

КИНЕМАТИКА РАССЕЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ С ДАННЫМИ ИЗ КАТАЛОГА GAIA DR2

Бобылев В.В., Байкова А.Т.

Пулковская обсерватория РАН

Современная звездная астрономия-2019

•11 октября •2019 •

ВВЕДЕНИЕ

Публикация данных каталога Gaia DR2 позволило заново определить средние значения собственных движений, расстояний и даже значения лучевых скоростей большого количества галактических рассеянных звездных скоплений (РЗС).

В современных каталогах (Диаса и др. 2002-2014; Харченко и др., 2013) имеются данные о более чем 2500 РЗС.

ЦЕЛИ РАБОТЫ

Оценка параметров галактического вращения,

Оценка параметров спиральной волны плотности,

**Анализ результатов отдельных решений
основных кинематических уравнений, те решений,
полученных только по собственным движениям, и
только по лучевым скоростям РЗС.**

ДААННЫЕ

В качестве основы используем каталог Кантат-Гудина и др. (2018) с собственными движениями и параллаксами из каталога Gaia DR2.

Источниками лучевых скоростей послужили каталоги MWSC (Харченко и др., 2013), а также Субирана и др. (2018) в котором лучевые скорости PЗС выведены по данным каталога Gaia DR2.

Всего в эту выборку вошли 925 PЗС различного возраста с относительными ошибками параллаксов менее 30%.

МЕТОДЫ

Для определения параметров кривой галактического вращения мы используем уравнения, полученные из формул Боттлингера, в которых произведено разложение угловой скорости Ω в ряд до членов второго порядка малости r/R_0 :

$$\begin{aligned} V_r = & -U_{\odot} \cos b \cos l - V_{\odot} \cos b \sin l \\ & -W_{\odot} \sin b + R_0(R - R_0) \sin l \cos b \Omega'_0 \\ & + 0.5R_0(R - R_0)^2 \sin l \cos b \Omega''_0, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} V_l = & U_{\odot} \sin l - V_{\odot} \cos l - r\Omega_0 \cos b \\ & + (R - R_0)(R_0 \cos l - r \cos b) \Omega'_0 \\ & + 0.5(R - R_0)^2 (R_0 \cos l - r \cos b) \Omega''_0, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} V_b = & U_{\odot} \cos l \sin b + V_{\odot} \sin l \sin b \\ & -W_{\odot} \cos b - R_0(R - R_0) \sin l \sin b \Omega'_0 \\ & - 0.5R_0(R - R_0)^2 \sin l \sin b \Omega''_0, \end{aligned} \quad (5)$$

где R — расстояние от звезды до оси вращения Галактики:

$$R^2 = r^2 \cos^2 b - 2R_0 r \cos b \cos l + R_0^2. \quad (6)$$

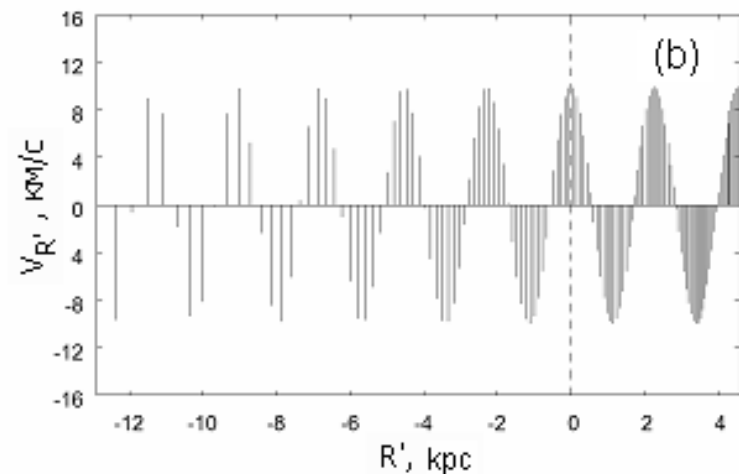
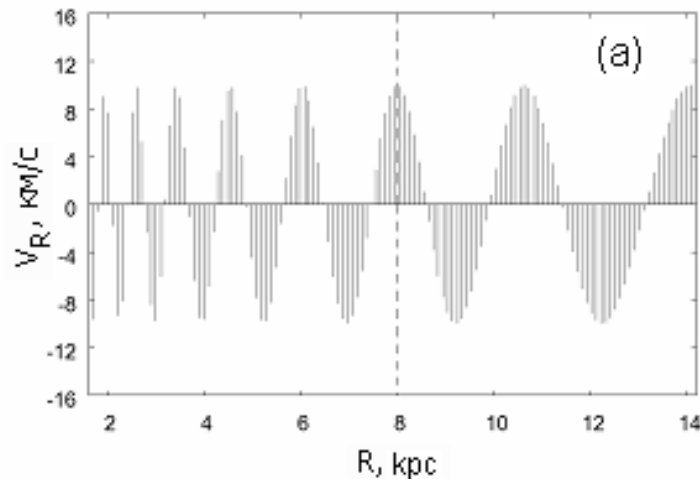
Величина Ω_0 является угловой скоростью вращения Галактики на солнечном расстоянии R_0 , параметры Ω'_0 и Ω''_0 — соответствующие производные угловой скорости, $V_0 = |R_0 \Omega_0|$.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СПИРАЛЬНОЙ ВОЛНЫ ПЛОТНОСТИ

