

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

УДК 524.62-34, 524.6

КОВАЛЬ Вера Васильевна

**КИНЕМАТИКА И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЗВЕЗД ПОЛЯ
ТОНКОГО ДИСКА ГАЛАКТИКИ**

01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико–математических наук

Нижний Архыз– 2014

Работа выполнена в Южном федеральном университете

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Марсаков Владимир Андреевич
ведущий научный сотрудник
(НИИФ ЮФУ)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Бобылев Вадим Вадимович
заведующий лабораторией динамики Галактики
(ГАО РАН)

доктор физико-математических наук,
профессор
Расторгуев Алексей Сергеевич
заведующий отделом изучения Галактики
и переменных звезд
(ГАИШ МГУ)

Ведущая организация: Санкт-Петербургский
государственный университет

Защита состоится "____" _____ 2014 г. в ____ часов на заседании
Диссертационного совета Д 002.203.01 при Специальной Астрофизической
Обсерватории РАН по адресу: 369167, КЧР, Зеленчукский район, пос.
Нижний Архыз.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан "____" _____ 2014 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

Шолухова О.Н.

Актуальность темы исследования

Восстановление химической и динамической эволюции Галактики является одной из актуальнейших задач современной астрофизики. Продолжительность существования подсистемы тонкого галактического диска сопоставимо с возрастом самой Галактики, поэтому мы можем попытаться отследить изменение с возрастом как кинематики составляющих его звезд, так и их химического состава. Скорости звезд разного возраста несут в себе информацию о динамических процессах, происходивших в подсистеме, тогда как химический состав – о процессах обогащения тяжелыми элементами межзвездной среды, из которой эти звезды впоследствии образовались. Именно поэтому звезды поля выбраны нами в качестве основного предмета исследования. В первую очередь это долгоживущие F–G-карлики, которые составляют абсолютное большинство среди близких звезд и для которых возможно проведение трехмерной классификации исключительно по фотометрическим данным. Это позволяет малыми затратами наблюдательного времени получать необходимые данные для большого числа звезд. Поскольку различные химические элементы синтезируются в звездах разных масс и выбрасываются в межзвездную среду на разных временах, по их содержаниям в атмосферах новых поколений звезд можно отследить историю звездообразования в галактическом диске. Наряду с F–G-карликами и гигантами с их широким разбросом возрастов, весьма информативными оказываются массивные звезды – цефеиды. Хотя эти звезды и находятся на продвинутой стадии своей эволюции, но химический состав их атмосфер для большинства химических элементов не претерпел заметных изменений. Благодаря своей молодости эти звезды недалеко ушли от мест своего рождения, поэтому по ним можно судить не только о недавних этапах звездообразования, но и о степени однородности межзвездного вещества.

Для выявления новых и уточнения уже известных в тонком галактическом диске закономерностей одним из наиболее надежных методов является комплексный статистический анализ химических, физических и пространственно–кинематических характеристик звезд поля. Для его проведения необходимо иметь большой набор качественных звездных данных. Поскольку в последнее время появились весьма надежные глубокие обзоры звезд с астрометрическими, спектральными и фотометрическими данными, такие исследования в настоящее время являются особенно актуальными.

Цель и задачи исследования

Целью данного исследования было выявление характера зависимостей от возраста параметров эллипсоидов скоростей и средней металличности по карликам тонкого диска, а также сравнительный анализ зависимостей от металличности относительных содержаний химических элементов, произведенных в различных процессах ядерного синтеза, в цефеидах, карликах и гигантах тонкого галактического диска.

Для заявленных целей были поставлены и решены следующие задачи:

- модификация методики отбора звезд, принадлежащих тонкому галактическому диску;
- составление репрезентативной выборки F–G-карликов поля тонкого диска Галактики на основе данных женевско–копенгагенского обзора и анализ в ней селекционных эффектов;
- разработка кодов вычисления параметров эллипсоидов скоростей звезд по различным наблюдательным данным;
- исследование свойств параметров эллипсоидов скоростей и функции металличности звезд тонкого диска;
- анализ влияния радиальных миграций звезд на ход исследуемых зависимостей;
- создание сводных каталогов спектроскопических определений содержаний различных химических элементов, в цефеидах, карликах и гигантах поля;
- сравнительный анализ содержаний химических элементов звездных населений тонкого диска разного возраста.

