

УДК 524

Кинематические свойства толстого диска Галактики в околосолнечной окрестности

В.И. Корчагин, Н.О. Буданова

НИИ физики Южного федерального университета, пр. Стачки, 194, Ростов-на-Дону, 344090
vkorchagin@sfedu.ru, budanova-nata@mail.ru

Поступила в редакцию 6 ноября 2017 г.

Аннотация. По данным современных каталогов радиальных и собственных движений звезд представлены результаты исследования кинематических свойств толстого диска Галактики. Отобранные звезды толстого диска находятся в околосолнечной окрестности и определяют его свойства вблизи плоскости симметрии Галактики. Показано, что распределение скоростей звезд толстого диска в направлении вращения является асимметричным. Величина отставания вращения толстого диска Галактики по отношению к вращению тонкого диска (“асимметричный дрейф”) составляет в околосолнечной окрестности около 20 км с^{-1} , что указывает на большие значения пространственного масштаба кинематических характеристик толстого диска Галактики в радиальном направлении по сравнению с пространственным масштабом тонкого галактического диска.

KINEMATIC PROPERTIES OF THE GALACTIC THICK DISK IN THE SOLAR VICINITY, *by V.I. Korchagin and N.O. Budanova*. The paper presents the results of study of the kinematic properties of the Galactic thick disk based on data from modern stellar radial velocities and proper motion catalogues. The selected thick disk stars are in the solar vicinity and define its properties near the plane of Galactic symmetry. The velocity distribution of thick disk stars in the direction of rotation is shown to be asymmetric. The value of the lag of the rotational velocity of the Galactic thick disk relative to the thin disk rotation (“asymmetric drift”) in the solar vicinity is about 20 km s^{-1} that points to larger spatial scales for the kinematic characteristics of the Galactic thick disk in the radial direction compared to the spatial scale of the Galactic thin disk.

Ключевые слова: Галактика, толстый диск, кинематика, асимметричный дрейф

1 Введение

Согласно современным представлениям, в нашей Галактике можно выделить по крайней мере четыре подсистемы, различающиеся своим химическим составом и кинематическими свойствами: тонкий диск, толстый диск, протодисковое гало и аккрецированное гало. Большинство исследований кинематических характеристик толстого диска Галактики базируется на критериях, позволяющих отбирать звезды, находящиеся на расстоянии 1–2 кпк от галактической плоскости, где, как предполагают, большинство звездных населений представлено звездами толстого диска (см., например, Фурман, 2000; Рикс, Бови, 2013). Мы предлагаем другой подход для выделения подсистемы звезд, принадлежащих толстому диску. Звезды толстого диска присутствуют и в околосолнечной окрестности вблизи галактической плоскости. Более того, пространственная концентрация звезд толстого диска максимальна вблизи плоскости симметрии Галактики. Базируясь на хорошо изученных кинематических

характеристиках звезд в околосолнечной окрестности, можно отобрать звезды, обладающие сравнительно высокими скоростями в направлении, перпендикулярном плоскости Галактики, и таким образом получить выборку звезд, предположительно принадлежащую толстому диску. В предлагаемом подходе есть два положительных момента. Во-первых, кинематические свойства близлежащих звезд определены, как правило, более точно по сравнению с кинематическими характеристиками удаленных звезд. Во-вторых, пространственная плотность звезд экспоненциально уменьшается при удалении от плоскости симметрии галактического диска и мала на больших z . Отбирая звезды толстого диска Галактики, находящиеся в окрестности Солнца, мы получаем, таким образом, более богатую выборку звезд с более точными характеристиками.

