

СОВРЕМЕННАЯ ЗВЕЗДНАЯ АСТРОНОМИЯ – 2023

© 2024 г. О. Ю. Малков^{1,*}, Е. Ю. Кильпио^{2,3}, О. Б. Длужневская¹

¹Учреждение Российской академии наук Институт астрономии, Москва, Россия

²Крымская астрофизическая обсерватория, п. Научный, Россия

³Отделение физических наук Российской академии наук, Москва, Россия

E-mail: malkov@inasan.ru

Поступила в редакцию 12.03.2024 г.

После доработки 23.04.2024 г.

Принята в печать 23.04.2024 г.

Представлен аналитический обзор современного состояния проблем звездной астрономии. Он преимущественно базируется на докладах, сделанных на конференции «Современная звездная астрономия» (ВолГУ, май 2023).

Ключевые слова: звезды, звездные скопления и ассоциации, Галактика Млечный Путь, галактики, межзвездная среда, звездообразование

DOI: 10.31857/S0004629924060086 EDN: JMEELF

1. ВВЕДЕНИЕ

В работе представлен аналитический обзор современного состояния проблем звездной астрономии, созданный преимущественно по материалам докладов, представленных на тринадцатой конференции цикла «Современная звездная астрономия». Она была проведена 15–18 мая 2023 г. в Волгоградском государственном университете (ВолГУ). Помимо ВолГУ организаторами конференции выступили ИНАСАН, ГАИШ МГУ и Астрономическое общество.

Обзор разбит на следующие разделы: «Звезды», «Звездные скопления и ассоциации», «Межзвездная среда и звездообразование», «Строение, кинематика и динамика Галактики», «Галактики». В последнем разделе приведены заключительные замечания.

2. ЗВЕЗДЫ

В докладе А. Ф. Селезнева (УрФУ — Уральский федеральный университет имени первого президента России Б. Н. Ельцина) представлены результаты работы по поиску неразрешенных двойных и кратных звезд в рассеянных звездных скоплениях, выполняемой в УрФУ в сотрудничестве с коллегами из Университета Падуи (Италия). В рамках данной программы разработан метод, основанный на использовании фотометрической диаграммы $[(H - W_2) - W_1] - [W_2 - (BP - K)]$. На этой диаграмме для каждого скопления на основе изохрон PARSEC строятся теоретические изохроны одиночных звезд, двойных звезд с различным отношением

масс компонентов q , тройных и четверных звезд с одинаковыми компонентами. Метод позволяет обнаруживать неразрешенные двойные и кратные звезды в промежуточном диапазоне масс главного компонента, примерно от 0.5 до $1.8M_{\odot}$. С помощью этого метода исследованы рассеянные скопления Альфа Персея, Плеяды, Ясли и NGC 1039. Одна из основных проблем — недостаточно хорошее совпадение изохроны одиночных звезд с последовательностью скопления на фотометрических диаграммах. Для решения этой проблемы предполагается построение эмпирических изохрон. Для поиска неразрешенных двойных и кратных звезд с массой главного компонента более $1.8M_{\odot}$ в близких рассеянных скоплениях предлагается использовать спекл-интерферометрию [1].

О Пулковском каталоге орбит широких визуально-двойных и кратных звезд рассказала Л. Г. Романенко (ГАО РАН — Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН). Каталог основан на многолетних исследованиях (40 лет) по определению орбит визуально-двойных и кратных звезд, полученных группой А. А. Киселева методом параметров видимого движения и содержит результаты определения орбит 64 широких визуально-двойных и кратных звезд. Использовался метод параметров видимого движения (ПВД), позволяющий определить орбиту по короткой дуге, если позиционные наблюдения дополнить данными из литературы о тригонометрическом параллаксе, массах звезд и относительной лучевой скорости в парах. Основой

большинства исследований являются ряды фотографических и ПЗС-наблюдений на 26-дюймовом рефракторе Пулковской обсерватории. Проанализированы данные Gaia DR2, по ним для 7 пар получены первые орбиты, для 19 пар орбиты улучшены. Также перевычислены орбиты еще 12 пар, для 3 пар ПВД-орбиты получены впервые в этом каталоге. В 20-ти случаях квазимгновенное движение по данным Gaia DR2 противоречит среднему движению по общемировым наблюдениям. Возможная причина — присутствие внутренней подсистемы. Разработана единая программа вычислений элементов орбит, их ошибок, эфемерид и ориентации орбит в галактической системе координат по алгоритмам А. А. Киселева [2].

М. Д. Минглибаевым (Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Астрофизический институт им. В. Г. Фесенкова, Казахстан) представлены результаты исследований эффекта влияния переменности массы центральной звезды на эволюцию планетной системы. Работа выполнялась учеными Казахского национального университета им. Аль-Фараби и Астрофизического института им. Фесенкова (Казахстан) в сотрудничестве с коллегами из Варшавского университета естественных наук (Польша). Исследовалась планетная система, состоящая из сферически-симметричной родительской звезды с изотропно изменяющимися массами, и большим количеством сферически-симметричных планет с постоянными массами. Масса центральной звезды меняется изотропно по заданным известным законам. Проблема описывается в рамках n планетной задачи $n + 1$ тел с изотропно изменяющимися массами центральной звезды. Использовались разработанные авторами методы канонической теории возмущения в аналогах переменных Пуанкаре с использованием метода компьютерной алгебры. Путем осреднения по средним долготам выведены эволюционные уравнения в общем виде для любых n в нерезонансном случае. В настоящей работе в явном виде получены эволюционные уравнения при $n = 3$ для исследования экзопланетной системы K2-3. Численными методами изучены различные треки эволюции оскулирующих элементов. Проанализирована динамика этой системы в различных законах изменения масс центральной звезды.