Научная новизна

Все результаты диссертации, выносимые на защиту, были получены по оригинальным, корректно составленным выборкам звезд, и являются новыми.

- Модифицирована методика вычисления вероятности принадлежности звезд поля подсистеме тонкого диска Галактики, учитывающая не только кинематику, но и химический состав звезд.

- Впервые по корректно составленной выборке звезд поля тонкого диска получены зависимости дисперсии скоростей звезд от возраста и определены величины компонент скорости Солнца относительно местного стандарта покоя.
- Показано, что радиальная миграция в сочетании с отрицательным градиентом металличности в тонком диске приводит к существованию у близких звезд отрицательной корреляции между металличностью и угловым моментом.
- Обнаружено, что примерно 4 – 5 млрд. лет назад металличность в тонком диске стала монотонно увеличиваться, тогда как на начальных этапах формирования подсистемы металличность звезд практически не зависела от возраста.
- Продемонстрировано, что радиальная миграция звезд не приводит к заметному искажению хода зависимости металличности от возраста.
- Статистически достоверно показано, что в классических цефеидах поля относительные содержания всех элементов от скорости не зависят, но увеличиваются с увеличением галактоцентрического расстояния и уменьшаются с увеличением металличности как у карликов и гигантов тонкого диска. Обнаружены значимые различия в относительных содержаниях химических элементов в цефеидах, гигантах и карликах поля.

Научная и практическая значимость работы

- Написанные программы, дают возможность определять параметры эллипсоидов скоростей звезд тремя различными способами, в зависимости от имеющихся данных для звезд: по лучевым скоростям, по собственным движениям и по пространственным скоростям звезд.
- Модифицированный метод выделения одиночных звезд подсистемы тонкого диска, позволяет получить наиболее полную выборку звезд, принадлежащих данной подсистеме
- Результаты исследования можно использовать для построения модели химической и динамической эволюции тонкого галактического диска и анализа пространственного распределения химических элементов в окрестностях Солнца.

- Составленная и опубликованная выборка классических цефеид с однородными данными параметров атмосфер, содержаний ряда химических элементов, а также пространственных и кинематических параметров можно использовать как для изучения процессов внутри звезд, так и для химической эволюции галактического диска.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Вывод о том, что зависимости от возраста величин большой, средней и малой полуосей эллипсоидов скоростей, а также дисперсии полной остаточной скорости звезд тонкого диска после корректного отбора их в подсистему подчиняются степенному закону с показателями степени примерно 0.25.
2. Результат, что у близких к Солнцу звезд с уменьшением металличности скорость вращения вокруг галактического центра в среднем монотонно увеличивается, а не уменьшается и вывод о том, что за данную корреляцию ответственна радиальная миграция совместно с отрицательным градиентом металличности в тонком диске.
3. Вывод о том, что средняя металличность в первые несколько миллиардов лет формирования подсистемы тонкого диска Галактики остаётся практически постоянной, тогда как дисперсия металличности быстро уменьшается. Но примерно 4 – 5 млрд. лет назад у новых поколений звезд средняя металличность начинает монотонно возрастать при постоянной дисперсии металличности.
4. Результат, что относительные содержания всех α -элементов в цефеидах демонстрируют более низкие отношения, а элементов s - и r -процессов более высокие, чем у карликов и гигантов тонкого диска. Одновременно все перечисленные элементы и в цефеидах и в других звездах демонстрируют уменьшение относительных содержаний с ростом металличности.

Реализация результатов работы

Результаты диссертации нашли отражение в отчетах по НИР, выполненных по планам НИИ физики и кафедры физики космоса ЮФУ, а также по грантам РНП, 02.740.11.0247,И; РНП,2.1.1/1937,И; РФФИ 11-02-00621-а,И.