2 Критерии отбора

В последнее время были опубликованы базы данных, содержащие информацию о радиальных скоростях и собственных движениях большого числа звезд Млечного Пути. Используя данные каталога звезд RAVE DR4 (Кордопатис и др., 2013), содержащего радиальные скорости более чем для 482000 звезд и собственные движения звезд из каталогов PPMXL (Розер и др., 2010), Tycho2 (Хог и др., 2000), UCAC2 (Закариас и др., 2004), UCAC3 (Закариас и др., 2010) и UCAC4 (Закариас и др., 2013), мы получили выборку звезд толстого диска Галактики с известными кинематическими параметрами. Следуя работе Вильямса и др. (2013), мы наложили на выборку звезд ряд ограничений. Так, были оставлены звезды, имеющие только нормальные спектры по классификации RAVE; отношение сигнала к шуму $STN > 20$; абсолютное значение лучевых скоростей менее 600 км с^{-1} ; ошибки в определении расстояния, лучевой скорости и собственных движений менее 50 %; звезды, имеющие абсолютное значение компоненты скорости $|V_\theta - 220| < 600 \text{ км с}^{-1}$ и модуль полной пространственной скорости $< 600 \text{ км с}^{-1}$. Для отобранных звезд были вычислены координаты объектов и галактоцентрические компоненты пространственных скоростей относительно локального центроида в цилиндрических и декартовых координатах, исправленные за движение Солнца. При вычислениях компоненты пекулярной скорости Солнца относительно локального центроида принимались равными $(U, V, W)_\odot = (11.1, 12.2, 7.3) \text{ км с}^{-1}$ (Шонрич и др., 2010), расстояние Солнца до центра Галактики – 8.0 кпк (Рейд, 1993), скорость вращения локального центроида (LSR) – 220 км с^{-1} .

В выбранной нами системе координат компонента скорости V_R направлена на центр Галактики, V_θ – в сторону, противоположную галактическому вращению, а компонента скорости V_z направлена на Северный галактический полюс. Выборка звезд, удовлетворяющая вышеперечисленным критериям, для каталога UCAC4 составила 134924 объектов, для каталога PPMXL – 83711 объектов и для каталога TYCHO2 – 66060 объектов.

3 “Кинематическое” определение толстого диска в околосолнечной окрестности

Звезды в околосолнечной окрестности представляют собой смесь звездных населений, принадлежащих различным подсистемам Галактики, а именно: тонкому диску, толстому диску и гало. Наиболее многочисленными в окрестности Солнца являются звезды тонкого диска, поэтому для исследования свойств толстого диска Галактики обычно отбираются звезды, находящиеся на значительном удалении от галактической плоскости (Кордопатис и др., 2012). Как уже подчеркивалось, звезды толстого диска Галактики присутствуют и в околосолнечной окрестности. Для получения выборки звезд толстого диска Галактики, находящихся в околосолнечной окрестности, нами были использованы следующие критерии отбора: из выборки звезд с надежно определенными кинематическими характеристиками были оставлены звезды, находящиеся в цилиндрическом объеме высотой $|z| \leq 0.5 \text{ кпк}$ и радиусом $R \leq 1 \text{ кпк}$, обладающие достаточно большими значениями компоненты скорости в направлении, перпендикулярном плоскости симметрии диска Галактики. Дисперсия скоростей звезд толстого диска Галактики в направлении, перпендикулярном его плоскости, варьирует в оценках различных авторов в интервале $35\text{--}55 \text{ км с}^{-1}$ (Каролло и др., 2010; Собиран и др., 2003; Казетти-Динеску и др., 2011). Отбирая звезды, обладающие скоростями в направлении, перпендикулярном диску Галактики, в интервале $40 \leq |V_z| \leq 80 \text{ км с}^{-1}$, мы получаем выборку звезд, принадлежащих в