$$\bar{V}_{\lambda_k} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V_{R_n} \exp \left[-j \frac{2\pi R_0}{\lambda_k} \ln(R_n / R_0) \right] \quad (1)$$

$$R'_n = \ln(R_n / R_0) R_0 \quad (2)$$

$$\bar{V}_{\lambda_k} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V_{R'_n} \exp \left[-j \frac{2\pi R'_n}{\lambda_k} \right] \quad (3)$$



СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СПИРАЛЬНОЙ ВОЛНЫ ПЛОТНОСТИ

Пусть $\chi = \chi_1 - m\theta$, где $\chi_1 = \frac{2\pi R_0}{\lambda} \ln(R / R_0) + \chi_0$,

тогда

$$V_{R_n} = f_R \cos(\chi_{1n} - m\theta_n) = f_R \cos \chi_{1n} (\cos m\theta_n + \tan \chi_{1n} \sin m\theta_n)$$

обозначим $V'_{R_n} = f_R \cos \chi_{1n}$, тогда

$$V_{R_n} = V'_{R_n} (\cos m\theta_n + \tan \chi_{1n} \sin m\theta_n). \quad (4)$$

Из уравнения (4) определяем новую последовательность:

$$V'_{R_n} = V_{R_n} / (\cos m\theta_n + \tan \chi_{1n} \sin m\theta_n).$$

Тогда:

$$\bar{V}_{\lambda_k} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V'_{R_n} \exp \left[-j \frac{2\pi R'_n}{\lambda_k} \right]. \quad (5)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

