_{o-y}	$\Delta X_{s, o-y}$, кпк
Sct	6	17	$2^\circ 8 \pm 2^\circ 3$	-0.11 ± 0.07
Sgr1	44	27	$4^\circ 8 \pm 1^\circ 6$	-0.05 ± 0.06
Sgr2	94	21	$3^\circ 5 \pm 0^\circ 9$	-0.099 ± 0.030
Loc	66	28	$2^\circ 9 \pm 1^\circ 3$	$+0.113 \pm 0.053$
Per	178	33	$-0^\circ 8 \pm 2^\circ 0$	$+0.20 \pm 0.10$
Out1	89	10	$-4^\circ 5 \pm 3^\circ 0$	$+0.09 \pm 0.18$
Out2	7	4	$-0^\circ 9 \pm 3^\circ 3$	-0.16 ± 0.60

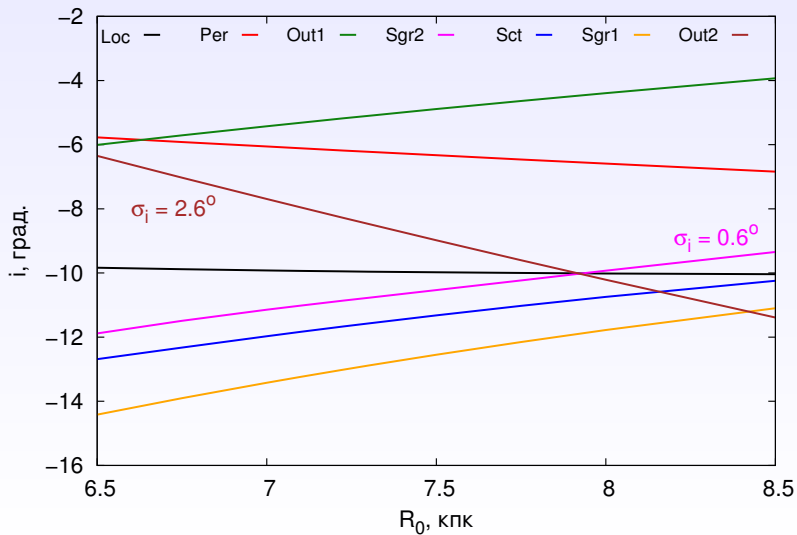
Совместное решение для двух систем



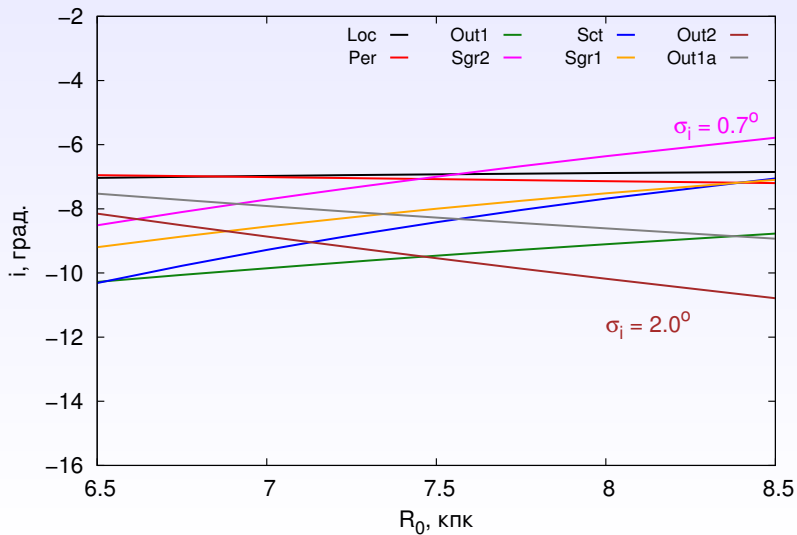
Доверительные области



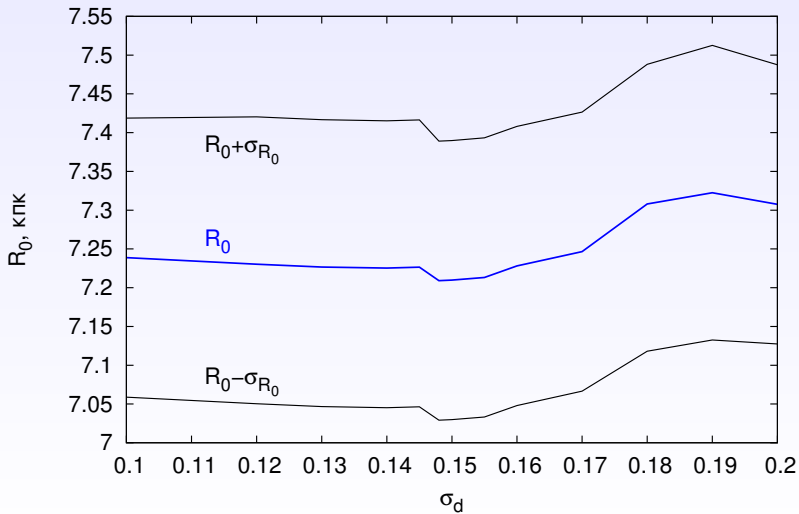
Зависимость углов закрутки от R_0 , $P > 9^d$



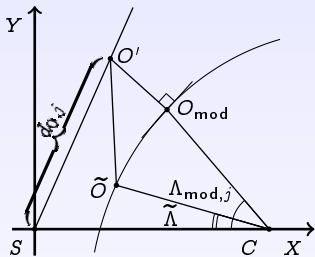
Зависимость углов закрутки от R_0 , $P \leq 9^d$



Зависимость R_0 от ошибки модуля расстояния



Расстояние от точки до кривой, $i_1 \neq 0$