Апробация результатов

Основные результаты исследования были представлены:

- на астрофизических семинарах:
 - Кафедры физики космоса и отдела космических исследований НИИ физики Южного федерального университета.
 - САО РАН.
- на международных конференциях:
 - «Chemical and dynamical evolution of Stars and Galaxies» (2008, г. Одесса, Украина).
 - «Galaxies: origin, dynamics, structure astrophysical disks» (2012, г. Сочи).
 - «13-th Odessa International Astronomical Gamov's Conference–School» (2013, г. Одесса, Украина).
- на всероссийских научных конференциях
 - XXXVI студенческая научная конференции «Физика космоса» (2007 г., г. Екатеринбург, Астрономическая обсерватория УрГУ).
 - Тринадцатая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-13) (2007, г. Таганрог).
 - Всероссийская научная конференция «Химическая и динамическая эволюция галактик» (2009, г. Ростов-на-Дону).
 - XXXIX студенческая научная конференции «Физика космоса» (2010 г., г. Екатеринбург, Астрономическая обсерватория УрГУ).
 - Ежегодная научная конференция студентов и аспирантов базовых кафедр южного научного центра РАН (2010, г. Ростов-на-Дону).
 - XXXX студенческая научная конференции «Физика космоса» (2011 г., г. Екатеринбург, Астрономическая обсерватория УрГУ).
 - Всероссийская конференция «Галактики привычные и неожиданные» (2013, г. Ростов-на-Дону).
 - Всероссийская конференция «Современная звездная астрономия» (2013, г. Санкт-Петербург).

Степень достоверности

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

- использованием наиболее точных из опубликованных звездных данных;
- корректным составлением репрезентативных выборок звезд диска с объемами, достаточными для получения статистически надежных результатов;
- учетом селекционных эффектов при анализе обнаруженных закономерностей;
- сравнением получаемых результатов с опубликованными другими авторами;
- цитированием.

Личный вклад автора

Автору полностью принадлежат анализ наблюдательных данных, разработка критериев отбора звезд и составление выборок, а также разработка алгоритмов, написание и отладка всех численных кодов. Постановка задач, интерпретация полученных результатов и формулировка выводов всех работ автору принадлежит равноправно с соавторами.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 102 наименований, 24 рисунков. Общий объем диссертации 121 страница.

Во введении обоснована актуальность темы исследования; определены цели исследования; указаны научная новизна и практическая значимость; приведены положения, выносимые на защиту; отмечен личный вклад диссертанта; приведен список публикаций автора.

В первой главе на основе данных обновленной версии женево-копенгагенского каталога исследованы зависимости параметров эллипсоидов скоростей F–G-звезд тонкого диска Галактики от возраста и металличности. Показано, что зависимости от возраста величин большой,

средней и малой полуосей эллипсоидов, а также дисперсии полной остаточной скорости подчиняются степенному закону с показателями степени, соответственно, 0.25, 0.29, 0.32 и 0.27 (при неопределенностях ± 0.02). Аналогичные показатели для всех близких звезд из-за присутствия среди них объектов толстого диска получаются в полтора раза больше, тогда как именно такие величины обычно пытаются объяснить, моделируя релаксационные процессы в галактическом диске. Удаление из выборки звезд наиболее многочисленных движущихся групп еще несколько уменьшает соответствующие показатели (0.22, 0.26, 0.27 и 0.24). Ограничение же выборки расстоянием 60 пк от Солнца, в пределах которого выборку звезд можно считать полной, практически не приводит к изменению ни величин параметров эллипсоидов скоростей, ни их зависимостей от возраста. Показано, что с увеличением возраста эллипсоид скоростей увеличивается в размерах, едва заметно округляет форму, похоже слегка поворачивается в направлении галактического центра и теряет угловой момент. Причем форма эллипсоида скоростей всегда остается далекой от равновесия. Одновременно продемонстрировано, что эллипсоид скоростей звезд смешанного возраста по мере уменьшения металличности увеличивается в размерах, обнаруживает слабую тенденцию к увеличению сферичности и разворачивается в направлении на галактический центр (причем при переходе через значение $[Fe/H] \approx -0.25$ эти изменения происходят заметно быстрее). Т.е. эллипсоид ведет себя подобно изменению с возрастом, но с уменьшением металличности скорость вращения вокруг галактического центра у звездных групп монотонно увеличивается, а не уменьшается. Кроме того обнаружено, что показатели степени зависимостей от возраста величин полуосей зависят от металличности и демонстрируют максимум в окрестности $[Fe/H] \approx -0.1$. Причем зависимости от возраста всех параметров эллипсоидов скоростей звезд разной металличности ведут себя примерно одинаково. Высказано предположение, что возникновение в тонком галактическом диске зависимости параметров эллипсоидов скоростей от металличности обуславливается, скорее всего, радиальной миграцией звезд.