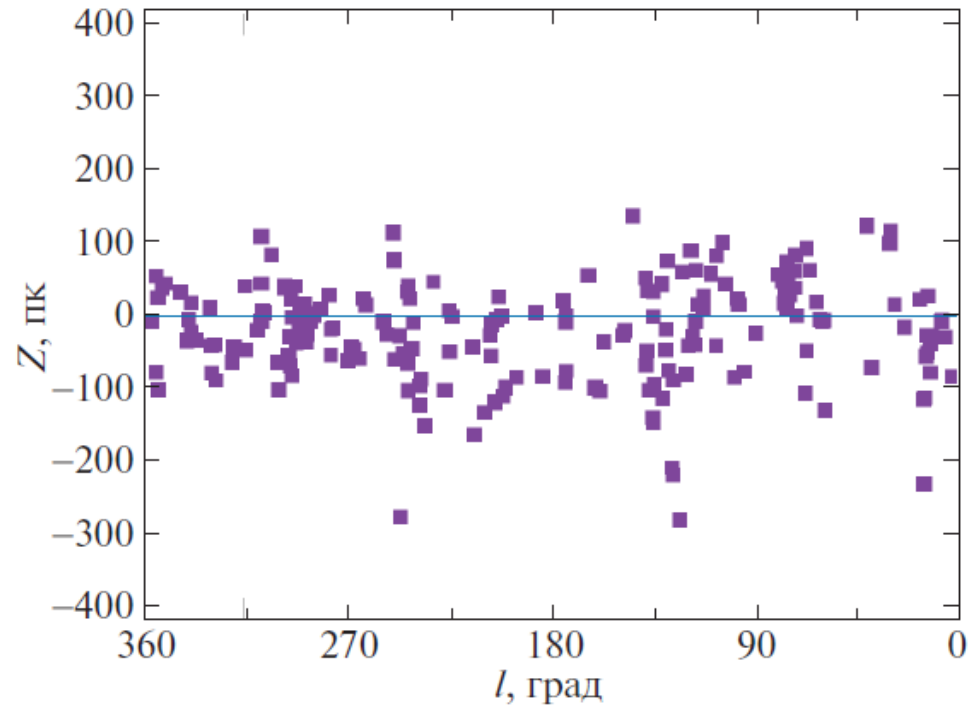


Рис. 1. Положение молодых ($\lg t < 8$) РЗС относительно плоскости Галактики

РЕЗУЛЬТАТЫ

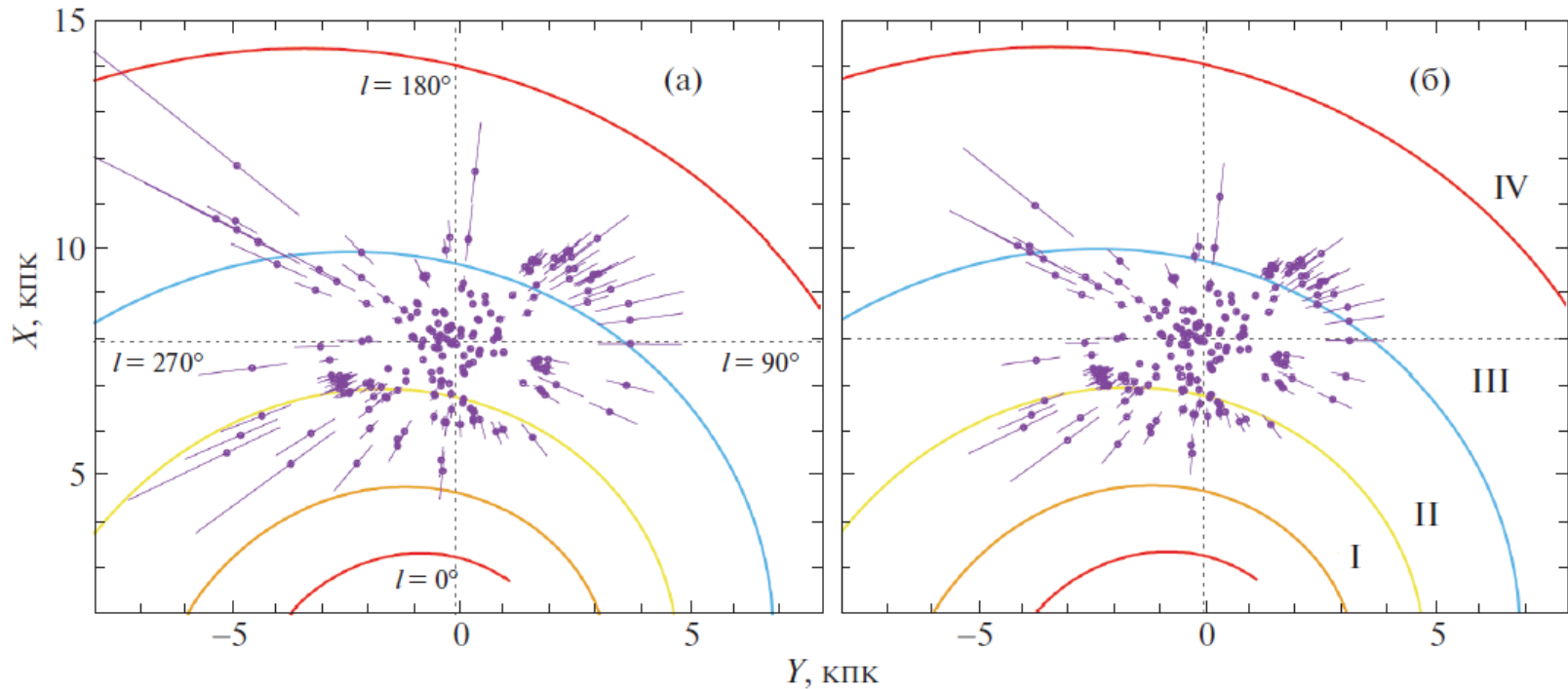


Рис. 2. Распределение на галактической плоскости XY молодых ($\lg t < 8$) РЗС, расстояния до которых вычислены с использованием оригинальных значений параллаксов из каталога Gaia DR2 (а), с поправкой $\Delta\pi = 0.050$ мсд (б); Солнце имеет координаты $(X, Y) = (8, 0)$ кпк, показан четырехрукавный спиральный узор с углом закрутки -13° (Бобылев, Байкова, 2014), отрезки спиральных рукавов пронумерованы римскими цифрами.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По выборке из 326 наиболее молодых РЗС с возрастом $\lg t < 8$ определены следующие параметры кривой вращения Галактики:
 $(U, V, W)_0 = (8.16, 11.19, 8.55) \pm (0.48, 0.56, 0.48)$ км/с,

$$\Omega_0 = 29.34 \pm 0.31 \text{ км/с/кпк},$$

$$\Omega'_0 = -4.012 \pm 0.074 \text{ км/с/кпк}^2 \text{ и}$$

$$\Omega''_0 = 0.779 \pm 0.062 \text{ км/с/кпк}^3,$$

где значение круговой скорости местного стандарта покоя составило $V_0 = 235 \pm 5$ км/с (для принятого значения $R_0 = 8 \pm 0.15$ кпк).