О. Н. Шолуховой (САО РАН — Специальная астрофизическая обсерватория РАН) представлены результаты работы, выполненной в САО РАН (в сотрудничестве с Н. А. Тихоновым), по поиску массивных звезд в галактиках за пределами Местной группы на примере карликовой галактики КК 135. Была проведена звездная фотометрия полей этой

галактики по изображениям космического телескопа Хаббла (HST) в фильтрах F606W and F814W, построены CM-диаграммы. Определено расстояние до нее и оценена металличность. Звездные скопления с яркими голубыми звездами, найденные по HST снимкам, сравнивались с положением H α областей на снимках телескопа БТА САО РАН. Отобрана одна звезда и для нее проведены ее фотометрические и спектральные наблюдения на 6-метровом телескопе БТА САО РАН (спектрограф SCORPIO-2). Светимость звезды $M_V = -8.8$, в спектре обнаружены эмиссионные линии водорода с профилем P Cуг и линии окружающей туманности. Пока нельзя однозначно сказать, это кратная звезда или компактное скопление.

Другая работа, выполненная коллективом ученых САО РАН и представленная Ю. Н. Соловьевой, посвящена поиску ярких голубых переменных за пределами Местной группы. Яркие голубые переменные (LBVs — Luminous Blue Variables) представляют собой малочисленный тип массивных звезд, обладающих высокой светимостью и сильной фотометрической и спектральной переменностью. К 2018 г. было открыто всего около 40 звезд этого типа в нашей и других галактиках, в основном принадлежащих Местной группе, тогда как за пределами 1 Мпк было обнаружено лишь несколько LBV звезд. При этом даже среди столь небольшой группы существует значительное многообразие наблюдательных свойств. Для объяснения феномена LBV звезд и прояснения их эволюционного статуса необходимо значительное расширение выборки известных и детально исследованных звезд этого типа. В докладе представлены результаты поиска звезд высокой светимости, в частности ярких голубых переменных, в галактиках за пределами Местной группы (NGC 4736, NGC 247, NGC 4449, NGC 1156 и NGC 891) по спектральным данным БТА САО РАН, SALT (ЮАР) и Subaru (Гавайи), полученным за период с 2014 по 2022 гг. Авторами обнаружены пять новых LBV звезд, пять кандидатов в LBV звезды и один V[e] сверхгигант, что значительно расширяет список известных ярких голубых переменных на таких расстояниях.

А. И. Захаровым (ГАИШ МГУ — Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ им. М. В. Ломоносова) представлены полученные коллективом сотрудников ГАИШ МГУ результаты сравнения фотометрии ярких звезд в обзорах Hipparcos, Tycho, Gaia и WBVR (ГАИШ). Фотометрические части каталогов Hipparcos, Gaia DR2 и DR3 и Тянь-Шаньского WBVR каталога

ГАИШ в настоящее время содержат самые точные в мире данные фотометрии звезд. Немного уступает им каталог Tycho, содержащий 2 фотометрические полосы. Каталоги WBVR, Hipparcos и Tycho содержат только яркие звезды (до 7.5^m , 9^m и 10.5^m соответственно). Из 3-полосного каталога Gaia, включающего звезды примерно до 20^m , были отобраны звезды, входящие в WBVR, Hipparcos или Tycho. Между фотометрией этих каталогов обнаруживаются сложные нелинейные взаимосвязи, зависящие от блеска и показателей цвета звезд, а также от небесных координат. Авторы пытаются объяснить эти особенности.

3. ЗВЕЗДНЫЕ СКОПЛЕНИЯ И АССОЦИАЦИИ

Д. А. Ковалевой (ИНАСАН — Институт астрономии РАН) представлены результаты работы группы ИНАСАН по исследованию следа филамента, эволюционно и кинематически связанного с областью звездообразования в Орионе, обнаруженного в 2019 г. Эта структура была исследована авторами с использованием данных релиза Gaia DR3. Результаты выполненного анализа согласуются с интерпретацией природы выделенной протяженной группы звезд с общим пространственным движением как реликта процесса звездообразования [3].

