

Т. В. Мишенина

ГАЛАКТИКА,

ЕЕ СТРОЕНИЕ И ОБОГАЩЕНИЕ
ХИМИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ



Министерство образования и науки Украины
Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова

Т. В. Мишенина

ГАЛАКТИКА, ЕЕ СТРОЕНИЕ И ОБОГАЩЕНИЕ ХИМИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Монография

Одесса
«Астропринт»
2017

УДК 524.6
М71

Рецензенты:

Профессор кафедры астрономии и космической информатики
Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина,
доктор физико-математических наук, профессор *В. А. Захожай*;
Заведующий кафедрой «Математика, физика и астрономия»
Одесского национального морского университета, доктор физ.-мат.
наук, профессор *И. Л. Андронов*

*Рекомендовано к печати ученым советом Одесского
национального университета имени И. И. Мечникова
(протокол № 6 от 28 февраля 2017 г.)*

В оформлении обложки использована репродукция картины
«Звездное небо». Автор: Венцель Хаблик (Wenzel August Hablik).

Мишенина Т. В.

М71 Галактика, ее строение и обогащение химическими
элементами : монография / Т. В. Мишенина. – Одесса : Астро-
принт, 2017. – 168 с. : ил.
ISBN 978-966-927-260-7

В монографии представлено общее описание Галактики, ее структуры и современное понимание ее химической эволюции. Рассмотрены проблемы, связанные с изучением структуры и развитием Галактики, производством химических элементов и обогащением межзвездной среды. Подчеркнута роль, которую играет теоретическое моделирование, опирающееся на расчеты нуклеосинтеза и на связь наблюдаемых кинематических свойств и химического состава различных галактических структур.

Монография может быть использована при чтении курсов общей и теоретической астрофизики, звездной астрономии, будет полезной для студентов, аспирантов, молодых ученых, а также для всех, кто интересуется современным состоянием изучения нашей Галактики.

УДК 524.6

ISBN 978-966-927-260-7

© Мишенина Т. В., 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. СТРОЕНИЕ И ХИМИКО-ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ГАЛАКТИКИ	
1.1. Общие положения	10
1.2. Обогащение Галактики химическими элементами и нуклеосинтез	18
2. МОРФОЛОГИЯ ГАЛАКТИКИ	
2.1. Галактический диск	24
2.1.1. Звездные диски	24
2.1.2. Рассеянные звездные скопления	36
2.1.3. Газопылевой диск	43
2.1.4. Межзвездное магнитное поле и космические лучи	46
2.1.5. Процессы звездообразования в Галактике	51
2.2. Выделенные структуры диска	56
2.2.1. Большой спиральный узор	56
2.2.2. «Кости» Галактики	61
2.2.3. Кольцо Единорога	62
2.3. Сферическая составляющая, гало Галактики	64
2.3.1. Шаровые скопления	64
2.3.2. История исследования химического состава шаровых скоплений	68
2.3.3. Современный взгляд на химический состав звезд гало ..	75
2.3.4. Внешнее гало	81
2.3.5. Высокоскоростные облака	84
2.3.6. Корона	86
2.4. Балдж и центр галактики	87
3. ХИМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ГАЛАКТИКИ	
3.1. Формирование Галактики	96
3.2. Основные источники обогащения	99
3.3. Базовые положения моделирования химической эволюции ..	104
3.4. Модели химической эволюции Галактики	110
3.4.1. Модель Феррини	110
3.4.2. Описание моделей других авторов	113
3.5. Сравнение наблюдательных данных с моделями ГХЭ	117
3.6. Химическая эволюция меди и цинка	120
3.6.1. Нуклеосинтез и химическая эволюция меди и цинка ...	121
3.6.2. Производство меди и цинка	122
3.6.3. Галактическое обогащение Cu и Zn: тестирование и некоторые заключения	125
3.7. Сравнение различных моделей ГХЭ	129
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	139
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	142

Список сокращений

АВГ – асимптотическая ветвь гигантов

НФМ – начальная функция масс

ГП – главная последовательность

ГХЭ – галактическая химическая эволюция

ГР диаграмма – диаграмма Гецшпрунга – Рассела

КГ – красные гиганты восходящей ветви

КГК – красные гиганты клампа

к/а (*box/peanut* – коробка/арахиса) – балдж-структура, представляющая внутреннюю трехмерную часть Галактического бара и имеющая вид коробки ядра ореха арахиса

МЗС – межзвездная среда

МО, ММО, БМО – Магеллановы Облака, Малое Магелланово Облако, Большое Магелланово Облако

НФМ – начальная функция масс

РС – рассеянное скопления

СЗО – скорость звездообразования

ШС – шаровое скопления

*От Млечного Пути кружится голова,
Как бы от бездны под ногою.*

Вера Инбер

ВВЕДЕНИЕ

Слово «галактика» (от греч. γαλακτικός – млечный) происходит от греческого названия нашей Галактики – Млечный Путь и восходит к древнегреческому мифу о пролитом молоке кормилицы Геракла. Эта восхитительная светящаяся полоса вечернего летне-осеннего неба опоясывает небосвод широким кольцом, передавая свечение миллиардов звезд нашей Галактики. Что же такое Галактика в современном понимании и когда и как сформировалось представление о нашей звездной системе? Несмотря на то, что большинство философов считает, что наука как особая форма духовной деятельности появилась в классической Греции периода расцвета демократии (VII-VI века до н.э.), ее зачатки (в частности астрономии) прослеживаются еще в Древнем Египте, Вавилоне и Индии. Это были математические (геометрические) представления движений и положений Солнца, Луны, планет, вычисление лунных и солнечных затмений; детальное изучение неподвижных звезд, их восходов, кульминаций и заходов. Но космологические представления, то есть описание картины мира, Вселенной, в том числе и нашей звездной системы, долго были на уровне мифов. В древнегреческой же космологии можно уже выделить несколько направлений, поддерживаемых различными философскими школами. Так, пифагорейцы (Платон, Евдокс, Гераклid Понтийский, Архимед, Гиппарх, Птолемей, Пифагор и Аристотель) придерживались математического описания небесных движений и геометрического осмысления Вселенной. Это сыграло огромную роль в развитии астрономии. Эмпедокл, Анаксимандр, Анаксагор, Демокрит и Эпикур уделяли внимание эволюции мира и единству вещества во Вселенной. И вот уже в III веке до н.э. Евдокс объяснял сложное движение светил как сумму движений сфер. Эта гипотеза поддерживала взгляды платоников и стоиков, рассматривавших Вселенную как сферу. В системах Евдокса и Гераклida Земля считалась шарообразной, находящейся в центре сферической Вселенной, ограниченной небом неподвижных звезд. Атомисты, последователи Демокрита, Эпикура и Анаксагора рассматривали Землю плоской, окруженной сферическим вихрем, который нес сгущения материи – небесные тела, они также рассматривали образование миров из первичных вихрей. При этом пространство считалось бесконечным, наполненным множе-

