АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2022, том 99, № 8, с. 675–683

СОВРЕМЕННАЯ ЗВЕЗДНАЯ АСТРОНОМИЯ

© 2022 г. О. Ю. Малков[1, *], Е. В. Поляченко[1, **]

[1] Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: malkov@inasan.ru

**E-mail: epolyach@inasan.ru

Поступила в редакцию 26.06.2022 г.
После доработки 08.08.2022 г.
Принята к публикации 08.08.2022 г.

Представлен аналитический обзор современного состояния проблем звездной астрономии. Он преимущественно базируется на докладах, сделанных на конференции “Современная звездная астрономия” (ГАИШ МГУ, август 2021).

Ключевые слова: звездная астрономия, звезды, динамика гравитирующих систем, строение Галактики, звездные скопления

DOI: 10.31857/S0004629922090092

1. ВВЕДЕНИЕ

В данной работе представлен аналитический обзор современных задач, стоящих перед звездной астрономией. Он создан, преимущественно, по материалам докладов, представленных на одиннадцатой конференции из цикла “Современная звездная астрономия”. Она была проведена 23–24 августа 2021 г. в ГАИШ МГУ, в рамках Всероссийской астрономической конференции ВАК-2021. Помимо ГАИШ МГУ организаторами ВАК-2021 выступили НСА РАН и Астрономическое общество.

Сайт конференции ВАК-2021: https://www.vak2021.ru/.

Обзор организован следующим образом: в разделе 2 рассмотрены звезды, в разделе 3 – динамика гравитирующих систем, в разделе 4 – строение Галактики, и в разделе 5 – звездные скопления. В последнем разделе приведены заключительные замечания.

2. ЗВЕЗДЫ

Две формы аккреции межзведного газа при формировании одиночных звезд обсуждались в докладе Т.Р. Абдульмянова (КГЭУ). В работе рассматриваются механизмы звездообразования и формирования экваториального газопылевого диска протозвезд. Вязкая динамика межзвездного вещества газопылевых дисков определяется, в основном, возмущениями плотности вещества при аккреции газа на равновесное ядро протозвезды. При помощи модели пульсационных возмущений плотности газопылевой оболочки протозвезды и уравнения Навье–Стокса получены формулы динамической вязкости Кеплеровых и почти Кеплеровых дисков. Показано, что в режиме неустойчивого равновесия оболочки начинается аккреция газа на ядро протозвезды. В режиме устойчивого равновесия происходит фрагментация газопылевой оболочки и экваториального диска протозвезды. В кольцеобразных фрагментах диска начинается процесс формирования “зародышей” планет и начинается аккреция на “зародыши” планеты. Численным интегрированием системы уравнения Навье–Стокса и уравнения неразрывности получены профили плотности экваториальных дисков протозвезд. Определено характерное время аккреции межзвездного вещества на ядро протозвезды [1].

Доклад Н.А. Масленниковой (ГАИШ МГУ) был посвящен подтверждению симбиотической природы звезды CSS 1102 на основании спектральных и фотометрических наблюдений, проведенных в КГО ГАИШ. Были представлены результаты спектральных и фотометрических наблюдений малоизученной S-звезды CSS 1102. Анализ спектров, полученных 31.08.2020 и 28.10.2020 на спектрографе TDS 2.5-м телескопа КГО ГАИШ, позволил классифицировать CSS 1102 как симбиотическую звезду. В спектре звезды наблюдались не только эмиссионные линии Бальмеровской серии водорода, но и линии HeI, а также слабые запрещенные линии [NeIII]. В спектре поглощения присутствовали молекулярные полосы TiO (λ 7054 Å, 5847 Å и др.), ZrO (λ 6473 Å, 6345 Å и др.) и YO (λ 6132 Å). Спектральное распределение энергии с достаточной

точностью моделируется системой, состоящей из холодного компонента – циркониевой звезды спектрального класса S4.5/2 ($T_{\rm eff} \sim 3400$ K), туманности с $T_{\rm eff} \sim 10\,000$ K и аккреционного диска ($T_0 = 20000$ K, $R_{\rm in} = 0.008R_\odot$ и $R_{\rm out} = 0.4R_\odot$). Отсутствие линий ионов с высокими потенциалами ионизации позволило получить лишь оценку температуры горячего компонента $40\,000 < T_{\rm hot} < 55\,000$ K. Средняя лучевая скорость холодного компонента CSS 1102 составила 94 ± 20 км/с. Фотометрический мониторинг, проведенный 01.09.2020 в полосе B на 60-см телескопе RC600 КГО ГАИШ, показал, что у CSS 1102 наблюдается фликкер-эффект, редкое явление у симбиотических звезд. Характерная величина и время изменения блеска составляют $0.043^m \pm 0.010^m$ и 37 мин соответственно. Если эта переменность связана с аккреционным диском, то относительное изменение потока от него достигают ~20%.