основном толстому диску. При таком отборе загрязненность выборки звездами тонкого диска Галактики составляет не более десяти процентов. При учете химического состава звезд можно получить дополнительное ограничение на выборку. Известно, что звездное население толстого диска Галактики малометаллично и распределение звезд толстого диска по металличности отличается от аналогичного распределения для звезд тонкого диска. Разброс металличностей звезд толстого диска находится в интервале $-1 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq -0.4$ dex с максимумом в $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.6$ dex (Каролло и др., 2010), в то время как большинство звезд тонкого диска Галактики обладает металличностью $[\text{Fe}/\text{H}] \geq -0.3$ dex (Бусер, Ронг, 1996). Накладывая дополнительное ограничение на выборку звезд $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -0.4$ dex, мы уменьшаем загрязненность нашей выборки звездами тонкого диска Галактики приблизительно до 1.3 %. Итоговые выборки звезд для всех трех каталогов принадлежат в основном толстому диску Галактики и составляют 1424 звезды для каталога UCAC4, 1107 звезд для каталога TYCHO2, 1270 звезд для каталога PPMXL, что является хорошей базой для исследования его кинематических свойств вблизи плоскости симметрии.

4 Распределение скоростей звезд толстого диска в направлении вращения

На рисунке 1 показано распределение скоростей звезд толстого диска Галактики в околосолнечной окрестности в направлении вращения диска. Видно, что распределение скоростей звезд толстого диска в направлении вращения является асимметричным. Наличие асимметрии в распределении ази-

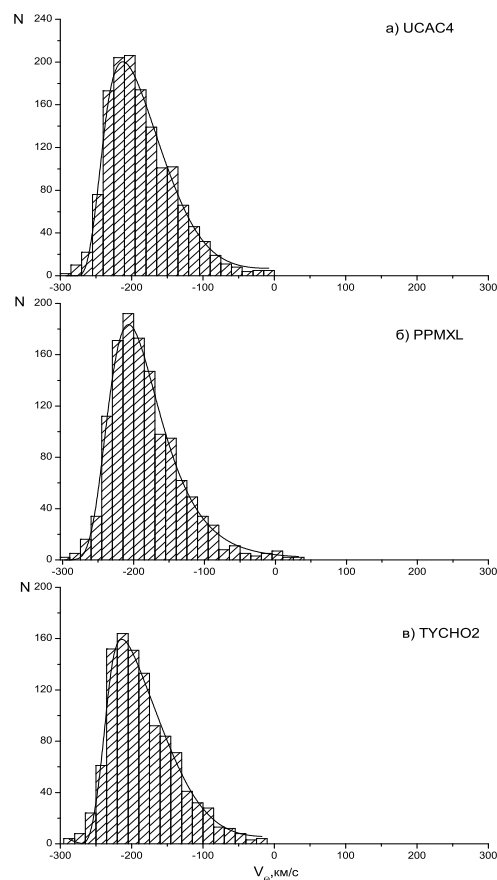


Рис. 1. Распределение скоростей звезд в околосолнечной окрестности в направлении вращения диска. Сплошной линией показана аппроксимация наблюдаемого распределения дисперсии скоростей толстого диска Галактики аналитическим выражением Бинни и др. (2014)

мутальных скоростей для звезд тонкого диска Галактики Бинни и др. (2014) объясняют присутствием “групп звезд” с различными возрастами и с различными дисперсиями скоростей. В статье Бинни и др. (2014) предложено аналитическое выражение, описывающее асимметрию в распределении скоростей звезд в азимутальном направлении для звезд тонкого диска Галактики. Как оказалось, аналитическое выражение, предложенное для описания тонкого диска Галактики, хорошо аппроксимирует асимметрию в распределении скоростей и для звезд толстого диска Галактики, что указывает на наличие групп звезд с различными дисперсиями скоростей и в толстом галактическом диске.

5 Распределение скоростей звезд толстого диска вдоль радиуса

Распределение скоростей звезд в радиальном направлении, как видно из рисунка 2, достаточно хорошо описывается Гауссовой кривой со значениями дисперсии скоростей и остаточной скорости $\sigma_R = 56.1 \pm 1.6 \text{ км с}^{-1}$, $\langle V_R \rangle = -5.5 \pm 1.6 \text{ км с}^{-1}$ для каталога UCAC4, $\sigma_R = 59.5 \pm 1.5 \text{ км с}^{-1}$,