$$i(\tilde{\Lambda}) = i_0 + i_1 \cdot \tilde{\Lambda}, \quad k(\tilde{\Lambda}) \equiv \operatorname{tg} i(\tilde{\Lambda}),$$

$$X(\tilde{\Lambda}) = R_0 - |R_0 - X_s| e^{k(\tilde{\Lambda}) \cdot \tilde{\Lambda}} \cos \tilde{\Lambda},$$

$$Y(\tilde{\Lambda}) = |R_0 - X_s| e^{k(\tilde{\Lambda}) \cdot \tilde{\Lambda}} \sin \tilde{\Lambda}.$$

$$\begin{aligned} & \left(\sin \Lambda_{\text{mod},j} - \left[k(\Lambda_{\text{mod},j}) + \frac{i_1 \Lambda_{\text{mod},j}}{\cos^2 i} \right] \cos \Lambda_{\text{mod},j} \right) (X_{0,j} - R_0) + \\ & + \left(\cos \Lambda_{\text{mod},j} + \left[k(\Lambda_{\text{mod},j}) + \frac{i_1 \Lambda_{\text{mod},j}}{\cos^2 i} \right] \sin \Lambda_{\text{mod},j} \right) Y_{0,j} - \\ & - \left[k(\Lambda_{\text{mod},j}) + \frac{i_1 \Lambda_{\text{mod},j}}{\cos^2 i} \right] |R_0 - X_s| e^{k(\Lambda_{\text{mod},j}) \cdot (\Lambda_{\text{mod},j} - \lambda_0)} = 0. \end{aligned}$$

(8)