Амплитуды радиальных и тангенциальных скоростей возмущений составили

$$f_R = 4.7 \pm 1.0 \text{ км/с} \text{ и } f_\theta = 3.8 \pm 1.2 \text{ км/с},$$

длина волны возмущений

$\lambda_R = 2.2 \pm 0.5$ кпк и $\lambda_\theta = 2.3 \pm 0.5$ кпк для принятой четырехрукавной модели спирального узора, значения фазы Солнца в спиральной волне плотности найдены следующими:

$$\chi_\odot = -120 \pm 10 \text{ градусов.}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

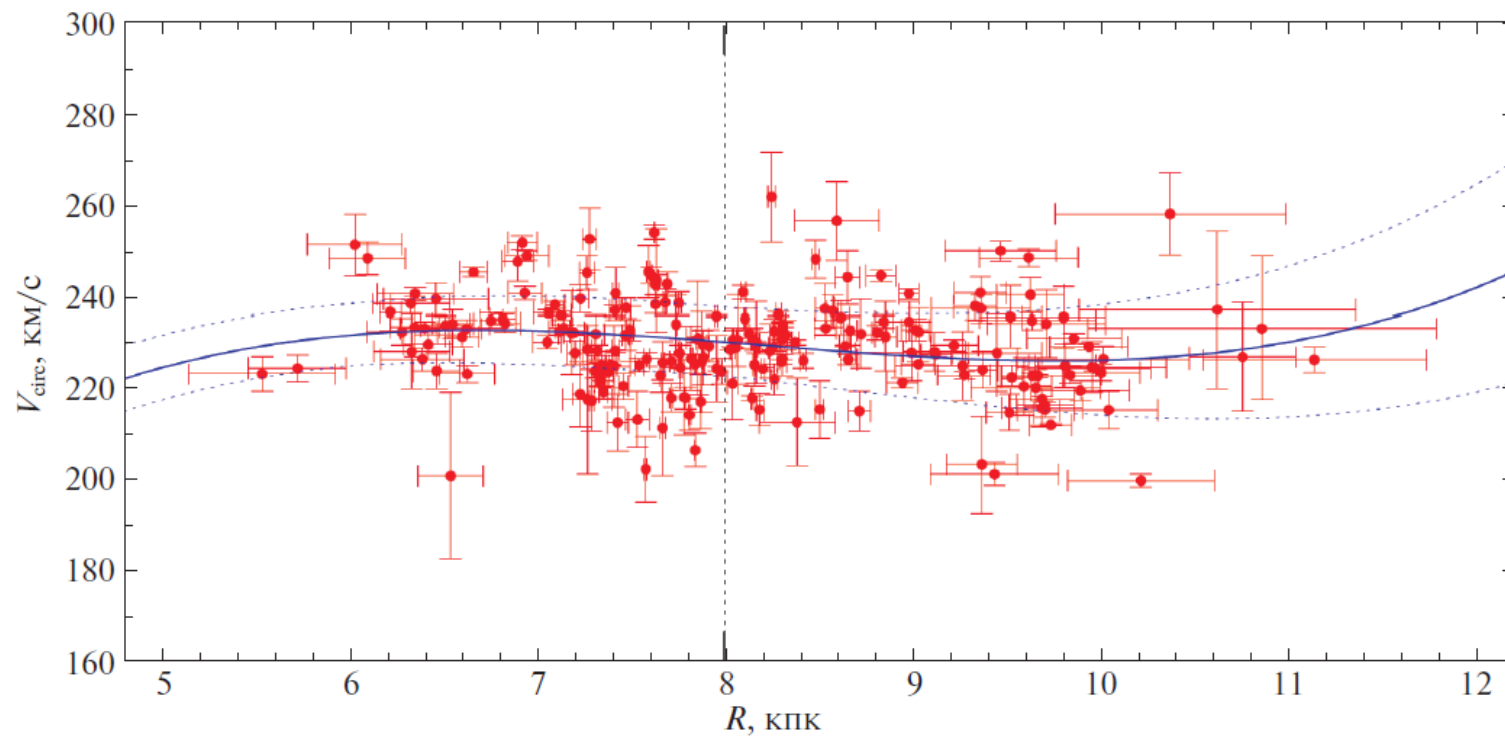


Рис. 3. Круговые скорости молодых РЗС в зависимости от галактоцентрического расстояния, дана кривая вращения Галактики, построенная согласно решению (14), с границами доверительных интервалов, соответствующими уровню 1σ ; вертикальным пунктиром обозначено положение Солнца.

