

О Т З Ы В

**официального оппонента на диссертацию Веры Васильевны КОВАЛЬ
«Кинематика и химический состав звёзд поля тонкого диска Галактики»,
представленную на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия.**

Рецензируемая кандидатская диссертация успешно продолжает традиции астрофизических исследований, проводимых в ЮФУ, главной чертой которых является комплексный анализ пространственного распределения, кинематики и химического состава звёзд и звёздных скоплений Галактики. Имеющийся в настоящее время наблюдательный материал – «всенебесные» каталоги звёздных характеристик, в конечном счёте, базирующиеся на итогах проекта HIPPARCOS, массовые высокоточные определения лучевых скоростей звёзд, надёжные данные не только об общей «металличности», но и о содержании отдельных химических элементов, стимулировал появление большого числа работ по химической и динамической эволюции Галактики. Различия в подходе, использованных моделях и теориях, в базовом наблюдательном материале неизбежно приводили их авторов к противоречивым результатам. Поэтому не удивительно, что по целому ряду вопросов, касающихся эволюции диска Галактики, в научном мире до сих пор нет единого мнения. Необходимость поиска и развития новых подходов и методов комплексного изучения свойств галактических населений обеспечивает *актуальность и своевременность* рецензируемой работы.

Диссертация В.В. Коваль состоит из Введения, 4-х глав, Заключение и списка литературы. Далее, давая краткое описание каждого из разделов диссертации, я буду приводить и соответствующие критические замечания. Но вначале хочу отметить, что первые три главы диссертации базируются, пожалуй, на лучшем современном наблюдательном материале – так наз. Женевско–Копенгагенском обзоре FG–карликов, включающем высокоточные расстояния, светимости, пространственные скорости, металличности и возрасты около 14000 близких звёзд. В 4-й главе используется каталог галактических цефеид, дополненный самыми современными опубликованными спектроскопическими данными о содержании различных химических элементов.

В главе 1 «Связь параметров эллипсоидов скоростей звезд галактического диска с возрастом и металличностью» разработаны возрастные и кинематические критерии отбора FG–карликов из Женевско–Копенгагенского обзора – объектов тонкого диска. Составлена выборка ~4500 звезд с ошибками возраста не более 1 млрд. лет. Ошибки большинства индивидуальных возрастов звезд всё ещё велики, но автору хватило смелости взяться за эту задачу. Определены формы и ориентации эллипсоидов скоростей, сделаны оценки показателей степенного закона для темпа роста дисперсий скоростей со временем, находящиеся в пределах 0.28–0.32 (для разных вариантов выборки), что согласуется с эффектом от транзитных спиральных волн плотности. Хотя они несколько меньше многих прежних оценок, сделанных другими авторами, они согласуются и с гипотезой релаксации. Первая глава завершается анализом зависимостей параметров поля скоростей от металличности. Самый интересный и неожиданный результат – это вывод об общем уменьшении удельного углового момента с увеличением металличности, причем для каждого интервала металличности сохраняется тенденция к уменьшению углового момента с возрастом. Такой эффект можно было бы объяснить формированием звёзд с высокой металличностью преимущественно в центральных областях Галактики и их последующей миграцией наружу, сопровождающейся ростом размеров эпициклов и дисперсии скоростей, хотя картина химической и кинематической эволюции, скорее всего, гораздо сложнее.

На рис. 1.3(к–м) видно, что отставание выборки от LSR (экстраполяция V -компонента на $t=0$) близко к 10–12 км/с, что согласуется с многочисленными оценками для молодых населений диска Галактики. Кажется, однако, странным, что в тексте диссертации и в списке литературы отсутствует ссылка на работу Aumer, Binney (MNRAS V.397, P.1286, 2009), в которой на основе тех же данных делается попытка оценки темпа роста дисперсий. Следовало бы сравнить результаты этой работы с приведёнными в диссертации выводами. Кроме того, хочу отметить, что линейный рост тангенциального компонента скорости $V(t)$ на рис. 1.3(к–м), требует отдельного рассмотрения, т.к. из гидродинамических уравнений Джинса для динамически «перемешанной» выборки следует линейность компонента V по среднему квадрату скорости σ_V^2 , тогда как на упомянутом рисунке (с учетом временного поведения полной дисперсии скоростей) вытекает линейность V по σ_V^4 . Столь серьёзное расхождение с классическими звёздно-динамическими представлениями следовало бы обсудить отдельно.

При обсуждении отношения горизонтальных осей эллипсоида скоростей следует иметь в виду, что они отражают форму эпициклов, и это чисто кинематический эффект в осесимметричной Галактике. Характерное время «эпициклизации» меньше галактического года, что намного меньше рассматриваемых времён и ошибок возраста, поэтому формы эпициклов должны отслеживать квазистационарное состояние Галактики. Отмечу также, что взятые из наших работ по кинематике молодых объектов параметры кривой вращения приводят к оценке $\sigma_2/\sigma_1 \approx 0.60$, что ещё лучше согласуется с приведёнными данными.