ством миров, “беспределельна Вселенная как по множеству тел, так и по обширности пустоты ... миры бесчисленны, и некоторые схожи с нашим, а некоторые несхожи”, – как писал Эпикур [461], с. 409. Аристарх Самосский (ок. 310 – 250 годов до н.э.), александрийский математик, предложил гелиоцентрическую картину мира, с центром, в котором находилось Солнце, а не Земля, но которая не была признана в эпоху античности. От идеи относительности движения он перешел к геометрическим доказательствам, подтвержденным наблюдениями, от двойного вращения Земли в плоскости экватора с периодом в одни сутки вокруг фантастического небесного тела Гести (огонь) – к ее годичному обращению вокруг Солнца в плоскости эклиптики. Эпикур учил о бесконечности пространства, Аристарх – о бесконечной удаленности звезд. Таким образом, философы античности были достаточно близки к современному взгляду на окружающий мир, место Солнца и звезд. Многие из них предполагали, что Млечный Путь состоит из звезд, но все еще были далеки от представления о звездной системе, Галактике, и действительном месте Земли и Солнца в ней. Возобладавшая, в конечном счете, геоцентрическая система Птолемея на несколько столетий «законсервировала» научные поиски и исследования в других направлениях.

В 1610 году Галилео Галилей сделал великое открытие, направив свой телескоп на Млечный Путь. Он обнаружил, что облака Млечного Пути состоят из огромного числа слабых звезд. Потребовалось еще полтора столетия, чтобы немецкий философ Иммануил Кант, опираясь на работы астронома Томаса Райта и законы тяготения, открытые Исааком Ньютоном, пришел к выводу, что наша звездная система, Галактика, большей частью которой является и Млечный Путь, может быть вращающимся диском, состоящим из огромного количества звезд, удерживаемых гравитационными силами, сходными с теми, что действуют в Солнечной системе (1755 год). И этот диск выглядит как светящаяся полоса на небе с места расположения Земли и Солнца в Галактике. Т. о., помимо математических (геометрических) представлений к исследованию мира была привлечена физика. «Млечный Путь – эклиптика для звезд, – писал И. Кант, – а Сириус – центральное тело». В последнем он заблуждался, однако высказал предположение, что некоторые из туманностей, известные к тому времени и видимые на ночном небе, могут быть другими галактиками. И снова потребовалось полтора столетия, чтобы эта догадка получила наблюдательное подтверждение.

Вместе с тем уже в конце XVIII века, благодаря колоссальной работоспособности, гению и таланту Уильяма Гершеля (рис. 1.1), помощи его сестры Каролины, а впоследствии наблюдениям его

сына Джона Гершеля, проведенным в Южном полушарии, методом подсчета звезд была построена картина нашей Галактики. Гершель дал убедительное доказательство тому, что расстояния до различных звезд неодинаковы, и что Солнце по отношению к ближайшим звездам движется в пространстве. Звездная система – Галактика, в которую входит и наше Солнце, имеет вид сплюснутого диска. Поскольку была обнаружена большая звездная плотность в Южном полушарии, это было свидетельством того, что Солнце не лежит в плоскости симметрии, а несколько возвышается, находится над плоскостью Галактики. Но само Солнце в этой кар-



Рис. 1.1. Фредерик Уильям Гершель (1738 – 1822)

тине мира все еще находилось в центре нашей большой звездной системы. Именно У. Гершель ввел световой год (св. год) как единицу измерения расстояния. Он также писал «Я не считаю необходимым повторять, что небеса состоят из участков, в которых солнца собраны в системы». В 1791 г. он пришел к фундаментальному выводу о природе туманностей: одни из них состоят из газа и входят в состав Галактики, а другие сами являются самостоятельными звездными системами (что утверждал еще в 1786 г.) и расположены далеко за его границами. Благодаря наблюдениям Харлоу Шепли уже в XX веке был обнаружен настоящий центр Галактики по пространственному расположению 69 шаровых скоплений [346], хотя при этом Х. Шепли считал все туманности членами нашей звездной системы [472]. А в конце 1923 года Эдвин Пауэл Хаббл (рис. 1.2) получил снимки туманности Андромеды и обнаружил на них цефеиды. Работу о своем открытии, он опубликовал только в 1925 году [168], тщательно все проверив. Как гласит история, Э. Хаббл написал Шепли о своем открытии, на что, получив письмо, Х. Шепли сказал «Это письмо разрушило мою вселенную». Э. Хаббл оценил расстояние до туманности Андромеды в 930 000 световых лет, используя установленную Генриэттой Ливитт зависимость «период-светимость» для цефеид [198]. Для того времени это была шокирующая цифра, хотя и вдвое меньше современных оценок. После этого стало ясно, что большинство спиральных туманностей – это гигантские звездные системы, находящиеся на огромных расстояниях от нашей Галактики.

Именно Х. Шепли, а не Э. Хаббл предложил называть внешние звездные системы «галактиками». Э. Хаббл все еще был подвержен консервативным взглядам на мир, впрочем, который он сам и опроверг. Эдвин Хаббл, человек, доказавший, что Млечный Путь лишь одна из неисчислимого множества галактик, так и не перестал называть эти объекты «экстра-галактическими туманностями» [169].

Следующим шагом в понимании строения Галактики было осознание того, что Млечный Путь содержит огромное количество газа и пыли. Одним из первых, кто обратил внимание на наличие поглощения света звезд межзвездной субстанцией, был швейцарский астроном Жан Филлип де Шезо (1744). Он, формулируя фотометрический парадокс (парадокс Шезо – Ольберса) – почему яркость ночного неба не такая, как яркость Солнца, ведь огромное число звезд должно создавать очень яркое небо, заявил: облака пыли «закрывают» свет далеких звезд. Однако, как впервые отметил Джон Гершель в 1848 году, это объяснение неправильно: пыль сама должна нагреваться и светиться так же ярко, как звезды (в однородной изотропной Вселенной в силу закона сохранения энергии). В современной космологии фотометрический парадокс объясняется конечностью возраста Все-