С. Ж. Тураевым (НУУз — Национальный университет Узбекистана) представлены результаты анализа эмпирических зависимостей массы центральной черной дыры от физических характеристик подсистем спиральных галактик, выполненного группой исследователей из НУУз (С. Ф. Ботировым и С. Н. Нуритдиновым). Авторы используют доступные к настоящему моменту и имеющие достаточную точность данные о центральных сверхмассивных черных дырах (СЧД) в 54 спиральных галактиках. К сегодняшнему дню установлена (разными исследователями, в том числе и авторами данной работы) зависимость массы СЧД от массы и светимости балджа, а также дисперсии скоростей звезд в нем, однако соотношения, определенные разными авторами, различаются существенным образом. Наиболее важным было открытие тесной корреляции между массой СЧД и дисперсией скоростей звезд балджа родительской галактики. На основе найденных корреляций со светимостью и массой балджа широко распространено мнение о том, что СЧД и балджи эволюционируют совместно, регулируя изменения указанных характеристик друг друга. В отличие от ряда других исследователей, авторы данной работы рассматривали

только спиральные галактики и на основе данных для подсистем этих галактик выявили и исследовали новые эмпирические соотношения.

Ф. Т. Шамшиев (НУУз) рассмотрел случаи дальнейшей интегрируемости уравнений движения при наличии локального интеграла в пространственной модели. Ранее был введен локальный интеграл, позволяющий сразу определять поле скоростей для некоторых конкретных начальных условий. Было продолжено рассмотрение разных вариантов частичной интегрируемости задачи о движении в трехмерном потенциальном поле. Один частный случай локального интеграла асимптотически приводит на больших расстояниях r к потенциалу с почти сферической симметрией. Найдены поверхности $L(x,y,z) = \text{const}$, дающие границы области движения близкие к сферам [4].

4. МЕЖЗВЕЗДНАЯ СРЕДА И ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЕ

М. В. Султановым (ЧелГУ — Челябинский государственный университет) были представлены выполненные в ЧелГУ результаты магнитогазодинамического (МГД) моделирования эволюции молекулярных волокон. С помощью хорошо известного специалистам численного кода FLASH, использующего метод уточнения адаптивной сетки, авторами было выполнено численное МГД моделирование гравитационного коллапса и фрагментации цилиндрического молекулярного облака с крупномасштабным магнитным полем и, на основе расчетов, определены характеристики образующихся ядер молекулярного облака. В рассматриваемой модели магнитное поле направлено вдоль цилиндра и имеет интенсивность $B = 1.9 \times 10^{-4}$ Гс. Температура газа $T = 10$ К, показатель адиабаты $\gamma = 5/3$, концентрация $n = 10^5 \text{ см}^{-3}$. В расчетах с магнитным полем и без магнитного поля на концах облака формируются ядра с концентрациями $n \approx 1.3 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$ и $3.7 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$ соответственно. Ядра передвигаются к центру со скоростью $v \approx 5.5 \text{ км/с}$, их размеры вдоль радиуса и оси волокна составляют соответственно 0.16 пк и 0.05 пк для случая с магнитным полем, 0.06 пк и 0.05 пк для случая без магнитного поля. Указанные свойства ядер обусловлены тем, что магнитное поле параллельно волокну и поэтому не оказывает сильного влияния на сжатие вдоль цилиндра, однако оно препятствует сжатию вдоль радиуса цилиндра. Проведенные расчеты позволяют оценить роль магнитного поля на ранних стадиях фрагментации молекулярных волокон [5].

В своем докладе В. В. Королев (ВолГУ) рассказал о результатах моделирования турбулентных течений межзвездной среды в галактических дисках в окрестностях спиральных рукавов галактик. В рамках двумерного приближения было исследовано трансзвуковое движение среды в гравитационном поле диска и рукава, на которое влияют два типа источников турбулентности: протяженный — в диске, и компактный — внутри спирального рукава. Модель межзвездной среды (МЗС) включает газовый и пылевой компоненты. Были учтены эффекты неадиабатичности МЗС, которые обеспечивают фазовые превращения и баланс холодных и теплой фаз газа. Пылевой компонент рассматривался как пассивная полидисперсная примесь в газе, частицы которой обладают инерцией и не повторяют в точности движение объемлющей среды. Показано, что галактическая ударная волна формируется несмотря на турбулентные возмущения и имеет уплощенную (прижатую к плоскости симметрии) V- или даже Y-образную форму: в центре рукава располагается практически плоская часть фронта, а в вытекающем из рукава потоке расположена V-образная часть. При этом наиболее плотные скопления пыли локализуются на входе в рукав (и в головной части ударной волны), что можно интерпретировать по аналогии с наблюдениями как темные прожилки на передних кромках рукавов.

Доклад А. П. Топчиевой (ИНАСАН) был посвящен результатам исследования тепловой структуры протопланетного диска при возможном испарении пыли. Тепловая неустойчивость аккреционных дисков часто используется для объяснения активности катаклизмических переменных, однако ее проявление в газопылевых дисках у молодых звезд ранее исследовалось менее подробно. Автором представлена полуаналитическая стационарная модель для расчета экваториальной температуры газопылевого диска вокруг молодой звезды. В модели учитывается непрозрачность, обусловленная пылью и газом, а также испарение пыли при температурах свыше 1000 К. Рассчитаны распределения экваториальной температуры газопылевого диска при различных предположениях об источнике непрозрачности и присутствия пыли. Показано, что при учете всех рассмотренных процессов уравнение теплового баланса в области $r < 1$ а. е. имеет множественные температурные решения. Полученные результаты показывают, что в этой области реализуются условия для тепловой неустойчивости. В качестве иллюстрации

возможного влияния неустойчивости на характер аккреции в протопланетном диске рассмотрена модель вязкого диска с α -параметризацией турбулентной вязкости. Продемонстрировано, что в такой модели реализуется нестационарный режим эволюции диска с чередующимися фазами накопления вещества во внутреннем диске и фазами его быстрого сброса на звезду, что приводит к вспышечному характеру аккреции. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости учета данной неустойчивости при моделировании эволюции протопланетных дисков.