Переменность угла закрутки

$$R_0 = 8.1_{-6.9}^{+7.1} \text{ кпк.}$$

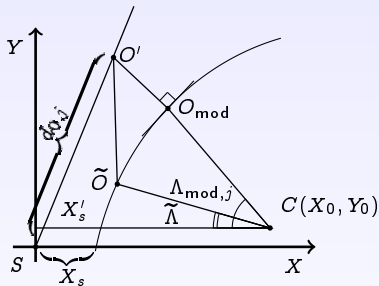
	«Старые» объекты		«Молодые» объекты	
Рукав	i	i_1	i	i_1
Sct	$-1.4_{-6.9}^{+6.9}$	$+0.37_{-0.43}^{+0.43}$	$-11.9_{-1.3}^{+1.3}$	$-0.09_{-0.63}^{+0.63}$
Sgr1	$-8.0_{-1.1}^{+1.1}$	$-0.05_{-0.53}^{+0.53}$	$-15.0_{-2.5}^{+2.5}$	$-0.16_{-0.61}^{+0.61}$
Sgr2	$-8.7_{-1.0}^{+1.0}$	$-0.14_{-0.56}^{+0.56}$	$-10.9_{-0.9}^{+0.9}$	$-0.06_{-0.49}^{+0.49}$
Loc	$-7.0_{-0.6}^{+0.6}$	$+0.01_{-0.42}^{+0.42}$	$-10.0_{-1.3}^{+1.3}$	$-0.08_{-0.48}^{+0.48}$
Per	$-7.0_{-1.3}^{+1.3}$	$-0.11_{-0.45}^{+0.45}$	$-6.1_{-1.7}^{+1.7}$	$-0.07_{-0.41}^{+0.41}$
Out1	$-8.4_{-1.5}^{+1.5}$	$+0.04_{-0.26}^{+0.26}$	$+5.2_{-6.2}^{+6.2}$	$+0.39_{-0.25}^{+0.25}$
Out1a	$-8.3_{-1.9}^{+1.9}$	$-0.02_{-0.26}^{+0.26}$	—	—
Out2	$-9.1_{-3.4}^{+3.4}$	$-0.03_{-0.25}^{+0.25}$	$+20.0_{-19.0}^{+19.0}$	$-0.43_{-0.57}^{+0.57}$

Переменность угла закрутки

$$R_0 = (7.23) \text{ кпк.}$$

	«Старые» объекты		«Молодые» объекты	
Рукав	i	i_1	i	i_1
Sct	$-8.9^{+2.0}_{-2.0}$	(0.00)	$-11.9^{+2.3}_{-2.3}$	$-0.013^{+0.043}_{-0.043}$
Sgr1	$-8.0^{+1.0}_{-1.0}$	$+0.001^{+0.050}_{-0.050}$	$-15.0^{+3.5}_{-3.5}$	$-0.081^{+0.043}_{-0.043}$
Sgr2	$-8.7^{+0.9}_{-0.9}$	$-0.066^{+0.036}_{-0.036}$	$-10.8^{+1.3}_{-1.3}$	$+0.002^{+0.019}_{-0.019}$
Loc	$-10.8^{+1.3}_{-1.3}$	$+0.002^{+0.019}_{-0.019}$	$-9.9^{+1.1}_{-1.1}$	$-0.018^{+0.064}_{-0.064}$
Per	$-7.0^{+1.2}_{-1.2}$	$-0.056^{+0.057}_{-0.058}$	$-6.0^{+1.6}_{-1.6}$	$-0.020^{+0.058}_{-0.058}$
Out1	$-8.4^{+1.5}_{-1.5}$	$+0.068^{+0.058}_{-0.058}$	$-6.0^{+2.8}_{-2.8}$	(0.00)
Out1a	$-8.3^{+1.8}_{-1.8}$	$+0.013^{+0.045}_{-0.045}$	—	—
Out2	$-9.2^{+3.4}_{-3.4}$	(0.00)	$-8.3^{+2.5}_{-2.5}$	(0.00)