ленной и конечностью скорости света. Спустя почти 100 лет, основываясь на наблюдениях звезд, о межзвездном поглощении русский астроном Вильгельм Струве в 1847 году установил: «Я не вижу никакого другого объяснения, помимо допущения, что интенсивность света убывает быстрее, чем обратно пропорционально квадрату расстояния, а это означает, что существует потеря света, ослабление при прохождении света через мировое пространство» [369]. Поглощение и рассеяние электромагнитного излучения веществом (пылью и газом), находящимся в межзвездном пространстве между излучающим астрономическим объектом и наблюдателем, описывается

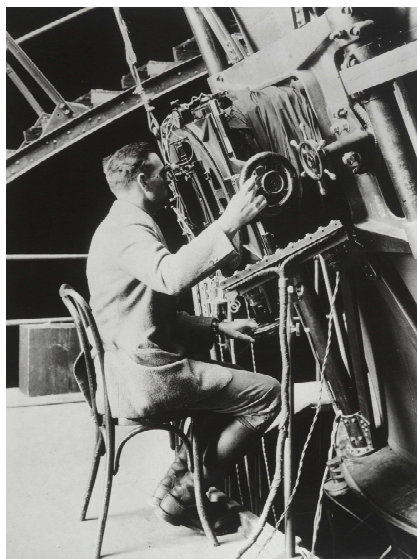


Рис. 1.2. Эдвин Пауэл Хаббл за 100-дюймовым телескопом Хукера, обсерватория Маунт-Вилсон, 1922 г.

межзвездной экстинкцией, которая представляется зависимостью «поглощения света» от длины волны. В 30-е годы двадцатого столетия Роберт Трюмплер оценил его по спектрофотометрическим измерениям пар звезд и исследованию рассеянных скоплений [427].

Распределение поглощающей материи в Галактике можно получить различными методами. Это может быть исследование отдельных темных туманностей, избытков цвета и расстояний до большого числа звезд и прочее. Газ и пыль в Галактике сосредоточены в различного рода облаках – от круглых черных компактных пылевых глобул до гигантских неправильной формы агрегатов. Таковы они в созвездиях Ориона, Тельца, Лебедя и Скорпиона. Эти космические облака связаны со спиральными рукавами Галактики, которые были известны ранее из наблюдений ярких звезд. Межзвездные линии поглощения открыты Дж. Хартманом в 1904 году [156]. Они принадлежали атомам и ионам Ca, Na, Fe, Ti.

Бертил Линблад в 1925 году оценил скорость Солнца относительно звезд (20 км/с) и обнаружил два противоположно направленных потока звезд, обусловленных вращением Галактики [204]. Ян Хендрик Оорт в 1927 году [278] на основе статистического изучения лучевых скоростей и собственных движений строго обосновал гипотезу Б.Линблада о вращении Галактики вокруг ее центра [204; 205] и показал, что Галактика вращается не как твердое тело – внутренние ее части вращаются быстрее, скорость уменьшается с расстоянием от центра. Он также определил скорость галактического вращения (220 км/с в окрестности Солнца) и период вращения (220 млн лет в окрестности Солнца). Ян Хендрик Оорт первым выделил два типа населения в нашей Галактике, как отмечал Вальтер Бааде [27]. Сам же Вальтер Бааде доказал, что в центральной области галактики Андромеды концентрируются звезды того же типа, что и в шаровых скоплениях и эллиптических галактиках, включая короткопериодические цефеиды (т. е. звезды типа RR Lyr) и назвал их населением II. В спиральных рукавах этой галактики Бааде обнаружил концентрацию пыли и газа, наряду с молодыми O-, B-звездами высокой светимости и рассеянными скоплениями, которые он отнес к населению I.

Так мы подошли к современному взгляду на строение и эволюцию нашей Галактики.

1. СТРОЕНИЕ И ХИМИКО-ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ГАЛАКТИКИ

1.1. Общие положения

Наша Галактика Млечный Путь является большой дискообразной спиральной галактикой с перемычкой, с диаметром диска, который мы наблюдаем в оптическом излучении, около 25-30 кпк (или около 10^5 световых лет) по разным данным. Она содержит около $3 \cdot 10^{11}$ звезд, а ее общая масса с учетом протяженного гало составляет около $6 \cdot 10^{11} M_{\odot}$, что почти в 5 раз превышает массу, сосредоточенную в пределах оптического диска. Помимо звезд в Галактике содержится межзвездный газ, пыль и, как показали исследования последних лет, в частности, спутника WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*), запущенного в 2001 году НАСА (*NASA, National Aeronautics and Space Administration*) для исследования реликтового излучения, образовавшегося в результате Большого взрыва, большая доля темной материи и, возможно, темной энергии, связанные силами гравитационного взаимодействия. В 2009 году ЕКА (Европейское Космическое Агенство) с аналогичной целью была запущена космическая обсерватория «Планк» (*Planck*), названная в честь Макса Планка, известного немецкого физика. По ее данным, Вселенная состоит на 4.9% из обычного (барионного) вещества (по данным WMAP – 4.6%), на 26,8% из темной материи (против 22.4%) и на 68.3% (против 73%) из темной энергии [42; 366]. Непосредственно в Галактике эти пропорции могут отличаться.

Наша Галактика, как и другие спиральные галактики, характеризуется сложной многокомпонентной структурой. Яркий диск погружен в слабосветящуюся сферическую подсистему – гало. Центральная часть Галактики – это плотное эллипсоидальное сгущение звезд, называемое балджем (от англ. *bulge* – выпуклость), являющееся трехосным бароподобным образованием (по наблюдениям спутника COBE (*Cosmic Background Explorer*, запущенного в 1989 году для исследований реликтового фона)) и ядро. В самом центре ядра (50×30 пк) находится компактный объект Стрелец А (*Sgr A**), возможно, представляющий собой черную дыру. В настоящее время крупномасштабная структура галактического диска обычно моделируется в виде двойного диска с экспоненциальным распределением плотности. Модель рассматривает тонкий диск, вертикальный масштаб вблизи Солнца 0.2–0.3 пк и толстый диск, вертикальный масштаб 1 кпк, при максимальной высоте около 3 кпк и расстоянии Солнца от галактического центра $R_0 = 7.5$ кпк, протяженность диска оценивается в $R = 12$ кпк [322]. Самыми распространенными звездами, населяющими галактический диск, являются холодные звезды – карлики; к типичным представителям тон-

кого диска можно отнести горячие звезды спектральных классов О-В, долгопериодические цефеиды, рассеянные звездные скопления (РС) и ассоциации, газо-пылевые туманности. Красные гиганты, долгопериодические и неправильные переменные звезды, белые карлики, новые звезды, пульсары, черные дыры и планетарные туманности в большей степени характерны для толстого диска.