Е.А. Михайлов (МГУ) обсуждал в своем докладе батарею Бирмана как источник космических магнитных полей. В настоящий момент существование магнитных полей у таких космических объектов, как Солнце, другие звезды, галактики и т.д. надежно установлено и практически не вызывает сомнений. Оно подтверждено как наблюдательными данными, так и теоретическими моделями. Как правило, теоретическое исследование магнитных полей ведется в рамках теории динамо, которая объясняет их генерацию за счет совместного действия альфа-эффекта и дифференциального вращения. Вместе с тем механизм динамо не дает возможности объяснить рост магнитного поля в отсутствие некоторых начальных полей. Одним из способов объяснения их возникновения может служить батарейный механизм Бирмана. Он связан с тем, что поток заряженных частиц (протонов и электронов) от центрального объекта подхватывается вращающейся средой. Вместе с тем, ввиду того, что протоны и электроны имеют одинаковые заряды и различные массы, возникает ненулевой кольцевой ток, который порождает магнитное поле. Подобный механизм может объяснять зарождение магнитных полей в галактиках, аккреционных дисков компактных объектов. Особый интерес представляет возникновение магнитных полей в окрестности переменных звезд. В представленной работе в рамках представлений, связанных с механизмом Бирмана, записаны уравнения движения частиц, получены выражения для кольцевых токов и порождаемых ими магнитных полей. Показано, что структура магнитного поля описывается при помощи интегрального уравнения, которое представляет с математической точки зрения пример некорректной задачи. По этой причине его решение требует применения регуляризующих алгоритмов. В ходе решения получена структура магнитного поля, оценена его величина для различных соотношений между параметрами, соответствующих тем или иным объектам [2].

Магнитным полям химически пекулярных звезд в ассоциации Orion OB1 был посвящен доклад И.И. Романюка. Были представлены результаты измерения магнитного поля 56 (50 Bp и 6 Ap) химически пекулярных звезд (CP-звезд) в ассоциации Orion OB1. Обнаружено 32 магнитных звезды в ассоциации. Это 57% среди CP-звезд, что в несколько раз больше, чем обычные 25% для холодных Ap-звезд. Также было определено, что доля химически пекулярных звезд относительно нормальных в ассоциации падает с возрастом в интервале от 2 до 10 Myr. Доля магнитных звезд относительно химически пекулярных также падает с возрастом в тех же интервалах. Возможно, что молодые звезды обладают мелкомасштабной структурой магнитного поля, которая распадается с возрастом и ее вклад в общее результирующее магнитное поле уменьшается. В целом полученные результаты поддерживают теорию реликтового происхождения магнитного поля у химически пекулярных Ap/Bp звезд.

А.С. Склянов (КФУ) доложил о вспышечной активности NY Ser и мультипериодических процессах на разных ее стадиях в 2014 и 2016 г. В работе приведены результаты кампаний по наблюдениям карликовой новой звезды NY Ser, которые проводились в 2014 и 2016 г. Всего были получены данные по 126 ночам наблюдений в 2014 г., которые включают 20 нормальных вспышек и одну сверхвспышку, и по 22 ночам в 2016 г., охвативших 5 нормальных вспышек. По форме кривых нормальных вспышек было показано наличие у данной системы вспышек как типа “outside-in”, так и типа “inside-out”. На разных стадиях вспышечной активности (спокойное состояние, вспышки и сверхвспышка) NY Ser показывала колебания блеска с разными периодами. В спокойном состоянии и нормальных вспышках доминировал орбитальный период $0.097558(6)^d$. Во время сверхвспышки были выделены две стадии эволюции сверхгорбов: стадию роста приливной нестабильности аккреционного диска (A) и стадию развитых сверхгорбов (B). Стадия A для NY Ser была выделена впервые, однако ее продолжительность и период однозначно не определены. На стадии B были зарегистрированы положительные сверхгорбы со средним периодом $0.10464(9)^d$ и избытком периода $\epsilon = 0.072$, и впервые обнаружены отрицательные сверхгорбы со средним периодом $0.0938(1)^d$ и дефицитом периода $\epsilon = -0.038$.