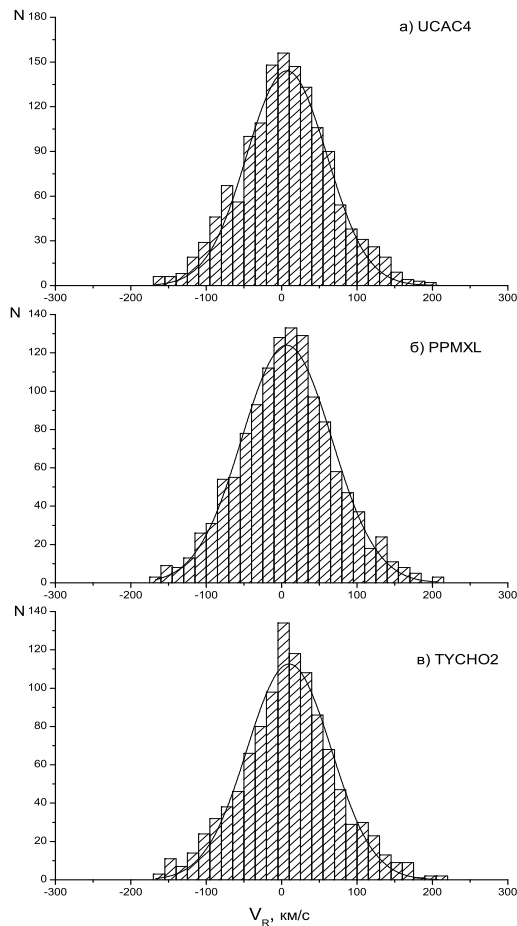


Рис. 2. Распределение звезд толстого диска Галактики по скоростям для радиальной компоненты скорости

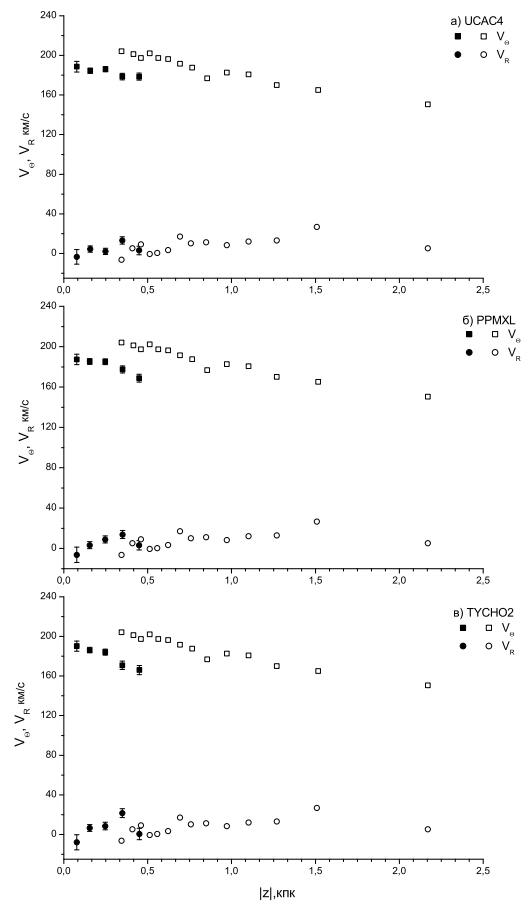


Рис. 3. Зависимость от координаты z для компонент скоростей V_R , V_θ толстого диска Галактики

$\langle V_R \rangle = -5.6 \pm 1.5 \text{ км с}^{-1}$ для каталога PPMXL, $\sigma_R = 55.2 \pm 2.2 \text{ км с}^{-1}$, $\langle V_R \rangle = -8.9 \pm 2.2 \text{ км с}^{-1}$ для каталога TYCHO2. Средняя скорость в радиальном направлении для всех трех каталогов отличается от нуля. Ненулевое значение радиальной скорости звезд толстого диска Галактики объясняется,

возможно, вовлеченностью околосолнечных областей в движение, связанное с наличием спирального узора Галактики. Если предположение верно, то кинематические характеристики толстого диска Галактики позволяют определить амплитуду возмущения радиальной компоненты скорости в местном спиральном рукаве Млечного Пути.