РЕЗУЛЬТАТЫ

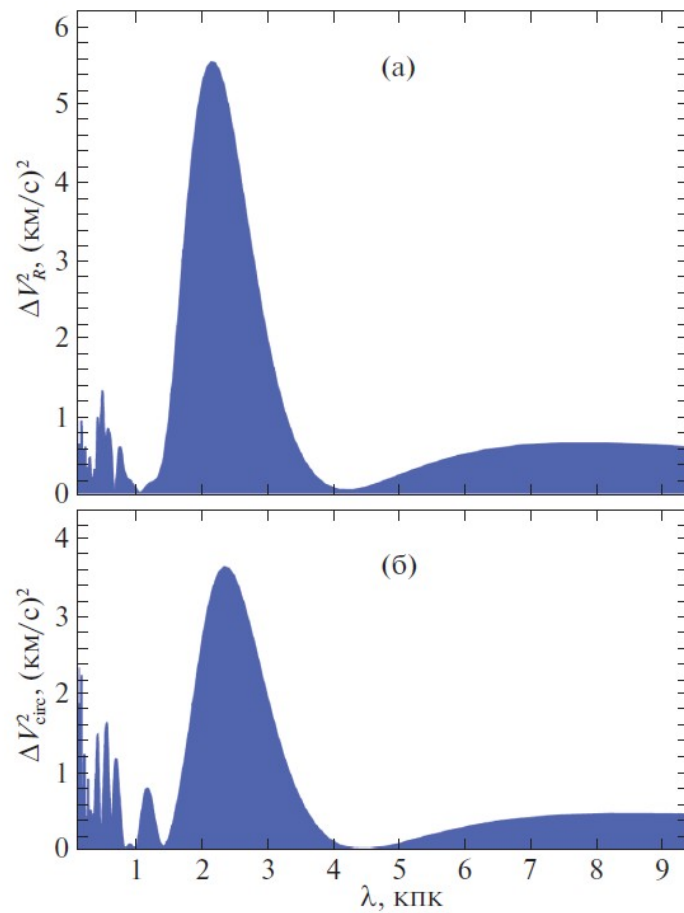


Рис. 4. Спектр мощности радиальных (а) и остаточных тангенциальных (б) скоростей молодых РСЗ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