Во второй главе исследовано влияние радиальной миграции звезд на зависимости от возраста параметров эллипсоидов скоростей близких звезд в тонком диске Галактики, полагая при этом неизменными средние радиусы звездных орбит. Продemonстрировано, что именно радиальная миграция совместно с отрицательным градиентом металличности в тон-

ком диске ответственна за наблюдаемую для близких звезд отрицательную корреляцию между их металличностью и угловым моментом, тогда как у звезд, рожденных на одинаковых галактоцентрических расстояниях, угловой момент не зависит ни от возраста, ни от металличности. По звездам, рожденным на солнечном галактоцентрическом расстоянии, показано, что компоненты скорости Солнца относительно местного стандарта покоя равны $(U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot})_{LSR} = (5.1 \pm 0.4, 7.9 \pm 0.5, 7.7 \pm 0.2)$ км с⁻¹. При этом обе координаты апекса солнечного движения все время остаются в пределах ошибок равными $\langle l_{\odot} \rangle = 70^{\circ} \pm 7^{\circ}$ и $\langle b_{\odot} \rangle = 41^{\circ} \pm 2^{\circ}$. Показатели степени зависимостей от возраста величин большой, средней и малой полуосей стали равными 0.26 ± 0.04 , 0.32 ± 0.03 и 0.07 ± 0.03 соответственно. В итоге оказалось, что с увеличением возраста эллипсоид скоростей звезд тонкого диска, рожденных на солнечном галактоцентрическом расстоянии, увеличивается в размерах только в плоскости диска, тогда как в перпендикулярном ему направлении остается практически неизменным. Форма его все время остается далека от равновесной, а направление его большой полуоси не меняется с возрастом – эллипсоид все время сохраняет одинаковое и в пределах неопределенностей равное нулю отклонение вертекса ($\langle L \rangle = 0.7^{\circ} \pm 0.6^{\circ}$, $\langle B \rangle = 1.9^{\circ} \pm 1.1^{\circ}$). Столь малое увеличение с возрастом дисперсии скоростей в направлении перпендикулярном галактическому диску можно, по-видимому, объяснить «разогреванием» звездной системы лишь спиральными волнами плотности без привлечения гигантских молекулярных облаков.

В третьей главе используя тригонометрические HST расстояния, фотометрические металличности и изохронные возрасты из женево–копенгагенского обзора, а также однородные спектроскопические определения содержаний железа и магния из сводного каталога использованы для построения и исследования диаграмм «возраст – металличность» и «возраст – относительное содержание магния» для звезд тонкого диска. Подробно обсуждено влияние селекционных эффектов. Продемонстрировано, что радиальная миграция звезд не приводит к значимому искажению хода зависимости металличности от возраста. Показано, что первые несколько миллиардов лет формирования тонкого диска межзвездное вещество в нем было в среднем довольно богато тяжелыми элементами ($\langle [Fe/H] \rangle \approx -0.2$) и плохо перемешано, но с возрастом дисперсия металличности непрерывно уменьшалась от $\sigma_{[Fe/H]} \approx 0.22$ до ≈ 0.13 . Все это время среднее относительное содержание магния было несколько выше