На рисунке 3 показана зависимость расстояния до плоскости симметрии Галактики от компонент скорости V_R , V_θ толстого диска. Наши результаты (заполненные символы) приведены в сравнении с данными, полученными в работе Казетти-Динеску и др. (2011). Вращательная скорость толстого диска в околосолнечной окрестности, полученная по нашей выборке, ниже значений для вращательной скорости толстого диска на малых z , полученной в работе Казетти-Динеску и др. (2011). В то же время значения вращательной скорости толстого диска Галактики в околосолнечной окрестности согласуются со значениями вращательной скорости для толстого диска Галактики на высотах 0.9–1.5 кпк. Возможным объяснением различия в значениях вращательной скорости толстого диска на высотах $|z| \sim 0.1$ –0.2 кпк, полученных в работе Казетти-Динеску и др. (2011) и по нашей выборке, является загрязненность на малых z выборки звезд толстого диска, используемой в работе Казетти-Динеску и др. (2011), звездами тонкого диска.

В таблице 1 приведены значения компонент тензора дисперсии скоростей звезд толстого диска Галактики, определяемые выражением (1):

$$\sigma_{jk} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_i (V_j^i - \bar{V}_j)(V_k^i - \bar{V}_k)}. \quad (1)$$

Здесь V_j^i и V_k^i – компоненты скоростей i звезды в выборке, а \bar{V}_j и \bar{V}_k – усредненные значения компонент скоростей в j -м и k -м направлении.

Таблица 1. Значения компонент тензора дисперсии скоростей толстого диска Галактики, определенные по разным каталогам

		м/с	м/с
UCAC4	σ_{RR} $\sigma_{R\theta}$	60.2 ± 1.1	4.8 ± 0.1
	$\sigma_{\theta\theta}$		48.1 ± 0.9
PRMXL	σ_{RR} $\sigma_{R\theta}$	62.4 ± 1.2	10.7 ± 0.2
	$\sigma_{\theta\theta}$		47.1 ± 0.9
TYCHO2	σ_{RR} $\sigma_{R\theta}$	62.5 ± 1.3	10.1 ± 0.2
	$\sigma_{\theta\theta}$		47.0 ± 1.0

Из таблицы видно, что компоненты тензора дисперсии скоростей σ_{RR} , $\sigma_{\theta\theta}$ в пределах ошибок измерений имеют одинаковые значения для всех каталогов, а значения перекрестных членов тензора дисперсии скоростей по сравнению с диагональными членами малы. Соответственно, значения угла отклонения эллипсоида тензора дисперсии скоростей $\phi_{R\theta}$, определяемые выражением (2), также малы для всех трех каталогов.

$$\phi_{R\theta} = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2\sigma_{R\theta}^2}{\sigma_{RR}^2 - \sigma_{\theta\theta}^2}\right). \quad (2)$$

Величина угла отклонения оказалась равной $\phi_{R\theta} \sim 0.7^\circ$ для каталога UCAC4, $\phi_{R\theta} \sim 1.6^\circ$ для каталога PRMXL, $\phi_{R\theta} \sim 1.0^\circ$ для каталога TYCHO2. Малые значения величин угла отклонения эллипсоида тензора дисперсии скоростей согласуются с результатами Пасетто и др. (2012), но противоречат оценке, полученной в работе (Фучи и др., 2009), авторы которой оценили величину угла отклонения около 20 – 25° .

Для оценки величины “асимметричного дрейфа” для толстого диска Галактики в околосолнечной окрестности был выделен цилиндр высотой $|z| \leq 0.2$ кпк и радиусом $R = 1$ кпк, в котором были

выбраны звезды с металличностью $[Fe/H] \geq -0.4$ dex и со значениями компоненты скорости, перпендикулярной плоскости галактического диска $V_z \leq 15$ км с⁻¹. В результате из каталога UCAC4 было отобрано 13467 звезд, из каталога PPMXL – 11154 звезды, а из каталога TYCHO2 – 10368 звезд, преимущественно принадлежащих тонкому диску Галактики.