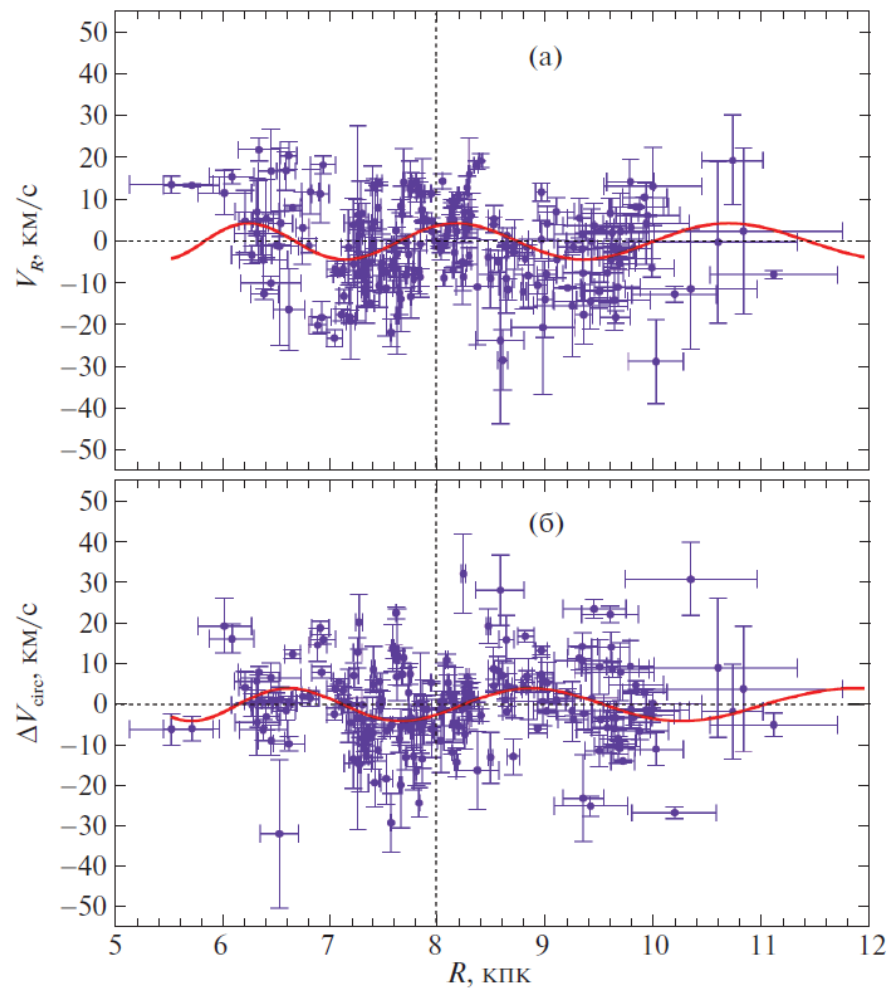


Рис. 5. Радиальные (а) и остаточные тангенциальные (б) скорости молодых РЗС в зависимости от галактоцентрического расстояния, вертикальной пунктирной линией отмечено положение Солнца.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Далее анализируем РЗС из каталога Кантат-Гудина и др. (2018) с собственными движениями и параллаксами Gaia DR2, а лучевые скорости РЗС преимущественно берем из каталога Субирана и др. (2018), где средние значения лучевые скорости РЗС выведены исключительно по данным каталога Gaia DR2.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Таблица 2: Параметры вращения Галактики, найденные по РЗС различных возрастов с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 15%. В верхней части даны результаты, полученные только по лучевым скоростям V_r (уравнение (1)), а нижней части — только по компоненте V_l (уравнение (2)), N_\star — количество использованных скоплений.

| Параметры | все возрасты | $0 < \lg t \leq 8$ | $8 < \lg t \leq 9$ | $9 < \lg t$ |
|---------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|
| U_\odot , км/с | 11.7 ± 1.0 | 9.0 ± 1.4 | 10.2 ± 1.3 | 15.1 ± 4.3 |
| V_\odot , км/с | 13.1 ± 1.0 | 13.9 ± 1.4 | 13.4 ± 1.5 | 13.6 ± 3.9 |
| Ω'_0 , км/с/кпк ² | -3.99 ± 0.14 | -4.05 ± 0.23 | -4.21 ± 0.19 | -3.87 ± 0.46 |
| Ω''_0 , км/с/кпк ³ | 0.37 ± 0.10 | 1.18 ± 0.37 | 0.67 ± 0.21 | 0.21 ± 0.23 |
| σ_0 , км/с | 13.5 | 9.4 | 13.5 | 20.3 |
| N_\star | 456 | 127 | 238 | 74 |
| U_\odot , км/с | 8.60 ± 0.54 | 7.68 ± 0.63 | 9.02 ± 0.81 | 11.7 ± 2.4 |
| V_\odot , км/с | 9.36 ± 0.70 | 8.15 ± 0.85 | 10.59 ± 1.03 | 10.1 ± 3.5 |
| Ω_0 , км/с/кпк | 28.78 ± 0.30 | 29.70 ± 0.36 | 28.64 ± 0.45 | 29.2 ± 1.2 |
| Ω'_0 , км/с/кпк ² | -3.988 ± 0.081 | -4.061 ± 0.036 | -4.107 ± 0.123 | -3.67 ± 0.34 |
| Ω''_0 , км/с/кпк ³ | 0.637 ± 0.039 | 0.677 ± 0.032 | 0.713 ± 0.063 | 0.40 ± 0.12 |
| σ_0 , км/с | 12.72 | 8.5 | 13.0 | 18.8 |
| N_\star | 1052 | 345 | 518 | 122 |
| z_\odot , пк | -10 ± 5 | -21 ± 4 | -14 ± 5 | 32 ± 30 |
| $(\Omega'_0)_{V_r}/(\Omega'_0)_{V_l}$ | 1.00 ± 0.04 | 1.00 ± 0.06 | 1.03 ± 0.05 | 1.05 ± 0.16 |