солнечного ($\langle [Mg/Fe] \rangle \approx 0.1$). Примерно 4 – 5 млрд. лет назад средняя металличность стала систематически увеличиваться, сохраняя неизменной дисперсию, а вслед за этим среднее относительное содержание магния начало уменьшаться. Одновременно, численность звезд в подсистеме резко увеличилась. Перечисленные свойства можно объяснить тем, что низкая на начальных этапах формирования тонкого галактического диска скорость звездообразования внезапно увеличилась около 4–5 млрд. лет назад.

В четвертой главе на основе созданного сводного каталога, содержащего для 221 классической цефеиды положения, скорости, возрасты и содержания 9 химических элементов, исследованы зависимости относительных содержаний α -элементов, а также элементов быстрого и медленного нейтронных захватов от металличности, компонент пространственной скорости и галактоцентрического расстояния. Найдено, что относительные содержания всех элементов в цефеидах от скорости не зависят, но увеличиваются с увеличением галактоцентрического расстояния и уменьшаются с увеличением металличности как и у карликов и гигантов тонкого диска. Однако у цефеид зависимость $\langle [\alpha/Fe] - [Fe/H] \rangle$ лежит ниже, а зависимости $\langle [r/Fe] - [Fe/H] \rangle$ и $\langle [s/Fe] - [Fe/H] \rangle$ — выше, чем аналогичные последовательности у карликов и гигантов. Выдвинуто предположение, что после достижения в межзвездной среде тонкого диска примерно солнечной металличности самые массивные звезды перестали вспыхивать как сверхновые второго типа, которые в основном и обогащали межзвездную среду α -элементами. В итоге в следующих поколениях звезд образовался дефицит относительных содержаний α -элементов, а также небольшой избыток элементов r -процесса, которые выбрасываются в межзвездную среду менее массивными $(8 - 10)M_{\odot}$ сверхновыми второго типа. Избыток в цефеидах элементов s -процесса можно объяснить тем, что часть s -элементов производилась в слабом компоненте s -процесса в атмосферах массивных звезд, которые, возможно, и без взрыва могут сбрасывать верхние части своих оболочек подобно АВГ-звездам. Поскольку же такие массивные звезды, взрываясь как SNe II, обогащали межзвездную среду также и значительным количеством атомов железа, то при их отсутствии отношения $[s/Fe]$ (как и $[r/Fe]$) у следующих поколений звезд должны получиться выше.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертации.

Основные публикации по теме диссертации:

1. Коваль В.В., Марсаков В.А. Боркова Т.В. Связь параметров эллипсоидов скоростей звезд галактического диска с возрастом и металличностью // Астрон. Журн., 2009, Т. 86. № 9. С. 844–860.
2. Коваль В.В., Марсаков В.А. Боркова Т.В. Эволюция эллипсоидов скоростей в тонком диске галактики и радиальная миграция звезд // Астрон. Журн., 2009, Т. 86. № 12. С. 1195–1205.
3. Марсаков В.А. Коваль В.В., Боркова Т.В., Шаповалов М.В., Зависимость «возраст–металличность» в тонком диске Галактики // Астрон. Журн., 2011, Т. 88. № 8. С. 726–742.
4. Марсаков В.А. Коваль В.В., Ковтюх В.В., Мишенина Т.В., Свойства населения классических цефеид в Галактике // Письма в Астрон. Журн., 2013, Т. 39. № 12. С. 942–958.
5. Koval' V.V., Borkova T.V., Marsakov V.A. Evolutionary Changes of the Kinematics of the Galactic Thin Disk Stars in the Solar Neighborhood // Odessa Astronomical Publication, 2008, v.21, p.45–47
6. Marsakov V.A., Koval' V.V., Gozha M.L., Kovtyukh V.V., Mishenina T.V. Open clusters and field cepheids in the galactic disk – contradictions in properties // Odessa Astronomical Publication, 2013, v. 26/1, P. 74–77