Е. О. Васильевым (АКЦ ФИАН — Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева РАН) представлены результаты исследований дисперсии скоростей ионизованного газа в областях звездообразования. Ионизованный газ в областях звездообразования ближайших карликовых галактик характеризуется определенной зависимостью между светимостью в рекомбинационных линиях водорода и дисперсией скоростей. В рамках численной модели рассчитаны эти величины для расширяющегося пузыря, образованного вспышками сверхновых. Проведены анализ диаграммы [интенсивность в линии $H\alpha$]—[дисперсия скоростей] для эволюционирующего пузыря в диске с разной шкалой высоты и выполнено сравнение с наблюдательными данными [6].

5. СТРОЕНИЕ, КИНЕМАТИКА И ДИНАМИКА ГАЛАКТИКИ

Е. С. Постниковой (ИНАСАН) представлены результаты исследования кинематической структуры звездного населения околосолнечных окрестностей по данным Gaia DR3. Данные современных каталогов позволяют детально рассмотреть вопрос распределения направлений векторов пространственных скоростей. Наиболее близко расположенные звезды в окрестностях Солнца позволяют избежать ошибок и сделать подробные выводы о их кинематике. Для подробного исследования была взята выборка звезд из каталога Gaia DR3, находящихся на расстоянии не более 300 пк. Эта область содержит в себе ряд скоплений и потоков. Авторами было обнаружено, что в очерченных окрестностях направление звезд разделяется на несколько обширных концентраций, апекс движения которых лежит в направлении движения Солнца и в направлении движения группы Большой Медведицы, которая в свою очередь разделяется на две отдельные группы по направлению в

пространстве. Кроме того обнаружена группа звезд, которые по своим кинематическим характеристикам скорее всего являются звездами гало или балджа, также обнаружены и высокоскоростные звезды, сделаны предположения о природе этих звезд.

В. В. Бобылевым (ГАО РАН) дана оценка скорости вращения спирального узора Галактики, полученная по различным звездным выборкам. Для определения скорости вращения спирального узора Галактики использовались найденные авторами ранее оценки амплитуд скоростей возмущения f_R и f_θ , вызванного влиянием спиральной волны плотности. Эти оценки были получены по нескольким звездным выборкам, а именно: по галактическим мазерам с измеренными РСДБ-методом тригонометрическими параллаксами и собственными движениями; по OB2-звездам; по цефеидам; по рассеянным звездным скоплениям. С использованием этих данных получены новые оценки угловой скорости вращения спирального узора Галактики Ω_p и значения радиуса коротации R_{cor} .

Доклад А. Т. Байковой (ГАО РАН) посвящен анализу влияния галактического бара на орбитальное движение шаровых скоплений в центральной области Галактики. Для этой задачи было отобрано 45 шаровых скоплений, 34 из которых принадлежат балджу и 11 — диску. Для формирования 6D-фазового пространства, требуемого для интегрирования орбит, использованы самые точные на сегодняшний день астрометрические данные со спутника Gaia, а также новые уточненные средние расстояния. Проинтегрированы орбиты шаровых скоплений на 2.5 млрд. лет назад во времени как в осесимметричном потенциале, полученном в результате подгонки параметров балджа, диска и сферического гало к кривой вращения Галактики, так и в потенциале, включающем бар в виде трехосного эллипсоида. Произведен частотный анализ орбит при различных значениях скорости вращения бара с целью выявления шаровых скоплений, захваченных баром. Выявлены закономерности в распределении доминантных частот f_x, f_z и f_R осцилляций скоплений по координатам x, z и цилиндрическому расстоянию R в зависимости от скорости вращения бара [7].

В докладе А. В. Хоперкова (ВолГУ) обсуждалась гипотеза о падении на нашу Галактику спутника примерно 10 млрд. лет назад. На этот мерджинг указывает анализ данных проекта Gaia, который выделяет субструктуру звезд гало, возник-

шую в результате разрушения спутника Gaia-Enceladus. Для изучения особенностей пространственного распределения и кинематики звезд разрушенного спутника была проведена серия численных экспериментов. Варьирование параметров траектории Gaia-Enceladus, масс звездного и газового компонентов, параметров темного гало было направлено на получение наилучшего согласия с данными наблюдений. Сравнивались две модели спутника. Одна имеет маленький собственный спин вращения и относится к эллиптическим системам. В качестве другой модели выбрана вращающаяся дисковая галактика Магелланова типа. Ретроградная орбита спутника позволяет лучше объяснить наблюдаемые характеристики объектов локального звездного гало.