РЕЗУЛЬТАТЫ

Здесь наилучшее (с наименьшей ошибкой единицы веса, а также с наименьшими ошибками определяемых параметров) решение получено в результате совместного решения по выборке из 930 РЗС, с возрастом $lg t < 9.0$, с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 30%. Были использованы 384 РЗС со средними значениями лучевых скоростей, вычисленным в работе Субиран и др. (2018) не менее чем по трем вероятным членам скопления. Получены следующие параметры кривой вращения Галактики:

$$(U, V, W)_0 = (8.53, 11.22, 7.83) \pm (0.38, 0.46, 0.32) \text{ км/с,}$$

$$\Omega_0 = 28.71 \pm 0.22 \text{ км/с/кпк,}$$

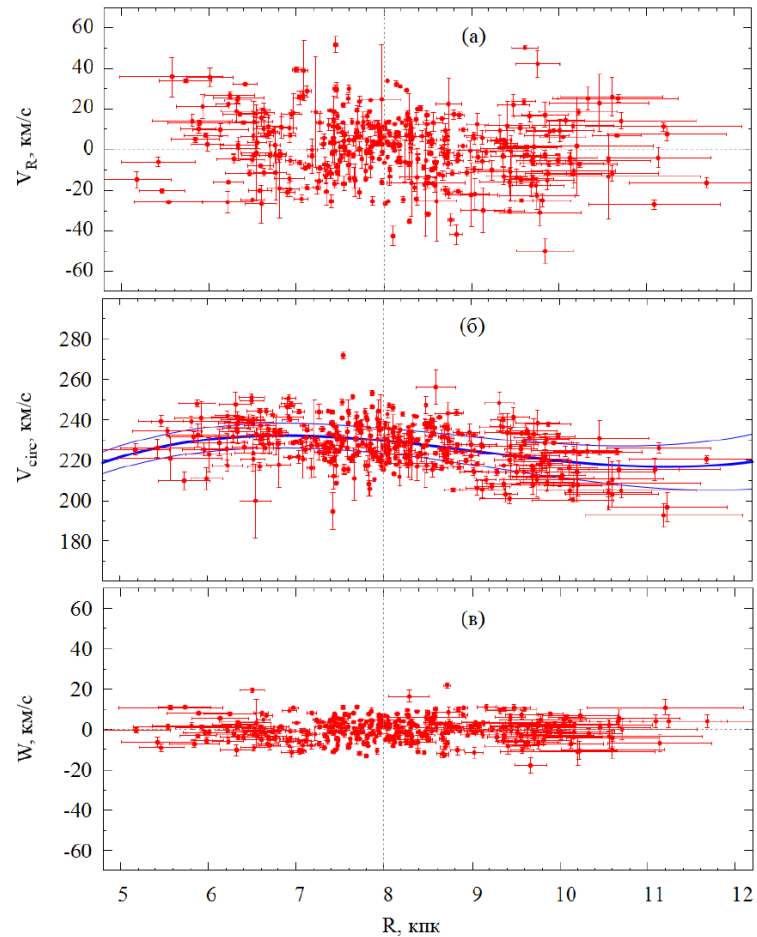
$$\Omega'_0 = -4.100 \pm 0.058 \text{ км/с/кпк}^2 \text{ и}$$

$$\Omega''_0 = 0.736 \pm 0.033 \text{ км/с/кпк}^3,$$

где значение круговой скорости местного стандарта покоя составило $V_0 = 229.7 \pm 4.6 \text{ км/с}$ (для принятого значения $R_0 = 8 \pm 0.15 \text{ кпк}$).

По собственным движениям 930 РЗС показано, что помимо вращения вокруг оси z , имеется вращение всей выборки вокруг оси x с угловой скоростью $\omega_{-1} = 0.48 \pm 0.15 \text{ км/с/кпк}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ



Радиальные а), тангенциальные б) и вертикальные в) скорости выборки из 384 РЗС, имеющих пространственные скорости, в зависимости от галактоцентрического расстояния, вертикальной пунктирной линией отмечено положение Солнца.

ОБСУЖДЕНИЕ

Цветков А.С., Амосов Ф.А., Письма в АЖ, том 45, No 7, 517-528 (2019).

Таблица 2. Значения компонент скорости движения Солнца в км/с и угловой скорости твердотельного вращения в км/с/Кпк, полученные для звезд различных расстояний ката лога GAIA DR2 with RV по собственным движениям. Мощность каждой выборки – 400 000 звезд.