Сферическая подсистема (гало) – это красные карлики и субкарлики, красные гиганты, коротко- и сверхдолгопериодические цефеиды, звезды типа RR Лиры, шаровые скопления (ШС). Однако четкого разделения тех или иных типов звезд и объектов по структурным подразделениям в Галактике нет. Перечисленные объекты могут наблюдаться как в тонком, так и в толстом дисках, а также гало.

С учетом оценок скорости убегания звезд в окрестности Солнца, равной 475 км/с, и скорости движения 200 км/с, получено, что гало Галактика простирается, по крайней мере, до $R = 46$ кпк [322], то есть до Магеллановых Облаков (МО), двух галактик неправильной формы, являющихся спутниками нашей Галактики, вращающимися вокруг общего с ней центра масс. Результаты исследования динамики систем шаровых скоплений, карликовых спутников Галактики и галактики Туманность Андромеды свидетельствуют о еще более массивном и протяженном гало ($R = 100\text{--}200$ кпк). Современные наблюдения шаровых скоплений и удаленных звезд также указывают на наличие в гало двух различающихся подструктур – верхнего и нижнего гало, собственного и аккрецированного. В частности, в работе [51] по наблюдениям ШС оценен размер собственного гало, генетически связанного с протооблаком; его значение равно 10 кпк и это меньше, чем размер оптического диска. Именно аккрецированное гало, которое фактически делает видимой корону, состоящую из темного вещества, и простирается так далеко.

С помощью наземных оптических телескопов не удастся изучить всю Галактику, поскольку видимое излучение не проникает сквозь плотные межзвездные облака газа и пыли, которых особенно много в направлении на центр Галактики. В 1944 году Хендрик ван де Хулст предсказал существование радиоизлучения с длиной волны в 21 см, излучаемого межзвездным атомарным водородом. В 1948 г. Иосиф Шкловский рассчитал, что излучения Галактики достаточно, чтобы эту линию можно было наблюдать с помощью современных инструментов, и оно было обнаружено в 1951 г. Для радиоизлучения и инфракрасного (ИК) излучения пыль не препятствие: с помощью соответствующих телескопов удастся исследовать всю Галактику и даже пробиться к ее плотному ядру.

Еще в 1852 году Стивен Александер высказал предположение, согласно которому Млечный Путь представляет собой систему спиральных ветвей, исходящих из центра, в котором находится Солнце, а также все ярчайшие звезды. Бертил Линдблад, рассматривая движения звезд в больших скоплениях (галактиках), нашел, что звезды стремятся концентрироваться в спиральных рукавах, а спирали лидируют во вращении галактики (в настоящее время считается, что они «волочатся», отстают). Он первым (1955) высказал идею о том, что всякий спиральный рукав представляет собой не некоторое материальное образование, а волну. В 1964 г. Ци-Цяо Лин и Франк Шу [203] показали, что благодаря гравитационной неустойчивости в галактиках могут существовать волны плотности спиралевидной формы, вращающиеся с угловой скоростью и распространяющиеся по радиусу с определенной групповой скоростью. Поскольку в Галактике газа мало (2–5% от ее массы), то волны распространяются по звездному населению, в котором они могут возбуждаться. А межзвездный газ втекает в рукава, довольно долго задерживается там, после чего выходит за пределы рукава, а на его место приходят другие облака межзвездного газа. Рассматриваются различные причины возникновения волн плотности: это может быть существование в центре асимметричного образования – вращающегося бара, генератора волн или наличие гравитационной неустойчивости. По мере увеличения вращения и приобретения Галактикой формы диска возрастает число неустойчивых мод собственных колебаний. Наличие бара в центре нашей Галактики в последнее десятилетие XX века доказано рядом наблюдений. В 2005 г. Робертом Бенджаминем с коллегами [125] были проанализированы данные GLIMPSE (*Galactic Legacy Mid-Plane Survey Extraordinaire*) каталога, содержащего около 30 млн ИК-источников, полученные спутником «Спитцер» (*Spitzer Space Telescope*, инфракрасный телескоп НАСА, назван в честь американского астрофизика Лаймана Спитцера). Они показали наличие длинного бара, проходящего через центр Галактики с полушириной $R_{\text{bar}} = 4.4 \pm 0.5$ кпк, наклоненного на угол $\varphi = 44^\circ \pm 10^\circ$ к линии Солнце – центр Галактики. Также образование спиральной структуры может быть вызвано внешними причинами, например, приливного характера, вызванного взаимодействием с близлежащей галактикой (к примеру, Большим Маггелановым Облаком – БМО) или прохождением в соответствующей близости другой галактики.

В последнее время получено все больше подтверждений тому, что в нашей Галактике содержатся объекты, ею захваченные, движущиеся и гравитационно взаимодействующие с объектами в межгалактической среде [144]. Об этом говорят и кинематические, и спектральные исследования звезд шаровых скоплений в нашей Галакти-

ке, а также многочисленные снимки космического телескопа «Хаббл» (названный именем Эдвина Хаббла, запущенный в апреле 1990 г.). Так, например, есть основания полагать, что Млечный Путь вероятно «захватил» большое шаровое скопление звезд Чаша (*Crater, Laevens 1*) у соседней галактики [7]. Чаша находится далеко, на расстоянии в $4.7 \cdot 10^5$ световых лет (~ 144 кпк), примерно в 17 раз дальше от центра Млечного Пути, чем Солнце. Кроме того, возраст обнаруженного скопления составляет всего 7.5 млрд лет, то есть оно гораздо моложе других шаровых скоплений Галактики. Это свидетельствует о том, что скопление может происходить из другой галактики и, возможно, ранее принадлежало галактике Малое Магелланово Облако (ММО). К тому же его химический состав, сходный с химическим составом скоплений ММО, того же возраста. Другим объяснением появления этого скопления в Млечном Пути может быть межгалактический «канныализм» или мержинг (слияние/слипание от англ. *merging*), а небольшая галактика, в которой оно было образовано, может больше не существует, поскольку гравитация Млечного Пути могла разорвать ее на части. Кроме того, как было установлено, на близких орбитах к Млечному Пути вращаются еще две карликовые галактики, которые могут иметь общее происхождение с ним [24].

Несмотря на наличие пыли и газа в Галактике, вносящих вклад в гравитацию, первые галактические модели, описывающие динамику, опирались на предположение, что наша звездная система состоит, главным образом, из звезд. Бесстолкновительная звездная динамика восходит к теореме Джеймса Джинса (1928) [183] и рассматривает шесть интегралов, которые являются уравнениями движения звезды в гравитационном поле системы (см. подробнее в [469; 464; 468; 463]). Звездная динамика использует как методы аналитической механики, так и методы статистической физики. Это обусловлено тем, что в реальных звездных системах (даже без учета кратных звезд) количество объектов зачастую слишком велико.