М. Е. Прохоровым (ГАИШ МГУ) был представлен доклад с оригинальным названием «Геронтологическая терапия для астрометрических каталогов». Автор обращает внимание на то, что астрометрические каталоги со временем «стареют», их точность снижается. Так каталог Hipparcos, имел на момент своего создания в начале 90-х годов погрешность координат 0.001". Сегодня, спустя тридцать лет, он деградировал до уровня погрешности 0.03", т. е. практически до точностей наземной астрометрии конца XX века. Причиной этой деградации являются ошибки измерения собственных движений δ_μ . В погрешность координат входит произведение $\delta_\mu \times \Delta t$, где Δt — время, прошедшее с эпохи каталога. Проблему с каталогом Hipparcos решило создание каталога Gaia, который для ярких звезд в 50 раз точнее (как по α, δ , так и по μ). Но каталог Gaia также будет деградировать и всего через 50 лет (к 2070 г.) его точность снизится до уровня исходной точности Hipparcos. Автором сделан вывод, что для поддержания точности каталога Gaia (и вообще, любого астрометрического каталога), необходимо вести специальный «поддерживающий» астрометрический обзор, со следующими свойствами:

- цель обзора — измерение углов между звездами;
- точность обзора может быть в несколько раз ниже, чем у Gaia;
- обзор длительный;
- обзор может проводиться непрерывно или сессиями;
- обзор проводится в узком поле ($\approx 0.5^\circ - 1.0^\circ$).

Н. И. Перов (ЯГПУ — Ярославский государственный педагогический университет им. К. Д. Ушинского) представил доклад «К вопросу опре-

деления массы Галактики по распределению скоростей звезд». В предположении зависимости круговой скорости звезды от расстояния от центра Галактики было получено сферически-симметричное распределение материи в Галактике.

6. ГАЛАКТИКИ

К. Т. Миртаджиевой (АИ АН РУз — Астрономический институт Академии наук Республики Узбекистан) представлены результаты работы, выполненной в соавторстве с коллегами из Национального университета Узбекистана (НУУз), посвященной теории формирования лопсайдных спиральных галактик. Авторы предполагают, что явление лопсайдности, связанное с наблюдаемым эффектом смещения ядра спиральной галактики от ее геометрического центра, может являться следствием гравитационной неустойчивости соответствующей моды возмущения на фоне ранней нестационарности самогравитирующей модели. С целью определения зависимости данного эффекта от геометрии модели проведен сравнительный анализ дисковой и сферической нестационарных моделей и получены соответствующие нестационарные аналоги дисперсионных уравнений для конкретных мод возмущений в рамках двух моделей. Построены критические диаграммы начального вириального отношения от параметра вращения моделей для каждого случая. С помощью полученных результатов установлено, что на фоне невращающейся дискообразной модели проявляются как апериодическая, так и колебательная неустойчивости, а в случае сферической модели присутствует только апериодическая неустойчивость. В то же время для вращающихся моделей отмечается наличие только лишь колебательной неустойчивости. Также показано, что лопсайдная структура проявляется сильнее и быстрее на фоне дисковой модели, чем в сферической.

И. У. Таджибаев (Чирчикский государственный педагогический университет, Узбекистан) рассказал о проблемах классификации систем шаровых скоплений (СШС) и представил результаты работы, выполненной в сотрудничестве с коллегами из НУУз. К настоящему моменту пока не разработана даже простейшая классификация систем шаровых скоплений (СШС), наблюдаемых вокруг галактик. В то же время разнообразие накопленных наблюдательных данных требует не только анализа их статистических свойств, но и разработки именно простейших классификаций. Анализ данных наблюдений и физики СШС показывает, что их условно можно разделить на пять явно отличающихся групп

по основным физическим характеристикам. Авторами, на основе ранее составленного каталога СШС, разработаны простейшие классификации и найдены эмпирические зависимости между вириальным параметром и основными характеристиками СШС или их родительских галактик.

Б. П. Кондратьевым (ГАИШ МГУ) были представлены два доклада. В первом из них автор представил новую формулу для вычисления угловой скорости вращения равновесных фигур вращающейся гравитирующей жидкости. Особенностью этой формулы является то, что в ней угловая скорость зависит только от составляющих внутренней и внешней гравитационной энергии. Справедливость новой формулы доказана тем, что она дает правильные значения угловой скорости в важных частных случаях — для последовательностей классических сфероидов Маклорена и трехосных эллипсоидов Якоби, а ее преимущество состоит в том, что она может описывать не только эллипсоидальные фигуры равновесия, но и фигуры равновесия любой другой геометрической формы, в том числе тороидальной. Это расширяет область применения теории равновесных фигур и открывает дополнительные возможности для изучения равновесия и устойчивости сложных динамических систем [8].