Другие замечания.

Стр. 15. Относительно природы потоков Гиад и Плеяд есть альтернативное объяснение, предложенное Чумаком и др. (2006а,б, 2007), отождествляющее потоки со шлейфами родительских скоплений и кажущееся более вероятным в свете современных наблюдательных данных о распаде скоплений.

Стр. 16. Следовало бы обсудить проблему отделения звёзд толстого диска, но сохранения в выборке звёзд старого диска, генетически связанных с тонким диском Галактики.

Стр. 21. Приведен кинематический критерий выделения звезд тонкого диска. Неясно, относительно центроида каких звезд берутся компоненты скоростей: звезд исследуемой выборки (среди которых довольно много старых) или молодых объектов (что было бы более логично). Ссылка на авторство критерия, использующего параметры орбиты (Chiappini et al., 1997), неверна, что, очевидно, является простой опечаткой; правильная ссылка на статью Gratton et al. (2003) есть в статье автора, но почему-то отсутствует в списке литературы к диссертации. Кроме того, при использовании этого критерия следовало бы подробнее остановиться на описании используемой модели Галактики.

Что касается упомянутого здесь и далее критерия Vensby et al. (2003), то гауссово описание распределения остаточных скоростей неплохо для молодых звёзд, в то время как у выборок старых звёзд распределение V -компонентов скорости заметно асимметрично, с явным избытком отрицательных значений (из-за прогрессивного отставания центроидов старых объектов от LSR), т.к. V -распределение скоростей отражает возрастное распределение звёзд выборки. Хочу также заметить, что неоднократно приводимый в тексте термин «асимметричное смещение», являющийся калькой с английского “asymmetric drift”, в русскоязычной литературе лучше заменить на «отставание центроидов от LSR», что правильнее отражает суть явления.

В главе 2 «Эволюция эллипсоидов скоростей в тонком диске галактики и радиальная миграция звезд» даётся интерпретация полученных в 1-й главе закономерностей в рамках гипотезы радиальной миграции звёзд. Анализируются связи кинематических параметров со значениями средних радиусов орбит звёзд выборки, хотя о способе их вычисления в диссертации ничего не говорится. Вывод о том, что угловой момент звезд, находящихся в окрестности Солнца, напрямую зависит от их среднего радиуса орбит (стр. 44, 46), совершенно очевиден и с точки зрения теории эпициклов. На

рис. 2.1(а) дисперсия тангенциальных скоростей почти не зависит от радиуса орбиты, что и должно ожидать. Однако следовало бы оценить влияние конечной ширины интервала усреднения (т.к. значение 15 км/с кажется слишком большим для звёзд с практически одинаковыми угловыми моментами, попадающих в один «бин» расстояния). На основании рис. 2.1(г) даются новые оценки компонентов скорости Солнца относительно LSR, заметно отличающиеся от оценки Dehnen, Binney, 1998 (~5 км/с), от более поздней оценки Schonrich et al., 2010 (~12 км/с) и от оценок, полученных в ряде работ по кинематике молодых объектов (в том числе наших) примерно на 4-5 км/с. В чём может заключаться причина таких различий? В неосесимметричных возмущениях потенциала Галактики, вызывающих радиальные и тангенциальные движения центроидов, или в неучтённых свойствах выборки? Наконец, для групп звёзд с разными средними расстояниями анализируются связи кинематических параметров как с возрастом, так и с металличностью. Показано, что угловой момент в окрестности Солнца определяется преимущественно местом рождения звёзд, а не возрастом и металличностью, и не может служить надёжным индикатором возраста.

Хочу также заметить, что автор диссертации разделяет мнение, что радиальная миграция звёзд вызывается релаксационными процессами и не приводит к изменению удельного углового момента. Я не думаю, что есть веские основания пренебрегать переносом углового момента как за счёт релаксации, так и за счёт транзитных возмущений потенциала. Но, тем не менее, я согласен с тем, что средний радиус орбит (по которым движутся и центры эпициклов) в первом приближении отражает «места рождения» звёзд.