С.А. Трушкин (САО РАН) доложил о многолетних многочастотных исследованиях вспышечной активности микроквазаров. В результате многолетнего мониторинга на РАТАН-600 в рамках программы исследований ярких рентгеновских двойных звезд в различных диапазонах электромагнитного спектра осуществлены поиск и детальное изучение корреляций между переменным рентгеновским, радио- и гамма излучением, что является ключевым моментом для понимания процесса формирования струйных выбросов из аккрецирующего на черную дыру (или нейтронную звезду) вещества. С апреля 2019 г. использовался режим многоазимутальных измерений на антенной системе "Южный сектор с плоским отражателем", когда в течение 5–6 ч около кульминации источника проводилось по 31 измерению плотностей потоков на частотах 4.7, 8.6, 15 и 30 ГГц нескольких гигантских вспышек Cygnus X-3, ярких вспышек SS 433 и GRS 1915+105 . В январе 2020 г. Cyg X-3 перешел в гипермягкое рентгеновское состояние, выход из которого в начале февраля привел к самой яркой радиовспышке за всю историю его наблюдений. Плотность потока Cygnus X-3 увеличилась от 5 мЯн до 20 Ян на частоте 4.7 ГГц и до 22 Ян на 2.3 ГГц за 2–3 дня. В многоазимутальных наблюдениях на первичной фазе был зарегистрирован линейный рост потока на временах от 1 до 5 ч. Сравнив данные космических гамма телескопов (Swift, AGILE и FERMI) и рентгеновских установок MAXI и NICER на МКС, авторы обнаружили, что вспышечные события от радио- до гамма диапазона взаимосвязаны, что является отражением причинной связи физических процессов в аккреционном диске и в струйных выбросах. Спектральные и временны́е зависимости эволюции вспышек позволяют моделировать синхротронное излучение микроквазаров на основе изменения объема струйных выбросов, величины их магнитного поля и режима генерации и поглощения радиоизлучения от релятивистских электронов. Радиовспышки микроквазара GRS 1915+105, как явное проявление новой струйной активности, всегда носят характер реакции на изменение условий генерации рентгеновского излучения в аккреционном диске (MAXI) и в короне (Swift). Подробно, на протяжении более 60 орбитальных периодов исследовались периодические радиовспышки от рентгеновской двойной с ярким гамма излучением LSI+61d303. Несомненно, характер этих вспышек кардинально меняется в зависимости от сверхорбитального 4.6-летнего периода.

Доклад О.Ю. Малкова (ИНАСАН) был посвящен поиску широких двойных систем с разновозрастными компонентами. Все возможные механизмы образования двойных систем приводят к созданию пары с компонентами одинакового возраста. Единственное исключение, захват – явление, как предполагается, достаточно редкое. Однако в густонаселенных областях (в самых плотных звездных скоплениях и в ядре Галактики) вероятность образования двойной системы захватом возрастает. В докладе рассматривалось несколько возможных методов сравнить возраст компонентов широкой (т.е. не испытывающей обмена массами ни сейчас, ни в прошлом) двойной, а также были представлены несколько кандидатов на роль двойных систем с разновозрастными компонентами. Их эволюционный статус требует дальнейшего изучения.

Визуальные двойные звезды с известными орбитами в Gaia EDR3 обсуждались в докладе Д.А. Чулкова (ИНАСАН). Алгоритмы, использованные для создания каталога Gaia EDR3, действуют в предположении, что звезды являются одиночными. Вместе с тем имеющиеся данные Gaia оказываются ценными и для изучения двойных и кратных звезд. Визуальные двойные звезды с известными орбитами представляют особый интерес, так как позволяют определить звездные массы с помощью 3-го закона Кеплера. Согласно данным 6-го каталога орбит визуальных двойных звезд (ORB6) на текущий момент орбитальные элементы известны приблизительно для 3 тысяч звездных пар. В рамках исследования проведена кросс-идентификация каталога ORB6 с Gaia EDR3, позволившая снабдить объекты каталога ORB6 параллаксами и оценить их динамическую массу. Приблизительно для полутысячи объектов независимо определены параллаксы двух компонентов двойной. Поскольку компоненты гравитационно связаны, сравнение измеренных параллаксов позволяет установить ограничения на точность данных Gaia. Для ряда объектов, входящих в ORB6, имеющиеся решения не содержат параллаксов. Иногда в таких случаях удается оценить параллакс с помощью "третьего света" – далекого компонента визуальной двойной, выделенного из звезд фона благодаря собственному движению.

Е.В. Рубцов (ГАИШ МГУ) рассказал о проекте VOXastro Stellar Libraries: от оптики до ИК. Для изучения звездного состава галактик чаще всего применяется метод попиксельного приближения наблюдаемого спектра моделями в широком диапазоне длин волн (fullspectrum fitting). Метод определяет параметры кинематики и свойства звездного населения на основе библиотек моделей звездных населений. Наиболее популярные на сегодняшний день эмпирические модели (MILES, PEGASE) ограничены только оптическим диапазоном. А в ближайшем будущем ожидается большой поток новых спектральных данных в ближнем ИК диапазоне с лучшим спектральным разрешением (с перспективных обсерваторий JWST, Euclid, WFIRST и др.), что потребует новые модели звезд и звездных населе-

ний. Для решения этих задач был создан проект VOXastro-SL, в рамках которого были собраны, переобработаны и проанализированы оптические звездные спектры из двух общедоступных библиотек UVES-POP и INDO-US. Дополнительно к ним были проведены наблюдения ~1300 звезд (с максимальным покрытием пространства параметров) на ИК спектрографе FIRE на 6.5-м телескопе Magellan-Baade (библиотека LCO-SL). Для обработки спектральных данных были разработаны специализированный программный пакет (pipeline) и алгоритм теллурической коррекции. А для анализа обработанных спектров наборами моделей был реализован алгоритм дискретной минимизации, во время работы которого одновременно определялись "непрерывные" кинематические параметры ($v, v\sin i$) и "дискретные" параметры атмосфер звезд ($T_{\rm eff}$, $\log g$, [Fe/H], [α/Fe]). Таким образом, результаты проекта могут использоваться как для изучения отдельных звезд, так и для создания на их основе эмпирических и полуэмпирических (с добавлением синтетических спектров) моделей звездных населений и дальнейшего изучения свойств звездных населений галактик в оптическом и ближнем ИК диапазонах.