В основу современных динамических моделей галактик положено численное интегрирование уравнений движения N тел, где N – несколько миллионов (в зависимости от модели) частиц, имитирующих диск, балдж и темное гало.

При описании Галактики звезды представляются материальными точками (средние расстояния между ними гораздо больше самих размеров звезд), которые характеризуются функцией распределения фазовой плотности, выражающей собой плотность вероятности найти звезду соответствующей массы в конкретный момент времени в точке координатного пространства и пространства скоростей. Шести-мерное пространство координат и скоростей называют фазовым. Для удобства кинематических рассматриваний используют не точку – каж-

дую звезду, а поле скоростей центроидов тех или иных подсистем относительно центроида наблюдателя. Центроид задается всеми объектами рассматриваемой группы, а скоростью центроида принимается средняя скорость движения этих объектов. Каждый из объектов, входящий в рассматриваемую группу (например, в группу с Солнцем), имеет свою, так называемую пекулярную или остаточную скорость относительно центроида этих объектов. Очевидно, что сумма скоростей всех объектов относительно их центроида равна нулю. Центроид можно определить как точку, занимаемую Солнцем, движущуюся относительно него со скоростью, равной средней скорости объектов в данном элементарном макроскопическом объеме пространства. Этот объем должен быть достаточно велик, чтобы в него попадало много объектов, но при этом составлять малую долю объема всей звездной системы. Понятие центроида применимо к любой точке объема Галактики (см. подробнее: [468]). Случайное распределение векторов скоростей описывается нормальным распределением; уровневые поверхности, описывающие форму трехмерного распределения, являются трехосными эллипсоидами. Описание распределения остаточных скоростей звезд ведет начало от работ по звездной статистике, выполненных Карлом Шварцшильдом (1912) в начале XX века [341]. Распределение Шварцшильда с некоторыми упрощениями имеет вид:

$$f(U, V, W) dudvdw = K \cdot \exp(-U^2 / 2\sigma_u^2 - V^2 / 2\sigma_v^2 - W^2 / 2\sigma_w^2),$$

где U, V, W – остаточные скорости, а $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$ – соответствующие дисперсии остаточных скоростей.

Для пространственного описания Галактики, ее кинематики и динамики используют галактическую цилиндрическую систему координат (R – расстояние от центра Галактики, θ – угол между направлениями на объект и на Солнце из центра Галактики, z – расстояние от плоскости Галактики), центром которой является центр Галактики. В этом случае компоненты скорости любого космического объекта равны $U = dR/dt$, $V = R d\theta/dt$, $W = dz/dt$.

Вопрос об измерении скорости движения Солнца неразрывно связан с выбором системы отсчета. Солнечная система находится в постоянном перемещении относительно ближних звезд, межзвездного газа, центра Млечного Пути и др. Делей [101] определил движения Солнца $V_{\odot}$ относительно локального стандарта покоя (LSR – *local standard of rest*), определяемого в системе отсчета круговой орбиты, которая проходит через нынешнее положение Солнца. Формально, для системы координат с центром – Солнце, вектор $\vec{u}$ указывает на направление галактического центра, вектор $\vec{v}$ – в направлении вращения, а вектор $\vec{w}$ – вверх от диска, и $V_{\odot} = \vec{u} + \vec{v} + \vec{w}$. Жан Делей [101] изучал движения звезд различных спектральных классов и светимостей и нашел для

компонентов скорости Солнца значения $\approx (9, 12, 7)$ км/с, что очень близко к современным определениям [101]. Заметим, что движение звезд данной популяции очень зависит от среднего возраста звезд, их температуры и металличности, а также шкалы высот. Поэтому необходимо учитывать асимметричный дрейф (сдвиг) звездных популяций относительно локального стандарта покоя (LSR). Чтобы движение Солнца не искажало скорость, ее обычно пересчитывают по отношению к локальному стандарту покоя – искусственной системе координат, в которой среднее движение окосолнечных звезд равно нулю. Скорость звезды по отношению к локальному стандарту покоя (LSR), V_{lsr} , называют ее «пекулярной» или остаточной скоростью.

Пекулярная скорость Солнца относительно центроида ярких звезд 5-6^m называется стандартным движением Солнца и составляет 19.5 км/с, и это движение направлено к так называемому апексу – точке, с галактическими координатами – долгота $l = 56^\circ$ и широта $b = +23^\circ$ [468]. Согласно последним определениям угловая скорость вращения Солнца относительно центра Галактики (Sgr A*) $\Omega_\odot = 30.24 \pm 0.12$ км/с на кпк, а круговая скорость вращения Солнца (относительно Sgr A*) $V_{\text{вр}} = 238 \pm 15$ км/с [46].

Расстояние от Солнца до центра Галактики, R_0 , является одним из основных параметров масштабирования для Галактики. Все расстояния, определяемые по угловым размерам или лучевым скоростям (V_r), и модели вращения пропорциональны R_0 . Также все размеры в Галактике, светимости и массы объектов, таких как молекулярные облака, масштабируются с R_0 , как и большинство оценок глобальной галактической светимости и массы.

Методы определения R_0 разделяются на прямые, основанные на моделировании, и вторичные. Прямыми методами сравнивают угловые размеры или скорости вблизи центра Галактики с масштабом физической длины или лучевой скоростью (V_r), при минимальных предположениях моделирования и без необходимости использования дополнительных калибровок. Методы базовой модели, определяющие R_0 , рассматривают расстояние в качестве одного из параметров модели, который соответствует максимально полному соответствию (подгонке) набору данных. Вторичные методы используют «стандартные реперы», расстояния которых основаны на вторичных калибровках, таких как отношения «период – светимость звезды» и др.

Обычно вторичные измерения R_0 проводятся на основе распределений расстояний звезд типа RR Лиры, цефеид, звезд типа Миры, красных гигантов клампа (КГК) и шаровых скоплений [319]. Основные систематические ошибки при использовании этих методов происходят от неопределенностей калибровок, от используемых поправок за поглощение и законов покраснения, а также от того, как распределение расстояния в исследуемом объеме связано с центром Галактики.