Выборки звезд тонкого и толстого дисков были разбиты на группы по высотам над плоскостью симметрии Галактики и для каждой группы звезд определена усредненная вращательная скорость. Как оказалось, вращательная скорость тонкого диска Галактики в пределах $|z|$ от 0 до 200 пк постоянна. Средняя вращательная скорость звезд тонкого диска составляет для каталога UCAC4 $\langle \bar{V}_{\theta thin} \rangle = 204.9 \pm 0.2$ км с⁻¹, для PPMXL $\langle \bar{V}_{\theta thin} \rangle = 203.3 \pm 0.2$ км с⁻¹ и для каталога TYCHO2 $\langle \bar{V}_{\theta thin} \rangle = 203.9 \pm 0.2$ км с⁻¹. Средняя скорость вращения звезд толстого диска составляет для каталога UCAC4 $\langle \bar{V}_{\theta thick} \rangle = 183.3 \pm 1.4$ км с⁻¹, для каталога PPMXL $\langle \bar{V}_{\theta thick} \rangle = 181.2 \pm 1.6$ км с⁻¹ и для каталога TYCHO2 $\langle \bar{V}_{\theta thick} \rangle = 179.5 \pm 1.7$ км с⁻¹. Кордопатис и др. (2013) оценили скорость вращения толстого диска Галактики для звезд, находящихся на расстояниях $1 < |z| < 2$ кпк от плоскости галактического диска, получив для вращательной скорости толстого диска Галактики $\langle V_{\theta thick} \rangle = 180$ км с⁻¹. Результат, полученный Кордопатисом и др. (2013), хорошо согласуется с нашими данными. Разница во вращательных скоростях тонкого и толстого дисков Галактики составила по нашим оценкам около 20 км с⁻¹ для всех трех каталогов.

6 Заключение

Анализ пространственно-кинематических характеристик толстого диска Галактики позволил сделать следующие выводы:

1. Значение дисперсии скоростей звезд толстого диска Галактики в радиальном направлении равно: по данным каталога UCAC4 $\sigma_R = 53 \pm 2$ км с⁻¹, по данным каталога PPMXL $\sigma_R = 59 \pm 2$ км с⁻¹ и по данным каталога TYCHO2 $\sigma_R = 55 \pm 2$ км с⁻¹.
2. Для всех каталогов среднее значение скорости звезд толстого диска в радиальном направлении отлично от нуля и составляет: $\langle \bar{V}_R \rangle = -7 \pm 2$ км с⁻¹ для каталога UCAC4, $\langle \bar{V}_R \rangle = -7 \pm 1$ км с⁻¹ для каталога PPMXL и $\langle \bar{V}_R \rangle = -10 \pm 1$ км с⁻¹ для каталога TYCHO2. Ненулевое значение усредненной скорости звезд толстого диска Галактики в радиальном направлении наиболее вероятно объясняется вовлеченностью Солнца в движение, связанное с наличием спиральных рукавов Галактики.
3. Распределение скоростей звезд толстого диска Галактики в направлении вращения диска асимметрично для всех трех каталогов. Вероятным объяснением асимметрии распределения скоростей звезд является наличие в толстом галактическом диске групп звезд с различными дисперсиями скоростей.
4. Значение скорости вращения тонкого диска Галактики в окрестности Солнца составляет: для каталога UCAC4 $\langle \bar{V}_{\theta thin} \rangle = 204.7 \pm 0.2$ км с⁻¹, для PPMXL $\langle \bar{V}_{\theta thin} \rangle = 202.6 \pm 0.2$ км с⁻¹, для TYCHO2 $\langle \bar{V}_{\theta thin} \rangle = 202.9 \pm 0.2$ км с⁻¹. Средняя скорость вращения звезд толстого диска Галактики в околосолнечной окрестности равна: по данным каталога UCAC4 $\langle \bar{V}_{\theta thick} \rangle = 182.8 \pm 1.4$ км с⁻¹, для каталога PPMXL $\langle \bar{V}_{\theta thick} \rangle = 180.8 \pm 1.5$ км с⁻¹, для TYCHO2 $\langle \bar{V}_{\theta thick} \rangle = 179.5 \pm 1.7$ км с⁻¹. Скорость вращения толстого диска Галактики в пределах $|z| = 0.5$ кпк не зависит от координаты z .
5. Величина “асимметричного дрейфа” для звезд толстого диска в околосолнечной окрестности приблизительно равна 20 км с⁻¹ по данным всех трех каталогов. Малое значение величины “асимметричного дрейфа” для малометаллических звезд толстого диска согласуется с результатом работы (Фучс и др., 2009) и указывает на большее значение пространственного масштаба изменения плотности и дисперсии скоростей в толстом диске Галактики в радиальном направлении по сравнению с пространственными масштабами для тонкого галактического диска.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки 3.858.2017/ПЧ.