Доклад П.В. Пахомовой (ИНАСАН) был посвящен параметризации долгопериодических затменных двойных систем. Одним из важных источников, позволяющим независимо определять звездные массы, являются затменные двойные звезды с компонентами, находящимися на главной последовательности, где наблюдаются спектральные линии обоих компонентов. Параметры таких звезд используются при построении соотношения масса-светимость для средних и больших масс. Среди них выделяется тип долгопериодических затменных двойных систем, параметры которых на данный момент определены недостаточно полно, что связано со сложностями, вызванными необходимостью длительных наблюдений. В ходе доклада планируется сделать обзор имеющихся на данный момент наблюдательных данных и обсудить перспективы их использования для определения звездных масс [3].

П.Б. Иванов (ФИАН) посвятил свой доклад приливной эволюции наклона оси вращения звезды в двойной системе. Обсуждалась полностью самосогласованная теория квазистатических приливных взаимодействий в двойной системе, в которой один из компонентов имеет собственное вращение, с осью вращения, наклоненной относительно орбитальной плоскости. Было показано, что в дополнение к членам уравнений, описывающим эволюцию на медленном "вязком" времени, самосогласованная теория предсказывает прецессию и изменение угла наклона оси вращения на относительно короткой шкале времени, определяемой вращением. Последнее может иметь непосредственные наблюдательные проявления.

А.М. Микаелян (БАО, Армения) доложил о проекте, представляющим собой статистическое исследование свойств белых карликов, выполненное на основе выборки Первого Бюраканского обзора голубых звездных объектов (FBS BSO) и Каталога белых карликов. Используя эти результаты, осуществляется поиск новых белых карликов с помощью точной астрометрии Gaia. Открытие и изучение новых белых карликов (WD) чрезвычайно важно для понимания кинематики и динамики местного звездного населения. Был проведен статистический анализ каталога белых карликов, чтобы установить их средние физические свойства. Основываясь на этих данных, выполнен поиск новых WD, используя точную астрометрию Gaia EDR3. Используя точные данные Gaia в сочетании со спектрами низкой дисперсии SDSS и DFBS и дополнительными многоволновыми данными, было обнаружено много новых WD. Многие из них являются предметом изучения двойственности и переменности (включая ряд подтипов, например, звезды ZZ Ceti (пульсирующие WD), катаклизмические переменные и т.д.). Проведены поиск и выявление WD среди голубых звездных объектов FBS в высоких галактических широтах. Также проводились поиски высокогалактических WD в DFBS. По выявленным и рассчитанным характеристикам проведено статистическое исследование свойств WD [4].

Доклад О.В. Кияевой (ГАО РАН) был посвящен возможным спутникам у визуально-двойной звезды ADS 9346 = WDS 14410+5757. В позиционных ПЗС наблюдениях на 26″ рефракторе Пулковской обсерватории у звезды ADS 9346 в 2003–2019 гг. обнаружено возмущение, которое можно объяснить присутствием невидимого спутника малой массы у компонента A. Определена предварительная орбита фотоцентра звезды ADS 9346A (P = 15 лет, a = 11 мсд, e = 0.86). Согласно фотометрическим оценкам масса видимого компонента равна 1.4 $M_\odot$. Если принять параллакс из каталога Gaia, то спутник с массой 0.142 $M_\odot$ находится на расстоянии 7 а.е. Эта орбита подтверждается независимыми наблюдениями лучевой скорости. При прохождении периастра (T = 2009.5) было много позиционных наблюдений, но отсутствовали наблюдения лучевой скорости, которые могли бы уверенно подтвердить или опровергнуть наличие данного спутника. Следующее прохождение периастра ожидается вблизи 2024 г. (2023–2025). Данные Gaia позволяют предположить, что есть спутник и у компонента B.

Исследованию переменных звезд типа Дельты Щита большой амплитуды (HADS) с двойной и множественной периодичностью был посвящен доклад А.В. Хруслова (ГАИШ МГУ). Был проведен поиск двойной и множественной периодичности среди звезд типа Дельты Щита большой амплитуды в данных фотометрического обзора ASAS-SN. Найдено около трех сотен переменных с двойной периодичностью, пульсирующих в основной моде и в первом обертоне (DS01), два десятка звезд первого и второго обертонов (DS12), несколько переменных с тройной периодичностью, пульсирующих в основной моде, первом и втором обертонах (DS012), а также несколько кандидатов в мультипериодические переменные с пульсациями в более высоких обертонах. Найдено более десятка случаев HADS звезд с двойной периодичностью, один из компонентов переменности которых имеет обратную асимметрию кривой блеска: во всех случаях этот компонент уверенно отождествляется с колебанием в первом обертоне, что может также оказаться удобным идентификационным признаком моды пульсаций моноперiодических HADS переменных с подобными обратно асимметричными кривыми блеска. Также выявлено несколько случаев амплитудной модуляции у HADS звезд, среди которых один, вероятно, показывает смену бимодального режима пульсаций на мономодальный [5].