В главе 3 «Зависимость возраст–металличность в тонком диске Галактики» на основе тех же наблюдательных данных предпринята попытка анализа связи возрастов звёзд с их химическим составом. Это давняя проблема звёздной астрономии. В отличие от большинства работ других авторов, автор диссертации учитывает особенности кинематики звёзд, отмеченные в предыдущих главах, в том числе – средние радиусы орбит, несущие информацию о местах формирования звёзд. Подтверждено наличие эффектов миграции, сказывающихся на распределении всех звёзд на диаграмме возраст – металличность. Для звёзд, предположительно родившихся в области «солнечного круга», найдены средние зависимости между общей металличностью и возрастом (уменьшение с возрастом) и относительным содержанием α -элемента магния и возрастом (рост с возрастом). Предложена картина химической эволюции диска Галактики, согласно которой основное обогащение межзвёздной среды тяжёлыми элементами произошло уже на самых ранних стадиях жизни диска, и лишь в последние ~5 млрд. лет процесс ускорился. Наличие большого числа высокометаллических звёзд среди старой популяции объясняется их преимущественным рождением в облаках с повышенным содержанием тяжёлых элементов (что кажется вполне правдоподобным из-за их более эффективного охлаждения). Результаты главы, как мне представляется, вносят вклад в решение так наз. проблемы G-карликов (дефицита старых низкометаллических звёзд диска).

В главе 4 «Свойства населения классических цефеид в Галактике» в основном анализируются содержания разных химических элементов в атмосферах цефеид по опубликованным данным детальной спектроскопии. Рассмотрены связи особенностей «химизма» с пространственным распределением цефеид и их кинематическими характеристиками. Показано, что содержания α -элементов в цефеидах ниже, а элементов нейтронного захвата – выше, чем у других звёзд поля, однако, обращается внимание на возможную роль не-ЛТР эффектов. Подтверждён значительный отрицательный радиальный градиент металличности, найдено некоторое уменьшение металличности с возрастом, обнаружен положительный радиальный градиент α - и s-элементов. Обсуждается относительный вклад Сверхновых разных типов в обогащение межзвёздной среды различными химическими элементами. Сделан вывод о том, что отмеченные особенности неплохо согласуются с общей картиной звездообразования и химической

эволюции, предложенной в 3-й главе. В целом, проведён полезный и грамотный анализ некоторых важных свойств популяции цефеид, обычно оставляемых без внимания. В качестве мелкого замечания к данной главе укажу лишь, что на рис. 4.2(а,б,г) коэффициенты корреляции должны быть отрицательными.

В Заключение сформулированы итоги работы и выносимые на защиту результаты.

Наконец, приведу общие замечания. Во-первых, во всём тексте пунктуация оставляет желать лучшего. Во-вторых, ссылки на работы зарубежных авторов следовало бы сделать единообразными (либо в оригинальном написании фамилии, либо в русской транскрипции), тогда как в тексте диссертации встречаются разные варианты (иногда даже в одном предложении). В начале глав 1–3 целиком повторяется описание используемого каталога FG–карликов.

Характеризуя работу в целом, хочу сказать, что в ней *решается важная научная задача* восстановления истории химической эволюции галактического диска по данным о близких звёздах–карликах разного возраста и о цефеидах, молодых представителях популяции диска. Приводимые в тексте диссертации и в статьях с участием автора результаты в значительной мере проясняют картину и вносят большой вклад в понимание природы и эволюции галактического диска. Многие результаты работы, в том числе выносимые на защиту, являются *оригинальными и новыми*. Использование высококачественного астрофизического наблюдательного материала, результатов современной теории звёздной эволюции, комплексный анализ свойств звёздной выборки, привлечение и использование адекватных методов многомерного статистического анализа данных разной природы обосновывает *достоверность полученных результатов*. Существенные замечания оппонента отражают наличие в астрономическом сообществе альтернативных подходов к данной проблеме и не ставят под сомнение ценность данной работы и её основные результаты; они скорее должны стимулировать дальнейшее исследование этих вопросов, важных для современной астрономии.

Результаты диссертации опубликованы в шести статьях в рецензируемых астрономических изданиях, а автореферат адекватно отражает содержание работы.

Результаты работы имеют *научно-практическое значение* для исследований, проводимых в астрономических учреждениях России и зарубежья, в том числе в ГАИШ МГУ, Южном федеральном университете, Санкт-Петербургском университете, Уральском федеральном университете, ИНАСАН ФАНО, АКЦ ФИ ФАНО, САО ФАНО, ГАО ФАНО (Пулково) и других.

Диссертационная работа В.В. Коваль «Кинематика и химический состав звёзд поля тонкого диска Галактики» полностью соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, указанным в п. 9 Постановления Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. «О порядке присуждения учёных степеней», а ее автор, КОВАЛЬ Вера Васильевна, безусловно, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия.

Отзыв составил официальный оппонент **Алексей Сергеевич РАСТОРГУЕВ**, доктор физико-математических наук, заведующий отделом изучения Галактики и переменных звёзд ГАИШ МГУ, профессор кафедры экспериментальной астрономии МГУ.

Подпись А.С. Расторгуева заверяю.
Директор ГАИШ МГУ, академик РАН



А.С. Расторгуев

А.М. Черепашук

01 апреля 2014 г.