| R | U | V | W | ω_1 | ω_2 | ω_3 |
|-------------|----------------|----------------|---------------|---------------|----------------|-----------------|
| 3 – 208 | 10.1 ± 0.1 | 21.8 ± 0.1 | 7.9 ± 0.1 | 0.4 ± 0.6 | -5.1 ± 0.6 | -12.9 ± 0.6 |
| 208 – 300 | 9.7 ± 0.1 | 22.1 ± 0.1 | 7.7 ± 0.1 | 1.4 ± 0.2 | -2.4 ± 0.2 | -12.5 ± 0.2 |
| 300 – 386 | 10.1 ± 0.1 | 22.6 ± 0.1 | 7.8 ± 0.1 | 0.6 ± 0.2 | -1.2 ± 0.2 | -12.3 ± 0.2 |
| 386 – 474 | 10.1 ± 0.1 | 22.6 ± 0.1 | 7.8 ± 0.1 | 0.7 ± 0.1 | -1.0 ± 0.1 | -12.8 ± 0.1 |
| 474 – 571 | 10.3 ± 0.1 | 22.7 ± 0.1 | 7.8 ± 0.1 | 0.5 ± 0.1 | -1.0 ± 0.1 | -13.0 ± 0.1 |
| 571 – 687 | 10.4 ± 0.1 | 22.6 ± 0.1 | 7.8 ± 0.1 | 0.3 ± 0.1 | -1.1 ± 0.1 | -13.0 ± 0.1 |
| 687 – 835 | 10.7 ± 0.1 | 23.5 ± 0.1 | 7.8 ± 0.1 | 0.1 ± 0.1 | -0.7 ± 0.1 | -12.9 ± 0.1 |
| 835 – 1040 | 11.1 ± 0.1 | 25.8 ± 0.1 | 8.0 ± 0.1 | 0.2 ± 0.1 | -0.5 ± 0.1 | -12.6 ± 0.1 |
| 1040 – 1303 | 11.4 ± 0.1 | 29.2 ± 0.1 | 8.1 ± 0.1 | 0.4 ± 0.1 | -0.2 ± 0.1 | -12.6 ± 0.0 |
| 1303 – 1594 | 11.7 ± 0.1 | 31.9 ± 0.1 | 8.2 ± 0.1 | 0.7 ± 0.1 | 0.0 ± 0.1 | -12.9 ± 0.0 |
| 1594 – 1897 | 12.0 ± 0.1 | 34.4 ± 0.1 | 8.2 ± 0.1 | 0.7 ± 0.1 | 0.3 ± 0.1 | -13.2 ± 0.0 |
| 1897 – 2220 | 12.2 ± 0.1 | 37.1 ± 0.1 | 8.3 ± 0.1 | 0.9 ± 0.1 | 0.2 ± 0.1 | -13.6 ± 0.0 |
| 2220 – 2582 | 12.2 ± 0.1 | 40.7 ± 0.1 | 8.3 ± 0.1 | 0.9 ± 0.1 | 0.1 ± 0.1 | -13.9 ± 0.0 |
| 2582 – 3031 | 12.6 ± 0.1 | 46.2 ± 0.1 | 8.4 ± 0.1 | 0.9 ± 0.1 | 0.1 ± 0.1 | -14.2 ± 0.0 |
| 3031 – 3677 | 13.0 ± 0.1 | 54.2 ± 0.1 | 8.6 ± 0.1 | 0.7 ± 0.1 | 0.3 ± 0.1 | -14.6 ± 0.0 |

ВЫВОДЫ

Изучена выборка РЗС с собственными движениями и параллаксами из каталога Gaia DR2. Основой послужил каталог Кантат-Гудина и др. (2018). Основным источником лучевых скоростей послужили каталоги MWSC (Харченко и др., 2013). Выборка с одержит 925 РЗС различного возраста с относительными ошибками параллакса менее 30%. Рассмотрена выборка из 326 наиболее молодых РЗС с возрастом $lg t < 8$. Все эти скопления расположены не далее 5 кпк от Солнца.

Наилучшее решение получено в результате совместного решения по выборке из 930 РЗС, с возрастом $lg t < 9.0$, с ошибками параллакса менее 30%. Были использованы 384 РЗС со средними значениями лучевых скоростей, вычисленным в работе Субиран и др. (2018) не менее чем по трем вероятным членам скопления.

Анализ собственных движений этих 930 РЗС показал, что помимо вращения вокруг галактической оси z, имеется значимо отличающееся от нуля вращение всей выборки вокруг оси x с угловой скоростью 0.48 ± 0.15 км/с/кпк.

Публикации:

- 1). Бобылев В.В., Байкова А.Т. Кинематика Галактики по выборке молодых рассеянных звездных скоплений с данными из каталога Gaia DR2, ПАЖ, том 45, No 3, 151-162 (2019).
- 2). Бобылев В.В., Байкова А.Т. Кинематические свойства рассеянных звездных скоплений с данными из каталога Gaia DR2, ПАЖ, том 45, No 4, 249-257 (2019).

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!