Оценки расстояния от Солнца до центра Галактики, приведенные в различных работах, заметно отличаются – от 7.10 ± 0.54 кпк [149], опираясь на звезды балджа; и до 8.92 ± 0.56 кпк [414], используя кинематику звезд центрального (0.5 пс) скопления в ядре Галактики (NSC *nuclear stellar cluster*). На основе анализа данных, собранных при помощи спутника ЕКА «Гайя» или «Гейя» (Gaia, изначально от *Global Astrometric Interferometer for Astrophysics*, затем – богиня Земли, Гейя), проведено измерение скорости вращения Солнца вокруг центра Галактики. Динамическое измерение скорости вращения Солнца вокруг центра Галактики: $V_{\text{вр}} = 239 \pm 9$ км/с. В сочетании с измеренным собственным движением объекта в центре Галактики, Sgr A*, это дает расстояние до галактического центра: $R_0 = 7.9 \pm 0.3$ кпк [172]. В 1985 году Международным Астрономическим Союзом (МАС) для унификации пользования была рекомендована величина расстояния, равная 8.5 кпк.

Определения скорости вращения $V_{\text{вр}}$ Млечного Пути вокруг центра в точке, где находится Солнце, также отличаются в разных работах. В [318] рассмотрены определения, выполненные двумя разными способами: 1) путем подгонки максимальной скорости излучения нейтрального водорода в зависимости от галактической долготы; 2) по радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами и обзоров BeSSeL (*Bar and Spiral Structure Legacy*, названного в честь Фридриха Вильгельма Бесселя, измерившего первый параллакс в 1838 г.), и VERA (*VLBI Exploration of Radio Astrometry*). Первый метод дает значение 220 км/с, второй – 240 км/с. По мнению авторов, второй метод дает более правильную оценку скорости вращения галактического диска на радиусе, равном расстоянию от центра Млечного Пути до Солнца. Это объясняется тем, что кривая вращения, описывающая зависимость орбитальной скорости звезд и газа как функцию от расстояния до центра Млечного Пути, больше соответствует данными радиоинтерферометрических наблюдений. В то же время, используя данные MWSC (*Milky Way Star Clusters catalogue*), для более 2000 скоплений разного возраста, определена скорость вращения Галактики $V_{\text{вр}} = 236 \pm 6$ км/с для принятого галактоцентрического расстояния Солнца $R_0 = 8.3 \pm 0.2$ кпк [48]. В пределах ошибок она совпадает с определениями, приведенными в [318]. Опираясь на тригонометрические параллаксы и собственные движения мазеров, определены $R_0 = 8.34 \pm 0.16$ кпк, круговая скорость вращения Солнца $V_{\text{вр}} = 240 \pm 8$ км/с и угловая скорость, равная $\Omega_{\odot} = 30.57 \pm 0.43$ км/с кпк⁻¹ [425].

Основные современные количественные оценки параметров Галактики даны в [46; 322; 463; 455] и частично представлены в таблице 1.1. Следует заметить, что значения параметров нашей Галактики постоянно уточняются и зависят от методов и источников их определения, соответственно не являются точными «окончательными» значениями.

Таблица 1.1

Основные параметры Галактики

Абсолютная звездная величина	$M_B = -20.^m70$, $M_V = -21.^m37$, $M_R = -21.^m90$
Показатели цвета	$B-V = 0.73$, $V-R = 0.54$
Диаметр дисковой составляющей	30 кпк
Масса и шкала высот тонкого диска на R_0	$4\pm 1\cdot 10^{10} M_\odot$, 300 ± 50 пк
Масса и шкала высот толстого диска и на R_0	$8\pm 3\cdot 10^9 M_\odot$, 2.0 ± 0.2 кпк, 900 ± 180 пк
К/а балдж: угол, отношение осей, вертикальная шкала высот, радиус	$27^\circ \pm 2^\circ$, 0.5 ± 0.05 , 180 пк, 1.5 ± 0.2 кпк
Звездная масса балджа M_b , отношение к полной массе	$(1.4-1.7)\cdot 10^{10} M_\odot$, 0.3 ± 0.06
Отношение массы балджа к массе классического балджа	$M_{\text{кл}}/M_b = 0-25\%$
Длинный бар: угол, половина длины	29.5° , $5.0^\circ \pm 1.5^\circ$
Шкала высот тонкого бара	180 пк
Радиус сферической составляющей (внутреннее гало)	10 кпк
Расстояние от центра Галактики до Солнца	8.2 ± 0.1 кпк (8.5 кпк, МАС 1985 г.)
Положение Солнца над плоскостью Галактики	25 ± 5 кпк
Количество звезд в Галактике	Не менее 10^{11}
Общая масса звезд различных типов	$6\cdot 10^{11} M_\odot$
Общая масса Галактики, включая галактики-спутники	$1.2\cdot 10^{12} M_\odot$
Скопление звезд в ядре (NSC): масса, радиус, отношение осей	$2\cdot 10^7 M_\odot$, 4.2 ± 0.4 пк, 0.71
Масса черной дыры (Sgr A*) в центре Галактики	$4.2\pm 0.2\cdot 10^6 M_\odot$
Радиус динамического влияния черной дыры	3.8 пс
Плотность звезд:	
в ядре Галактики	$12\cdot 10^6$ звезд на 1 пк^3
в окосолнечной области Галактики (на расстоянии 10 кпк от центра Галактики)	1 звезда на 8 пк^3
на расстоянии 15 кпк от центра Галактики	1 звезда на 1000 пк^3
Период обращения Солнца вокруг ядра Галактики	250 млн лет
Полная угловая скорость Солнца относительно Sgr A*	30.24 ± 0.12 км/с
Круговая скорость вращения на радиусе Солнца	$238\pm$ км/с
Скорость вращения Галактики:	
на расстоянии 1 кпк от центра	200 км/с
на расстоянии 2 кпк от центра	180 км/с
на расстоянии 10 кпк от центра	250 км/с
на расстоянии 30 кпк от центра	150 км/с

1.2. Обогащение Галактики химическими элементами и нуклеосинтез

Формирование Галактики и ее составляющих определяется взаимосвязанными процессами, динамической и химической эволюцией, отражающей обогащение межзвездной среды (МЗС) химическими элементами на протяжении ее жизни. Поэтому модели галактической химической эволюции (ГХЭ) базируются на тех или иных идеях, концепциях формирования Галактики, рассматривая двух- или многокомпонентную ее структуру [464]. Первоначально рассматривались два основных сценария образования Галактики: из коллапсирующего газового облака [111] и слияния отдельных фрагментов [343]; они же использовались для объяснения происхождения той или иной составляющей Галактики [297; 298; 268]. На связь между химическим составом звезд и кинематикой первыми обратили внимание Олин Эгген, Дональд Линден-Белл и Аллан Сэндидж [111].