Литература

- Бинни и др. (Binney J., Burnett B., Kordopatis G., et al.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2014. V. 439. P. 1231.
- Бусер, Ронг (Buser R., Rong J.) // *Unsolved Problems of the Milky Way. IAU Symp. N. 169.* / Eds Blitz L. and Teuben P. The Hague: Kluwer Academic Publ. 1996. P. 427.
- Вильямс и др. (Williams M.E.K., Steinmetz M., Binney J., et al.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2013. V. 436. P. 101.
- Закариас и др. (Zacharias N., Urban S.E., Zacharias M.I., et al.) // *Astron. J.* 2004. V. 127. P. 3043.
- Закариас и др. (Zacharias N., Finch C., Girard T., et al.) // *Astron. J.* 2010. V. 139. P. 2184.
- Закариас и др. (Zacharias N., Finch C.T., Girard T.M., et al.) // *Astron. J.* 2013. V. 145. P. 44.
- Казетти-Динеску и др. (Casetti-Dinescu D.I., Girard T.M., Korchagin V.I., et al.) // *Astrophys. J.* 2011. V. 728. P. 7.
- Каролло и др. (Carollo D., Beers T.C., Chiba M., et al.) // *Astrophys. J.* 2010. V. 712. P. 692.
- Кордопатис и др. (Kordopatis G., Recio-Blanco A., Laverny P. de, et al.) // *ASP Conf. Ser.* 2012. V. 458. P. 175.
- Кордопатис и др. (Kordopatis G., Gilmore G., Steinmetz M., Boeche C., et al.) // *Astron. J.* 2013. V. 146. P. 134.
- Пасетто и др. (Pasetto S., Grebel E.K., Zwitter T., et al.) // *Astron. Astrophys.* 2012. V. 547. id. A70.
- Рейд (Reid M.J.) // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1993. V. 31. P. 345.
- Рикс, Бови (Rix H.-W. and Bovy J.) // *Astron. Astrophys. Rev.* 2013. V. 21. id. 61.
- Розер и др. (Roeser S., Demleitner M., Schilbach E.) // *Astron. J.* 2010. V. 139. P. 2440.
- Собиран и др. (Soubiran C., Bienaymé O., Siebert A., et al.) // *Astron. Astrophys.* 2003. V. 398. P. 141.
- Фурман (Fuhrmann K.) // *The First Stars. MPA/ESO Workshop.* 1999. / Eds Weiss A., Abel T.G., Hill V. New York: Springer. 2000. P. 68.
- Фучс и др. (Fuchs B., Dettbarn C., Rix H.-W., et al.) // *Astron. J.* 2009. V. 137. P. 4149.
- Хог и др. (Hog E., Fabricius C., Makarov V.V., et al.) // *Astron. Astrophys.* 2000. V. 355. P. L27.
- Шонрич и др. (Schonrich R., Binney J., Dehnen W.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2010. V. 403. P. 1829.