3. ДИНАМИКА ГРАВИТИРУЮЩИХ СИСТЕМ

Влияние бара Галактики на кинематику звезд диска вблизи его внешнего линдбладовского резонанса обсуждается в докладе Е.Н. Подзолковой (МГУ). Ее модель Галактики с внешним резонансным кольцом R_1R_2 может быть использована для объяснения наблюдаемых распределений радиальных V_R и азимутальных V_T скоростей звезд диска вдоль галактического радиуса R. Для звезд из каталога Gaia EDR3 с надежно определенными параллаксами, измеренными собственными движениями и лучевыми скоростями, лежащих вблизи плоскости Галактики ($|z| < 200$ пк) и в секторе галактоцентрических углов $|\theta| < 15°$, были вычислены медианные радиальные V_R и азимутальные V_T скорости в малых интервалах по R. Оказалось, что наблюдаемое распределение радиальных скоростей демонстрирует плавное падение от +5 км/с на расстоянии $R = R_0 - 1.5$ кпк до –3 км/с на расстоянии $R = R_0 + 1.0$ кпк, а наблюдаемые азимутальные скорости V_T показывают резкое падение на 7 км/с на интервале расстояний $R_0 < R < R_0 + 1.0$ кпк, где R_0 – галактоцентрический радиус Солнца. Наблюдаемые распределения радиальных и азимутальных скоростей в диапазоне расстояний $|R - R_0| < 1.5$ кпк можно воспроизвести с помощью модели, включающей бар, балдж, экспоненциальный диск и гало. Наилучшее согласие между модельными и наблюдаемыми скоростями соответствует времени $1.8 \pm \pm 0.5$ млрд. лет с начала моделирования и формирования бара. Модель Галактики с баром, вращающимся с угловой скоростью $\Omega_b = 55 \pm 3$ км/с/кпк, внешний линдбладовский резонанс (OLR) которого приходится на $R = R_0 - 0.5 \pm 0.4$ кпк, дает наилучшее согласие модельных и наблюдаемых скоростей. Позиционный угол бара, соответствующий наилучшему согласию моделей с наблюдениями, составляет $\theta_b = 45 \pm 15°$.

Поиск новых моделей, имеющих неклассические интегралы движения, очень важен для описания различных астрономических объектов. В работе Ф.Т. Шамшиева (НУУз) построен специальный класс потенциалов, обладающих локальным интегралом, которые можно применять для изучения движения звезд в звездных скоплениях, близких к сферической симметрии. Найденные модели допускают вращение системы в целом.

Выполненное ранее исследование на устойчивость равновесной модели Бисноватого-Когана и Зельдовича (БКЗ) обобщается на нестационарные в начальном состоянии дисковые модели в работе Ж.М. Ганиева (НУУз). В частности, в нелинейной нестационарной версии равновесной модели БКЗ, для ряда значений волновых чисел $(m; N) = (10; 10), (11; 11), (12; 12), (13; 13), (14; 14), (15; 15)$, описывающих секторальные мелкомасштабные моды колебаний, были найдены соответствующие нестационарные дисперсионные уравнения. Для них получены критические зависимости вириального отношения от параметра вращения и найдены значения инкрементов нарастания неустойчивости [6].

4. СТРОЕНИЕ ГАЛАКТИКИ

Улучшение точности измерения расстояния от Солнца до сверхмассивной черной дыры (СМЧД, Sgr A*) в центральной области Галактики на основе моделирования движения звезды S2 (S0-2) вокруг СМЧД и измерений положения Sgr A* как переменного ИК-источника (8249 ± 9 пк, GRAVITY Collaboration et al., 2020) позволяет исследовать актуальный вопрос о точности определения расстояния до центра Галактики, связанной с возможным смещением СМЧД относительно барицентра Галактики. В работе И.И. Никифорова (СПбГУ) оцениваются пределы такого смещения в ходе возможного движения комплекса, включающего СМЧД и ядерное звездное скопление (ЯЗС), в регулярном поле Галактики при нынешних ограничениях на пекулярную/остаточную скорость СМЧД и современных

данных о центральных компонентах потенциала Галактики. Задача решается путем численного интегрирования орбиты комплекса СМЧД + + ЯЗС. Полученные результаты оказываются чувствительными к наличию/отсутствию в Галактике классического балджа и значению массы ядерного звездного диска. Параметры задачи быстро меняются по мере появления новых данных, однако при их текущих значениях (в приближении регулярных сил) маловероятно ожидать смещений СМЧД относительно барицентра более чем на 10–15 пк.