Во втором докладе рассказывается о результатах работы, выполненной группой сотрудников ГАИШ МГУ и посвященной исследованию влияния гало на вращение бара в галактиках. Изучается влияние массивного гравитирующего гало на вращение эллипсоидального бара в дисковых галактиках. Метод основан на вычислении момента сил между баром и гало с помощью функции их взаимной гравитационной энергии. Для проверки метода рассмотрены две модели: простой вариант с однородными компонентами, и более сложный вариант, в котором гало представлено слоисто-неоднородным эллипсоидом с параболическим законом плотности. Для обеих моделей получены выражения взаимной гравитационной энергии бара и гало, построен лагранжиан и выведены дифференциальные уравнения нелинейных вращательных колебаний бара. Эти уравнения описывают вращение бара с переменной угловой скоростью. Найдены частоты и периоды либраций угловой скорости бара как в общем нелинейном случае, так и в приближении гармонических колебаний [9].

Доклад С. С. Храпова (ВолГУ) посвящен исследованию механизма образования звездно-газовых дисков в галактиках с противоположным вращением компонентов (ретроградным вращением), выполненному совместно с группой коллег из ВолГУ. Для

широкого ряда геометрических и кинематических параметров построены численные модели падения газовых потоков на диск крупной галактики типа Млечный путь. На ранних стадиях такого взаимодействия газового потока с дисковыми компонентами возможно образование протяженной внешней кольцеобразной структуры типа полярного кольца. Основное внимание направлено на изучение условий усиления активности галактического ядра за счет дополнительного притока газа в зону галактического центра в результате падения межгалактического газа. При ретроградном падении газового потока имеются наилучшие условия для дополнительного притока газа в галактический центр. Определены зависимости притока газа в центр от параметров межгалактического потока.

К. А. Маннаповой (НУУз) представлены результаты статистического анализа наблюдательных данных гало дисковых галактик, выполненного в сотрудничестве с К. Т. Миртаджиевой (АИ АН РУз). Авторами составлен сводный каталог спиральных галактик с известными физическими параметрами гало. В каталоге собраны параметры, такие как название галактики (тип галактики), координаты, общая звездная масса галактики, отношение массы гало к общей звездной массе, оптический радиус галактики, радиус гало, поверхностная яркость гало, скорости дисперсии частиц гало, а также некоторые параметры гало темной материи. В частности, получена эмпирическая зависимость металличности гало от красного смещения, которая показывает, что с увеличением расстояния от плоскости галактики уменьшается металличность гало спиральных галактик. Получены эмпирические зависимости, проведена корреляция между параметрами гало, а также проведен их статистический анализ.

А. А. Марчук (ГАО РАН) представил доклад «Многоволновая декомпозиция галактик с учетом спирального узора: галактика М 51» по результатам работы группы сотрудников ГАО РАН. Спиральная структура может вносить значительный вклад в светимость галактики. Чтобы определить, как пренебрежение наличием спиральных рукавов может повлиять на оценку параметров других компонентов, требуется декомпозиция реальных галактик с помощью моделей спиральных рукавов. В докладе описывается впервые выполненная декомпозиция М 51 («Водоворот»). Авторами использованы 17 изображений галактики М 51 в разных фотометрических полосах, от УФ до дальнего ИК-диапазона. Проведена их декомпозиция с учетом спиральной структуры как отдельного компонента. Получены фотометрические модели галактик и их полное параме-

трическое описание. Показано, к каким ошибкам может приводить неучет спиральной структуры при декомпозиции.

А. С. Расторгуев (МГУ) рассказал о результатах исследований кластеров протозвезд и кластеров ОВ-звезд в Галактике. Полученное новое предварительное разбиение протозвезд на кластеры разных масштабов очень важно для более детального (в пределах отдельных кластеров/ассоциаций) изучения истории звездообразования, в том числе поиска проявлений последовательного звездообразования в гигантских молекулярных облаках и газовых сверхоболочках, окружающих ОВ-ассоциации. Нуждаются в детальном анализе некоторые различия в пространственном распределении и кинематике по сравнению с ОВ-звездами и их кластерами. Многие молодые ($t < (1 - 2) \times 10^7$ лет) рассеянные скопления генетически связаны с молодыми звездными объектами разных классов; они окружены обширными «оболочками» протозвезд, заметная доля которых, судя по общности расстояний и прецизионных собственных движений, вместе с нормальными звездами образует гравитационно связанную систему размером порядка 10 пк.

Н. А. Тихоновым (САО РАН) представлены результаты исследований молодых звезд в иррегулярных галактиках. В докладе обсуждалась возможность появления высокометаллической звезды в карликовой низкометаллической галактике NGC 4068. На основе звездной фотометрии снимков космического телескопа Хаббла (HST) получены результаты фотометрических измерений металличности молодых и старых звезд в 100 иррегулярных галактиках. Из полученной зависимости следует, что основное насыщение галактик металлами происходило несколько миллиардов лет назад, а среди изученных галактик нет ни одной, в число которых входит и NGC 4068, где молодые звезды имели бы высокую металличность при низкой металличности старых звезд. Для объяснения причины малометалличности карликовых галактик показана зависимость между светимостями 150 галактик и их ярчайших звезд, на которой видно отсутствие массивных звезд в карликовых галактиках, быстрая эволюция и взрывы которых приводят к насыщению межзвездной среды металлами. Указанное отсутствие массивных звезд может быть основной причиной наблюдаемой малометалличности карликовых галактик.