Смещение полюса относительно $l = 0^\circ$



$$X(\tilde{\Lambda}) = X_0 - |R_0 - X'_s| e^{k\tilde{\Lambda}} \cos \tilde{\Lambda},$$

$$Y(\tilde{\Lambda}) = Y_0 + |R_0 - X'_s| e^{k\tilde{\Lambda}} \sin \tilde{\Lambda}.$$

$$R_0 = \sqrt{X_0^2 + Y_0^2}.$$

$$X_s = X_0 + Y_0 \operatorname{ctg} \lambda',$$

$$|X'_s - X_0| e^{k\lambda'} \sin \lambda' = -Y_0.$$

$$(X_{0,j} - X_0) (\sin \Lambda_{\text{mod},j} - k \cos \Lambda_{\text{mod},j}) - k |X_0 - X'_s| e^{k\Lambda_{\text{mod},j}} +$$

$$+ (Y_{0,j} - Y_0) (k \sin \Lambda_{\text{mod},j} + \cos \Lambda_{\text{mod},j}) = 0.$$

Совместное решение в предположении $Y_0 \neq 0$

Совместное решение для двух групп:

$$X_0 = 7.22_{-0.18}^{+0.19} \text{ кпк}, \quad Y_0 = -0.059_{-0.153}^{+0.144} \text{ кпк}.$$

$$R_0 = 7.22 \pm 0.25 \text{ кпк},$$

угловое смещение относительно $l = 0^\circ$: 0.5 ± 1.3 .

При варьировании R_0 от 6.0 кпк до 8.5 кпк смещение полюса остается незначимым.

Сглаженный потенциал Галактики

Модель потенциала Галактики (Casetti-Dinescu+, 2013).

Диск: потенциал Миямото–Нагаи,

$a = 6.5$ кпк, $b = 0.26$ кпк, $M_d = 1.1 \cdot 10^{11} M_\odot$,

$$\Phi(R, z) = - \frac{GM_d}{\sqrt{R^2 + (a + \sqrt{z^2 + b^2})^2}}.$$

Гало: логарифмический потенциал,

$d = 12$ кпк и $v_h = 121.9$ км/с,

$$\Phi(r) = v_h^2 \ln(r^2 + d^2).$$

Бар: потенциал Феррерса, трехосный эллипсоид, $n = 2$,

$$\rho(m^2) = \begin{cases} \rho_0 (1 - m^2/a_1^2)^n, & m \leq a_1, \\ 0, & m \geq a_1; \end{cases}$$

$$m^2 \equiv a_1^2 \sum_{i=1}^3 \frac{x_i^2}{a_i^2}.$$

Сглаженный потенциал Галактики. Балдж

- Модель Пламмера, $c_1 = 0.3$ кпк,

$$\Phi(r) = -\frac{GM_b}{\sqrt{r^2 + c_1^2}}.$$

- Модель Миямото–Нагаи, $a_1 = 0.038$ кпк, $b_1 = 0.19$ кпк,

$$\Phi(R, z) = -\frac{GM_b}{\sqrt{R^2 + \left(a_1 + \sqrt{z^2 + b_1^2}\right)^2}}.$$

- Изохронный потенциал, $b_1 = 0.15$ кпк,

$$\Phi(r) = -\frac{GM_b}{b_1 + \sqrt{b_1^2 + r^2}}.$$

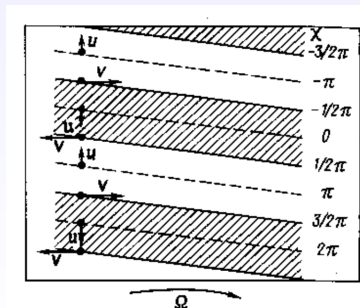
Возмущение от спиральной волны

Потоковые движения газа: отклик на возмущение вращающейся спиральной волны.