В работе, представленной Г.А. Гончаровым (ГАО РАН), различными методами были получены оценки межзвездного поглощения в высоких галактических широтах сквозь весь слой пыли в Галактике для множества фотометрических фильтров. Оценки покраснения внутри и вокруг 23 галактических шаровых скоплений показали, что первые систематически больше вторых на величину $E(B-V) = 0.04$. Получена оценка поглощения из сопоставления фотометрических наблюдений и теоретических изохрон для 43 галактических шаровых скоплений. Используя последние данные, были уточнены параметры предложенной им ранее модели трехмерного распределения пыли в широких галактических окрестностях Солнца. При сравнении с другими данная модель дает наиболее точные предсказания наблюдаемых цветов упомянутой выборки 101 810 гигантов сгущения. При этом предсказывается медианное покраснение $E(B-V) = 0.06$ для высоких широт $|b| > 50°$, причем до половины этого покраснения дает пылевой контейнер в поясе Гулда.

С появлением спектроскопических обзоров (LAMOST, RAVE) и данных Gaia стало возможным строить более детальные и точные трехмерные карты межзвездного поглощения. Предлагаемый в работе А.С. Авдеевой (ИНАСАН, НИУ ВШЭ) подход базируется на использовании закона косеканса зависимости межзвездного поглощения в видимой части спектра A_V от галактической широты b и расстояния по лучу зрения d: $A_V = a_0\beta(1 - \exp(-d\sin|b|)/\beta)/\sin|b|$. Данная зависимость имеет два параметра: a_0, показывающий поглощение на единицу длины в плоскости Галактики, и β, выражающий шкалу высот. В рамках проведенного исследования была получена оценка значений межзвездного поглощения с помощью данных спектроскопического обзора RAVE для выделенных направлений в южной части неба на высоких галактических широтах ($|b| > 20°$). Аппроксимируя полученные значения межзвездного поглощения законом косеканса для различных направлений, были определены значения a_0 и β для каждого из них, после чего зависимости $a_0(l,b)$ и $\beta(l,b)$ были фитированы сферическими функциями. Полученная аналитическая формула, выражающая зависимость A_V от галактических координат и расстояния, позволит в первом приближении оценить межзвездное поглощение для любого (в большей части неба) направления и расстояния [7].

А.А. Чемель (МГУ, ГАИШ МГУ) представил исследование пространственной структуры и кинематических особенностей выборки молодых OB звезд в пределах 4–5 кпк от Солнца на основе расстояний и собственных движений GAIA EDR3. Использованная в работе выборка включает в себя более 20 300 молодых звезд как северного, так и южного неба, среди которых присутствуют также около 350 классических цефеид, отобранных из каталога GAIA DR2 и их более поздней уточненной классификации. Основная цель работы – поиск и исследование молодых звездных групп – OB ассоциаций, являющихся основными маркерами современного звездообразования в диске Галактики. Для этого были привлечены методы кластерного анализа, основанные на алгоритме DBSCAN, позволяющем находить в данных кластеры произвольной формы при минимальном наборе входных параметров.

Работа А.В. Веселовой (СПбГУ) посвящена пространственному параметрическому моделированию выделяемых по мазерным источникам сегментов спиральных рукавов Галактики. По данным каталога Reid et al. (2019) на основе процедуры итеративного переприписывания выделены пять сегментов спиральных ветвей; методом наибольшего правдоподобия найдены параметры сегментов, включая углы закрутки, и расстояние до центра спиральной структуры (расстояние до центра Галактики). Обсуждается вопрос о значимости переменности углов закрутки по сравнению со строго логарифмической моделью средней линии сегмента и о возможности описания средней линии моделью с изломом. Также исследуется вопрос о существовании смещения геометрических полюсов системы спиральных ветвей относительно принятого направления отсчета галактических долгот. Каталог мазерных источников в областях формирования массивных звезд (HMSFRs, Reid et al., 2019) был дополнен объектами из каталога VERA (VERA et al., 2020), что также позволило сопоставить параметры спирального узора, выделяемого только по мазерам HMSFRs и по более общей выборке объектов.

Второй и предварительный третий релиз Gaia содержит данные о положениях, параллаксах и собственных движениях для более чем миллиарда звезд, определенных с беспрецедентной точностью. В работе С.А. Сапожникова (ИНАСАН) эти результаты используются для поиска рассеянных звездных скоплений и протяженных звездных

структур, таких как приливные хвосты скоплений и звездные потоки. Во многих статьях, опирающихся на данные Gaia, протяженные структуры ищутся либо алгоритмами неконтролируемого обучения, например DBSCAN/HDBSCAN, в массиве звезд в целом, либо путем поиска соседей известных звездных скоплений в фазовом пространстве. В данной работе также предлагается использовать алгоритмы кластеризации, но применять их не к исходному каталогу звезд, а к предварительно составленному списку звездных пар. Вхождение в пару определяется соотношением параметров, ожидаемым от пары звезд, входящих в одну протяженную структуру. Такой предварительный каталог пар обладает гораздо большей контрастностью звездных структур по отношению к фону, что упрощает работу алгоритма кластеризации, а варьирование параметров, требуемых от звездных пар, дает дополнительную степень свободы в регулировке параметров поиска. Алгоритм протестирован не только на данных Gaia, но и на модели звездного фона, что позволило убедиться в отсутствии эффекта обнаружения “структуры” в случайных колебаниях плотности звезд и выполнить более тонкую регулировку его параметров [8].