С. Ж. Тураев (НУУз) рассказал о результатах работы по анализу данных наблюдений шаровых скоплений в рамках Gaia DR2, выполненной в НУУз в сотрудничестве с МГУ. Изучение проблем класси-

фикации шаровых скоплений полезно, прежде всего, для построения теории их формирования и эволюции. Эта задача требует нахождения вспомогательного параметра и точного связывания его значения с основными физическими характеристиками наблюдаемых шаровых скоплений. В 2021 г. авторами были получены значения параметра степени концентрации для 26 шаровых скоплений и впервые предложена их классификация, решающая проблему Шепли–Сойера. Данная работа является логическим продолжением этих исследований. Проанализированы данные Gaia DR2 наблюдений видимой поверхностной плотности 81 шарового скопления. Обсуждаются проблемы анализа этих наблюдений и их отличия от данных, полученных с помощью HST. При этом свободные параметры, в том числе параметр концентрации, были получены симплектическим методом минимизации и методом χ^2 , используя 4-х параметрическую обобщенную модель. Для этого была создана выборка данных Gaia DR2, в которую не вошли физически нереальные случаи, например, случаи концентрации к периферии или неравномерных колебаний видимой поверхностной плотности. Найдены новые эмпирические формулы. Полученные результаты подтверждают справедливость ранее предложенной классификации.

Доклад А. Т. Миртаджиевой (АИ АН РУз) был посвящен кольцеобразным неустойчивостям на фоне нестационарных моделей анизотропного самогравитирующего диска. Поведение кольцеобразных мод колебания в равновесных моделях самогравитирующих систем изучалось многими научными группами. В данной работе исследовалась гравитационная неустойчивость однокольцевых мод возмущений на фоне радиально пульсирующих дисковых составных моделей с анизотропной диаграммой скоростей с целью изучения проблемы происхождения кольцеобразных галактик. Выведены нестационарные аналоги дисперсионных уравнений для однокольцевых мод возмущений. Построены критические диаграммы начального вириального отношения от параметра суперпозиции при различных значениях параметра вращения модели. Исследование составных моделей относительно неустойчивостей кольцевых мод показывает, что при определенных значениях параметра суперпозиция двух моделей область неустойчивости занимает практически весь диапазон возможных значений начального вириального отношения. Получены результаты сравнительного анализа составных моделей относительно однокольцевых мод возмущений для различных значений параметров вращения диска и суперпозиции.

И. У. Таджибаевым (НУУз) представлены результаты исследований, выполненных группой из Национального университета Узбекистана, посвященным мелкомасштабным изгибным возмущениям на фоне пульсирующей модели самогравитирующего диска. В дискообразных самогравитирующих галактиках наблюдаются не только крупномасштабные, но и мелкомасштабные структурные образования, формирующиеся на ранней нестационарной стадии эволюции. Исследование мелкомасштабных структурных образований является весьма обширной и сложной задачей. Ранее роль и поведение мелкомасштабных мод колебаний в самогравитирующих системах не изучались. В данном исследовании эта задача ставится не только для равновесных моделей диска, но и для глобально нестационарных, точнее, для радиально пульсирующих самогравитирующих дисков. Одним из важных для дисков мод колебаний являются изгибные возмущения, неустойчивости которых приводят к их сложным искривлениям. В связи с этим в данной работе для начала авторы ограничиваются исследованием неустойчивости мелкомасштабных изгибных возмущений при $m = 0$ и $N = 25, 35, 45$ и др. Построены соответствующие критические зависимости вириального отношения от параметра вращения, а также вычислены инкременты неустойчивостей для этих мод возмущения.

В докладе Ф. Т. Шамшиева (НУУз) представлены сводный каталог двойных галактик, составленный группой ученых из НУУз, а также некоторые результаты статистического анализа этих объектов. Каталог основывается на нескольких уже существующих каталогах (Холмберга, Тернера, Караченцева) и современных наблюдательных данных. Каталог содержит сведения о 613 парах галактик в объеме радиусом 200 Мпк, с лучевыми скоростями не более 13 000 км/с. Оценены расстояние между парами галактик и их суммарная масса.

Н. И. Перовым (ЯГПУ) был представлен доклад «Об одном методе определения постоянной Хаббла», в котором автор предпринимает попытки объяснить в рамках предложенной им модели удаления галактик друг от друга и их сближения (в зависимости от начальных условий).

В докладе М. А. Бутенко (ВолГУ) «Особенности формирования галактических спиральных узоров внутри триаксиального темного гало» представлены результаты анализа влияния формы «неосесимметричного» темного гало на морфологию формирующейся в нем спиральной структуры за пределами оптического радиуса. Рассмотрены различные варианты распределения вещества в темном гало, которые

в моделях определяются функциональной зависимостью параметра «неосесимметрии» от радиуса диска. Показано, что для гало «неосесимметричного» внутри оптического радиуса и симметричного за его пределами внешний спиральный узор не формируется. Также в работе приведены результаты большого количества численных экспериментов, которые подтверждают, что «неосесимметричность» газового диска в процессе его эволюции имеет значительно меньшие масштабы, чем «неосесимметричность» темного гало, задаваемая в качестве варьируемого параметра в используемых авторами моделях.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлен аналитический обзор современного состояния проблем звездной астрономии. Эта статья является очередным аналитическим обзором современных задач, стоящих перед звездной астрономией (предыдущие обзоры были опубликованы в статьях [10–18]). Настоящий обзор создан, преимущественно, по материалам докладов, представленных на конференции «Современная звездная астрономия–2023», которая проводилась 15–18 мая 2023 г. в Волгоградском государственном университете и была тринадцатой конференцией этого цикла. Материалы докладов вышли в издании [19]. Предыдущие конференции проводились в ГАИШ МГУ (Москва), ГАО РАН (Санкт-Петербург), ЮФУ (Ростов), КГО ГАИШ МГУ (Кисловодск), УрФУ (Екатеринбург), ИНАСАН (Москва), САО РАН (Нижний Архыз).