Современная картина обогащения химическими элементами межзвездной среды (МЗС) исходит из представлений, что тяжелые элементы синтезируются в массивных звездах ($M > 5 \div 30 M_{\odot}$), коллапсирующих в ядре, которые, взрываясь в конце своей эволюции как сверхновые II типа (SN II, CCSN), выбрасывают эти элементы в межзвездное пространство. Помимо массивных звезд в обогащение МЗС вносят свой вклад и менее массивные сверхновые I типа (SN Ia) в результате термоядерного взрыва белого карлика в двойной системе.

К другим источникам и видам обогащения можно отнести, например, ветер от звезд различных масс, оболочки планетарных туманностей, образование элементов в реакциях скалывания ядер углерода C, азота N, кислорода O космическими лучами и пр. Т. о. МЗС обогащается химическими элементами, и они уже в готовом виде входят в звезды нового поколения. Звезды-карлики спектральных классов F, G, K, химический состав атмосфер которых не претерпевает заметных изменений на протяжении их жизни, сравнимом со временем жизни Галактики, являются лучшими свидетелями обогащения МЗС на эпоху их рождения. Содержание элементов в их атмосферах, соотнесенное к временной шкале, которую часто задают в виде металличности $[Fe/H]$, служит тестом для выбора или построения моделей галактической химической эволюции (ГХЭ). Звезды на продвинутых стадиях эволюции – субгиганты, гиганты и сверхгиганты, также часто используются для исследования химической и динамической эволюции галактик. Являясь звездами более высокой светимости, чем карлики, они позволяют отслеживать те или иные изменения химического состава или динамических характеристик на боль-

ших расстояниях в Галактике. Теории химической эволюции галактик, описывающие обогащение химическими элементами на протяжении их жизни, опираются на расчеты нуклеосинтеза и выхода элементов в результате эволюции звезд различных масс, которая определяется ходом ядерных реакций в недрах этих звезд и способами поставки продуктов в поверхностные слои звезды и в МЗС.

Согласно стандартной (однородная и изотропная Вселенная) теории Большого взрыва на четвертой минуте начинается нуклеосинтез (т.н. первичный) при температуре $0.9 \cdot 10^9$ К и нейтрон-протонном балансе 13% нейтронов и 87% протонов [435]. При этом образуется от 22 до 28% по массе гелия, остальная доля приходится на водород с незначительной добавкой лития, бериллия и бора. Ядра тяжелее гелия не образуются в заметном количестве, поскольку не существует стабильных ядер с пятью или восемью ядерными частицами. Происхождение всех остальных элементов связано с прохождением ядерных реакций преимущественно внутри звезд. Одной из первых в 1957 г. вышла фундаментальная работа Бербиджей, Фаулера и Хойла (ББФХ), в которой, опираясь на работы Ханса Бете [41], были описаны основные реакции и их скорости [371]. За последние десятилетия достигнут значительный прогресс в расчетах ядерных реакций, их сечений и скоростей, в моделировании состояний предсверхновых, взрывов сверхновых, эволюции и нуклеосинтеза на стадии асимптотической ветви гигантов (АВГ) и др.

Горение водорода. К основным реакциям горения водорода относятся протон-протонная цепочка (p-p цикл) и CNO цикл. Эти реакции характеризуют объединение четырех протонов в ядро гелия ($4^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He}$) с выделением энергии. Последующие реакции с участием протонов, например, захват протона изотопом неона и производство натрия ^{23}Na , анализировал еще Х.Бете [41], более подробно на этом остановимся ниже. Поскольку в результате горения водорода в CNO цикле изменяется содержание ряда элементов, различные реакции CNO цикла могут тестировать эволюционные проявления. Так, реакция $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$ играет важную роль в определении эволюции массивных звезд и возрастов ШС. Неопределенность в скорости этой реакции соответствует 1 млрд лет в возрасте ШС [6]. Реакция $^{17}\text{O}(p, \alpha)^{14}\text{N}$ тестирует процессы перемешивания [325]. Наблюдения $^{16}\text{O}/^{17}\text{O}$ в оболочках красных гигантов ($M > 5 M_{\odot}$) в комбинации с продукцией и разрушением ^{17}O внутри звезд определяет глубину конвективного перемешивания между поверхностью и внутренними частями таких звезд [100].

Горячий CNO цикл, который не рассматривался в ББФХ, проходит на высоких температурах, обеспечивающих прохождение реакции $^{13}\text{N}(p, \gamma)^{14}\text{O}$, проходящей быстрее, чем β -распад ^{13}N . При темпе-

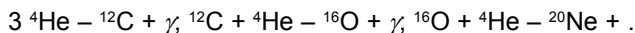
ратуре $T = 0.2 - 0.4 \cdot 10^9$ К, имеющей место при взрывах новых, эта реакция является доминирующим энергетическим процессом, ответственным за производство азота. Горячий CNO цикл дает соотношение $[^{15}\text{N}/^{14}\text{N}] = 1$, в то время как для обычного CNO цикла это соотношение равно $4 \cdot 10^{-5}$, а для солнечной системы – $4 \cdot 10^{-3}$. Т. о. можно предположить, что достаточно большая часть наблюдаемого ^{15}N произведена во взрывах новых [291].

Горение водорода вне CNO цикла может начинаться в NeNa цикле и продолжаться в MgAl цикле. Хотя ББФХ обнаружили, что реакция $^{23}\text{Na}(p, \alpha)^{20}\text{Ne}$ сильнее, чем $^{23}\text{Na}(p, \gamma)^{24}\text{Mg}$, и остановили горение водорода на Na, в дальнейшем были открыты наблюдательные подтверждения прохождения реакций NeNa цикла. Это аномалии изотопа ^{22}Ne в метеоритах [367], антикорреляции Na и Al с O в шаровых скоплениях [282; 284; 285], избытки Na у сверхгигантов и гигантов [87; 372; 113]. Однако были обнаружены аномалии ^{26}Mg в метеоритах [180], также ^{26}Al в МЗС нашей Галактики [160] и избыток ^{27}Al в шаровых скоплениях [284], что привлекло внимание к MgAl циклу. К настоящему времени все реакции NeNa цикла измерены непосредственно, и на низких температурах, при $T \sim 0.05 \cdot 10^9$ К, проходят следующие реакции: $^{20}\text{Ne}(p, \gamma)^{21}\text{Na}$, $^{21}\text{Ne}(p, \gamma)^{22}\text{Na}$, $^{22}\text{Na}(p, \gamma)^{23}\text{Mg}$, $^{22}\text{Ne}(p, \gamma)^{23}\text{Na}$, $^{23}\text{Na}(p, \gamma)^{24}\text{Mg}$ и $^{23}\text{Na}(p, \alpha)^{20}\text{Ne}$.