Г.Н. Дремова (РФЯЦ ВНИИТФ) представила доклад, посвященный возможному механизму генерации свободных планет при участии сверхмассивной черной дыры (СМЧД). Методом прямого численного моделирования было рассчитано прохождение планетной системы на разных расстояниях (25–100$R_\odot$) от СМЧД с массой $10^6 M_\odot$. Планетная система включает родительскую звезду (Солнце), планету-гигант (Юпитер) и тор малых планетных тел ($N = 10^4$), центрированный по орбите Юпитера. Анализ изменения полной энергии всей системы, а также энергий связи малого планетного тела с СМЧД, звездой и Юпитером позволяет диагностировать свободные планеты. Оценка разрушений планетных тел вблизи массивных объектов выполнялась в соответствии с критерием сдвиговой прочности, предельное напряжение которой задавалось 75 МПа. На основе расчетных спектров скоростей была выделена популяция сверхскоростных планет.

5. ЗВЕЗДНЫЕ СКОПЛЕНИЯ

В работе, представленной Г.А. Гончаровым (ГАО РАН), делается сравнение наблюдаемых свойств шаровых скоплений Галактики с предсказаниями теоретических моделей внутреннего строения и эволюции звезд. Для выявления членов скоплений, размера скоплений и вычисления системных собственных движений используются параллаксы и собственные движения из Gaia EDR3. Для вычисления наиболее вероятного расстояния, возраста, межзвездного поглощения во множестве фильтров и дифференциального покраснения в поле скопления используется фотометрия в более чем 30 фильтрах от ультрафиолета до среднего инфракрасного диапазона из HST, Gaia EDR, Pan-STARRS DR1, DES, SDSS, unWISE, SAGE и других источников в сопоставлении с изохронами PARSEC, MIST, DSEP, BaSTI-IAC, как для солнечной шкалы металличности, так и для шкалы с обогащением гелием и альфа-элементами. Металличность и обогащение скоплений принимаются из спектроскопических наблюдений и тестируется на соответствие фотометрическим результатам. Найденные поглощения во множестве фильтров позволяют оценить закон поглощения для каждого скопления. Полный анализ выполнен для 5 скоплений (NGC 288, NGC 362, NGC 5904, NGC 6205, NGC 6218), предварительный анализ на основе только астрометрии и фотометрии Gaia EDR3 – еще для 38 скоплений. Рекордно точная астрометрия Gaia EDR3 позволила отделить звезды скоплений и фона, показав, что размеры многих скоплений значительно больше, чем считалось до сих пор. Расстояния, полученные из сопоставления фотометрии с изохронами, оказались определены точнее, чем расстояния по параллаксам Gaia EDR3.

Л.Н. Ялялиева (МГУ, ГАИШ МГУ) представила первые результаты по комплексному исследованию кинематики и структуры рассеянных звездных скоплений с привлечением фотометрических, спектроскопических и астрометрических данных на примере рассеянного скопления NGC 225. В работе были использованы данные из разных источников: как полученные самостоятельно из наблюдений (фотометрия в полосах U, B, V, R, I, спектральные данные), так и высокоточные собственные движения и расстояния из обзора GAIA DR2, DR3. Помимо определения основных физических параметров (расстояния, покраснения в направлении скопления, возраста, средней лучевой скорости и среднего собственного движения), была сделана оценка доли двойных звезд в скоплении, их влияние на динамический разогрев и функцию масс скопления, а также определена орбита скопления относительно центра Галактики.

В докладе М.Д. Сизовой (ИНАСАН) рассмотрены данные Gaia EDR3 для звезд потока Большая Медведица. Рассчитано движение звезд вокруг галактического центра в прошлые эпохи. Изучены случаи близких прохождений звезд потока и ближайших к Солнцу рассеянных звездных скоплений.

С.Н. Нуритдинов (НУУз) представил результаты моделирования видимой плотности шаровых скоплений (ШС). Путем минимизации квадрата разности наблюдаемой и теоретической

плотностей найдены значения степени концентрации звезд для 26 скоплений по данным работы Миокчи и др. (2013) и 81 скопления по данным работы де Бойер и др. (2019). Для первой группы были получены достаточно хорошие корреляции степени концентрации с основными физическими характеристиками этих ШС благодаря наличию соответствующих ПЗС наблюдений центральных областей скоплений в рамках программы HST. Для скоплений второй группы используются данные наблюдений Gaia DR2 и из-за недостатка информации по центральным областям ШС необходимо провести дополнительное моделирование их видимой плотности [9].