Результаты, представленные на конференции, отличались новизной, оригинальностью и актуальностью, а доклады вызвали большой интерес у аудитории, что нашло отражение в большом количестве вопросов, заданных докладчикам, и в бурных дискуссиях в кулуарах. Очевидно, линейка конференций «Современная звездная астрономия» будет продолжена.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках гранта 075-15-2022-1228 (13.2251.21.0177).

БЛАГОДАРНОСТИ

Организаторы конференции благодарят руководство Волгоградского государственного университета за теплый прием и хорошие условия для проведения конференции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *A. A. Malofeeva, V. O. Mikhnevich, G. Carraro, and A. F. Seleznev*, *Astron. J.* 165, 45 (2023).
2. *L. G. Romanenko, O. V. Kiyaeva, I. S. Izmailov, N. A. Shakht, and D. L. Gorshanov*, arXiv:2301.07602 [astro-ph.SR] (2023).
3. *S. Vereshchagin, N. Chupina, K. Lyzenko, A. Kalinkin, N. Kondratev, D. Kovaleva, and S. Sapozhnikov*, *Galaxies* 11(5), id. 99 (2023).
4. *F. T. Shamshiev*, *Astrophys. Bull.* 79, 1 (2024).
5. *I. M. Sultanov and S. A. Khaibrakhmanov*, *Astron. Rep.* 68, 60 (2024).
6. *E. O. Vasiliev and Y. A. Shchekinov*, *Astrophys. Bull.* 79, 60 (2024).
7. *A. T. Bajkova, A. A. Smirnov, and V. V. Bobylev*, *Astrophys. Bull.* 78, 443 (2023).
8. *B. P. Kondratyev*, *Astrophys. Sp. Sci.* 368(10), id. 84 (2023).
9. *B. P. Kondratyev, E. N. Kireeva, V. S. Kornoukhov, and N. G. Trubitsyna*, *Astrophysics* 65(3), 345 (2022).
10. *O. Y. Malkov and A. S. Rastorguev*, *Open Astronomy* 26(1), 62 (2017).
11. *O. Y. Malkov, A. S. Rastorguev, and N. N. Samus*, in *Modern Star Astronomy, Vol. 1, Astronomy-2018, XIII Congress of the Intern. Public Organization «Astronomical Society»; Conference Abstracts*, (Moscow: IZMIRAN, 2018), p. 8.
12. *O. Y. Malkov, E. V. Polyachenko, A. M. Sobolev, and A. S. Rastorguev*, *Astrophys. Bull.* 74(1), 93 (2019).
13. *O. Y. Malkov, E. V. Polyachenko, A. S. Rastorguev, and N. N. Samus*, *INASAN Sci. Rep.* 5, 103 (2020).
14. *N. N. Samus, O. Y. Malkov, and E. V. Polyachenko*, *INASAN Sci. Rep.* 5, 169 (2020).
15. *O. Y. Malkov, E. V. Polyachenko, and N. N. Samus*, *INASAN Sci. Rep.* 5, 174 (2020).
16. *E. V. Polyachenko, N. N. Samus, and O. Y. Malkov*, *INASAN Sci. Rep.* 5, 183 (2020).
17. *O. Y. Malkov and E. V. Polyachenko*, *Astron. Rep.* 66, 693 (2022).
18. *O. Y. Malkov, A. O. Zhukov, and O. B. Dluzhnevskaya*, *Astron. Rep.* 67, 1065 (2023).
19. *A. G. Losev, A. A. Klyachin, and V. A. Klyachin*, *Proc. of the Institute of Mathematics and Information Technologies Volgograd State University* (2023).

MODERN STELLAR ASTRONOMY 2023**O. Yu. Malkov¹, E. Yu. Kilpio^{2,3}, O. B. Dluzhnevskaya¹***Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences (RAS), Moscow, Russia**Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny, Russia**Department of Physical Sciences RAS, Moscow, Russia*

We provide an analytic review of problems of the modern stellar astronomy. It mostly based on talks presented at the thirteenth annual conference on Modern Stellar Astronomy, held in Volgograd State University (Russia) in May 2023. The key topics for the review are Stars, Stellar Clusters and Associations, Interstellar Medium and Star Formation, Galaxy Structure, Kinematics and Dynamics, Galaxies.

Keywords: stars, stellar clusters and associations, Milky Way Galaxy, galaxies, interstellar medium, star formation