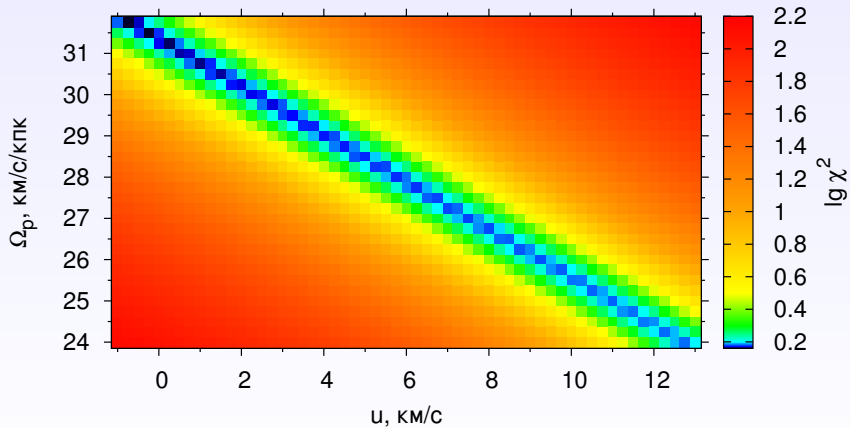
В спиральных рукавах — радиальные движения к галактическому центру (компонента скорости u).

$$\chi^2(u, \Omega_p) = \frac{(\Delta X_{s,obs} - \Delta X_{s,mod})^2}{\sigma^2(\Delta X_s)} + \frac{(\lambda_{int,obs} - \lambda_{int,mod})^2}{\sigma^2(\lambda_{int})}.$$

При $\Omega_p = 25.2 \pm 0.5$ км/с/кпк
(Дамбис и др., 2015) получаем
 $u \sim 10 \pm 1.5$ км/с.



Рукав Стрельца-2



Оценки u -компоненты

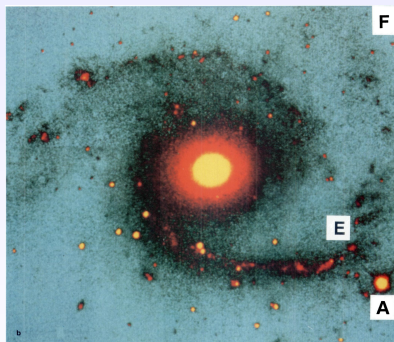
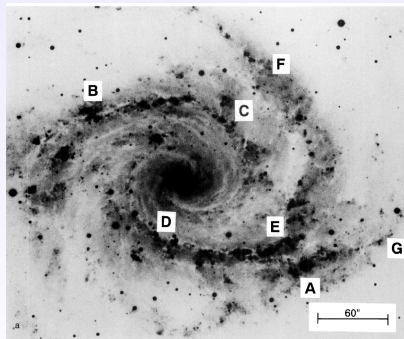
- Рукав Стрельца-2.
 $\Omega_p = 24.7$ км/с/кпк: $u \sim 10.5$ км/с.
 $\Omega_p = 25.2$ км/с/кпк: $u \sim 10.0$ км/с.
 $\Omega_p = 25.7$ км/с/кпк: $u \sim 9.5$ км/с.
- Рукав Персея
 $\Omega_p = 24.7$ км/с/кпк: $u \sim 11.5$ км/с.
 $\Omega_p = 25.2$ км/с/кпк: $u \sim 10.5$ км/с.
 $\Omega_p = 25.7$ км/с/кпк: $u \sim 9.5$ км/с.

Добавление v -компоненты величиной -1 км/с при тех же Ω_p смещает оценку компоненты u на ~ 0.5 км/с вниз.

Выводы

- 1 Для большинства сегментов показано различие параметров по молодым и старым объектам. Для рукавов Sgr1, Sgr2 и Loc обнаружено значимое различие углов закрутки, а для рукавов Sgr2 и Per — значимое различие для точек пересечения сегментами направления на центр Галактики.
- 2 При совместной оптимизации параметров модели получена оценка $R_0 = 7.23_{-0.18}^{+0.19}$ кпк, что после корректировки шкалы расстояний на $\sim 12\%$ соответствует значению $R_0 = 8.10_{-0.20}^{+0.21}$ кпк.
- 3 Показано отсутствие значимого смещения полюса спирального зора относительно линии $l = 0^\circ$.
- 4 При $\Omega_p = 25.2 \pm 0.5$ км/с/кпк (Дамбис и др., 2015) наблюдаемое смещение между сегментами по молодым и старым объектам может объясняться при $u = 10 \pm 1.5$ км/с.