В докладе, представленном Д.А. Ковалевой (ИНАСАН) по данным Gaia, исследуются близко расположенные друг к другу рассеянные звездные скопления Collinder 135 и UBC 7. Выделены вероятные члены скоплений, определены их средние характеристики, выполнено обратное интегрирование орбит скоплений во времени с целью ограничения возможных сценариев их эволюции. Показано, что возможное случайное совпадение пространственных, кинематических и возрастных характеристик скоплений является маловероятным. Выделены сценарии, в рамках которых в прошлом скопления находились на меньшем расстоянии друг от друга. Вероятно, потеря скоплениями газа и части звезд в ходе ранней эволюции привела к потере гравитационной связи между компонентами этой двойной системы. Свидетельством такой потери может служить обширная асимметричная звездная корона, обнаруженная вокруг Collinder 135 и UBC 7.

Результатам поиска неразрешенных двойных систем в рассеянных скоплениях на основе данных фотометрии в видимом и инфракрасном диапазонах посвящен доклад А.Ф. Селезнева (УрФУ). Были найдены такие комбинации звездных величин и показателей цвета в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне, при которых одиночные и неразрешенные двойные звезды хорошо разделяются на фотометрических диаграммах. Исследована зависимость отклонения неразрешенной двойной звезды от последовательности одиночных звезд на таких диаграммах от отношения масс компонентов двойной системы. Предложенная методика применяется для исследования населения неразрешенных двойных систем в рассеянных скоплениях Плеяды, NGC 6231, IC 2602. Используются фотометрические полосы и данные фотометрии каталогов Gaia EDR3, 2MASS, WISE, Spitzer, SDSS, а также доступная фотометрия в полосах *UBVR*.

В работе М.И. Маричевой (САО РАН) представлены результаты определения металличности, возраста, удельного содержания гелия (Y) и содержаний элементов C, N, Mg, Ca, Mn, Ti, Cr для четырех шаровых скоплений (ШС) галактики M31: Bol 6, Bol 20, Bol 45 и Bol 50. Спектры исследуемых скоплений были получены на 6-м телескопе БТА САО РАН в 2020 г. Выполнено сравнение наблюдаемых спектров с синтетическими, рассчитываемыми с использованием моделей звездных атмосфер. Параметры атмосферы задаются теоретической изохроной звездной эволюции. Звезды складываются в суммарный спектр согласно заданной функции масс. Проведено сравнение полученных спектров ШС с интегральными спектрами скоплений Галактики NGC 6342, NGC 6362, NGC 6637, NGC 6638 и NGC 6652. Выполнено сравнение полученных содержаний у скоплений, ШС, звезд Галактики и M31 при металличности [Fe/H] ~ –1 dex. Для всех объектов подобраны аналоги по металличности, возрасту и Y. Все исследуемые скопления оказались старше 10 млрд. лет. Полученные значения металличности [Fe/H] находятся в диапазоне от –0.75 до –1.1 dex. Для всех четырех ШС в литературе имеются данные металличности и возраста, оцененные фотометрическими методами и по спектрам умеренного разрешения, в основном методом Ликских индексов. Обсуждаются причины различий в оценках параметров у разных авторов. Впервые для скоплений выборки получены значения удельного содержания гелия, а также химический состав для скоплений Bol 20 и Bol 50.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Конференция “Современная звездная астрономия – 2021” проводилась 23–24 августа 2021 г. в ГАИШ МГУ и была одиннадцатой конференцией этого цикла. Предыдущие конференции проводились в ГАИШ МГУ (Москва), ГАО РАН (Санкт-Петербург), ЮФУ (Ростов), КГО 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *T. Abdulmyanov*, Open Astronomy **30**, 83 (2021). https://doi.org/10.1515/astro-2021-0010

2. *E. A. Mikhailov and R. R. Andreasyan*, Open Astronomy **30**, 127 (2021).
https://doi.org/10.1515/astro-2021-0017
3. *P. Pakhomova, L. Berdnikov, A. Kniazev, I. Katkov, and O. Malkov*, Open Astronomy **31**, 106 (2022).
https://doi.org/10.1515/ astro-2022-0013
4. *A. M. Mickaelian, G. A. Mikayelyan, H. V. Abrahamyan, G. M. Paronyan, and O. Y. Malkov*, Open Astronomy **30**, 210 (2021).
https://doi.org/10.1515/astro-2021-0027
5. *A. V. Khruslov*, Open Astronomy **31**, 148 (2022).
https://doi.org/10.1515/astro-2022-0020
6. *J. Ganiev and S. Nuritdinov*, Open Astronomy **31**, 92 (2022).
https://doi.org/10.1515/astro-2022-0011
7. *A. Avdeeva, D. Kovaleva, O. Malkov, and A. Nekrasov*, Open Astronomy **30**, 168 (2021).
https://doi.org/10.1515/astro-2021-0022
8. *S. Sapozhnikov and D. Kovaleva*, Open Astronomy **30**, 191 (2021).
https://doi.org/10.1515/astro-2021-0025
9. *S. Nuritdinov, A. Rastorguev, and I. Tadjibaev*, Open Astronomy **31**, 1 (2022).
https://doi.org/10.1515/astro-2022-0001