Зависимость от типа объектов



NGC 2997 в синей части спектра и в ближнем ИК. Block+ (1994).

ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ТИПА ОБЪЕКТОВ

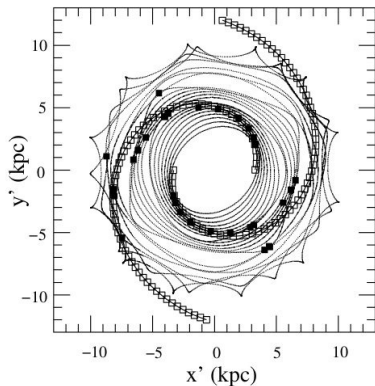


Figure 1. Self-consistency analysis for $\Omega_p = 20 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$. The proposed spiral locus is shown with open squares. A set of periodic orbits are traced with continuous lines, and the maxima in the response density are the filled (black) squares. The frame of reference is the rotating one where the spiral pattern is at rest

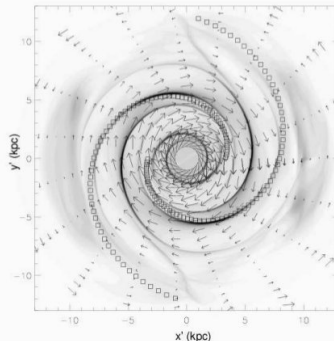


Figure 2. Simulation with the ZEUS code of the gas response to a spiral pattern with $\Omega_p = 20 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$, open squares, shown in the rotating frame of the spiral pattern after 2.55 Gyr of evolution. The arrows give the velocity field, their size being proportional to the speed, with the maximum speed shown being 212 km s^{-1} . Dense zones correspond to dark regions.

Звёзды: 2 рукава, газ: 4 рукава. Martos+ (2004).

Оценки R_0

Год	Авторы	$R_0 \pm \sigma_{R_0}$, кпк	Объекты
2019	Do+	$7.971 \pm 0.059 \pm 0.032$	S0-2, без ОТО
		$7.946 \pm 0.050 \pm 0.032$	S0-2 с ОТО
2019	Gravity coll.	$8.178 \pm 0.013(\text{stat}) \pm 0.022(\text{sys})$	S2
2018	Plewa+	8.44 ± 0.16	S2, модель шума
		8.53 ± 0.19	S2, гаусс-шум
2018	Chu+18	7.93 ± 0.13	S2+S38
2018	Xu+	8.34 ± 0.18	ОВ-звёзды, мазеры
2018	Mróz+	7.94 ± 0.12	плоская КВ, кл. цефеиды
		7.97 ± 0.14	линейная КВ, кл. цефеиды
2018	Braga+	$8.46 \pm 0.03(\text{stat}) \pm 0.11(\text{sys})$	цефеиды II типа в балдже
2018	Gravity coll.	8.122 ± 0.031	перигцентр S2
2018	Qin+	7.9 ± 0.3	мириды. учет геом. распр.
2018	Majaess+	8.30 ± 0.36	RRab в балдже
2017	Witzel, Ghez+	7.85 ± 0.06	G1 вблизи Sgr A*
2017	Bhardwaj+	$8.34 \pm 0.03(\text{stat}) \pm 0.41(\text{sys})$	цефеиды II типа в балдже
2017	Branham	7.67 ± 0.09	зв. G, K, M
2017	Gillessen+	$8.32 \pm 0.07(\text{stat}) \pm 0.14(\text{sys})$	17 звезд около Sgr A*
2017	McMillan	8.20 ± 0.09	модель распр. массы
2016	Hunt+	7.9 ± 0.3	зв. с нул. угл. моментом

Каталог Skowron и др. (2019). ~ 2400 цефеид