Основные реакции MgAl цикла: $^{24}\text{Mg}(p, \gamma)^{25}\text{Al}$, $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$, $^{26}\text{Mg}(p, \gamma)^{27}\text{Al}$, $^{26}\text{Al}(p, \gamma)^{27}\text{Si}$, $^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$ и $^{27}\text{Al}(p, \alpha)^{24}\text{Mg}$. Главный результат MgAl цикла на низких температурах – это производство ^{26}Al при расходе ^{25}Mg . Это также приводит к тому, что ^{26}Mg производится возможно из β -распада ^{26}Al , и в результате реакции синтезируется ^{27}Al (на высоких температурах, $T > 0.2 \cdot 10^9$ К). Вследствие чего только 0.2% (по массе) начального NeNa материала выживает, в основном как ^{20}Ne и около 0.04 % MgAl остается как ^{27}Al .

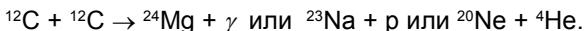
Горение гелия. В результате горения гелия, объединения 3 α -частиц ($3^4\text{He} \rightarrow ^{12}\text{C}$) и $^4\text{He} + ^{12}\text{C}$ образуются нуклиды от ^{16}O до ^{20}Ne , ^{24}Mg и вплоть до ^{40}Ca , однако уже реакция $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)$ идет очень медленно и становится очевидным, что горение углерода и кислорода ответственно за производство элементов от Ne до S. Выход углерода и кислорода в конце фазы горения гелия дает начальные условия для дальнейших ядерных превращений. Все эти процессы в очень большой степени зависят от скорости реакции $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$.

Основные реакции горения гелия и реакции захвата α -частиц:

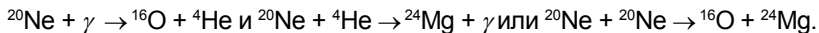


Реакции проходят: 1) в центре звезды, горение гелия в ядре – на ветви гигантов и горизонтальной ветви (гиганты клампа); 2) в верхних слоях, в слоевом источнике – на асимптотической ветви гигантов.

Горение C, Ne, O, Si. Горение углерода, неона и кислорода происходит в реакциях:

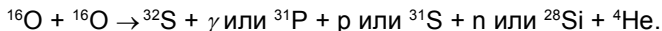


В конце стадии горения углерода загорается неон:



Горение неона проходит при $T \sim 1.3 \cdot 10^9$ К. Результатом горения неона есть, как и в случае горения углерода, кислород и магний.

Горение кислорода осуществляется следующим образом:



Образующиеся протоны и нейтроны участвуют в различных реакциях с ядрами, порождая элементы в интервале атомных весов $16 < A < 28$. Горение кислорода проходит при $T \sim 2.0 \cdot 10^9$ К; сновной продукт горения – кремний ^{28}Si . Кремний горит при более высоких температурах $T \sim 3\text{--}3.5 \cdot 10^9$ К. Ядра тяжелее ^{16}O образуются успешно в ядерном горении C, Ne, O, Si в ядрах массивных звезд. В процессе горения кремния (при $T > 2 \cdot 10^9$ К) появляется много квантов с энергией, достаточной для отщепления α -частиц от ядер ^{28}Si , ^{32}S , ^{24}Mg и т.д., которые могут затем присоединиться к более тяжелым ядрам, образуя элементы вплоть до железа, никеля и цинка.

Реакции проходят в квазистатических условиях и во взрывном нуклеосинтезе [371; 411; 448].

Равновесный процесс (NSE, *nuclear statistical equilibrium*). На очень высоких температурах $T \sim 4\text{--}5 \cdot 10^9$ К проходит настолько много реакций, что устанавливается статистическое равновесие для ядер плотно связанных нуклидов вокруг железа, называемое равновесным или e-процессом. Это состояние определяется термодинамическими параметрами и способствует образованию элементов с атомными номерами от 22 до 30 (элементы железного пика). Оно имеет место в ядрах массивных звезд на поздних стадиях эволюции, когда в них образуется железное ядро (сверхновые I и II типов, или SN Ia и SN II).

Процессы нейтронного и протонного захватов.

s-процесс (s от *slow*). Медленный захват нейтронов по сравнению с β -распадом. Основные реакции производства нейтронного потока: $^{13}\text{C}(\alpha, \text{n})^{16}\text{O}$ и $^{22}\text{Ne}(\alpha, \text{n})^{25}\text{Mg}$.

Вплоть до ^{209}Bi образование ядер может идти по примеру образования кобальта из железа: $^{58}\text{Fe} + \text{n} \rightarrow ^{59}\text{Fe} \rightarrow ^{59}\text{Co} + \text{e} + \nu$.

В этом процессе время захвата следующего нейтрона больше, чем время β -распада, поэтому процесс называют медленным.

Условия реализуются на поздних стадиях эволюции, на асимптотической ветви гигантов и во взрывном нуклеосинтезе [60; 424].

r-процесс (r от *rapid*). Быстрый захват нейтронов по сравнению с β -распадом. Но захват нейтрона висмутом приводит уже не к β -распаду, а к α -распаду. α -частица уменьшает атомный номер ядра на две единицы, поэтому дальнейшее увеличение атомного номера в s-процессе невозможно. Образование ядер тяжелее Bi связывают с быстрым захватом нейтронов, когда интенсивность нейтронного потока настолько велика, что время захвата нейтрона меньше времени распада неустойчивого ядра. Условия реализуются во взрывном нуклеосинтезе в массивных звездах и в результате слияния нейтронных звезд [371; 443].

p-процесс. Относительно редкие протон-обогащенные нуклиды как ^{92}Mo не могут образовываться в процессах нейтронного захвата. Они способны производиться в реакциях протонного захвата при очень высоких температурах, преодолевая кулоновский барьер, или в реакциях (γ , n) в сверхновых.

x-процесс (или первичный нуклеосинтез). Производство D, ^3He , ^4He , ^7Li [435; 437]. Открытый вопрос, в каких объектах может содержаться первичный, непереработанный литий – межзвездный газ, атмосферы молодых звезд, первичный материал солнечной системы или первая генерация звезд? Исследования микроволнового излучения, выполненные космическими миссиями WMAP и «Планк», дают значения содержания лития $\text{lg } A(\text{Li})$, равные 2.65 [366] и 2.66 [42] в шкале содержания водорода $\text{lg } A(\text{H}) = 12.0$, что значительно ниже, чем предсказанные Теорией Большого взрыва (около 3.3).

ν -процесс – процесс возбуждения атомов посредством больших потоков нейтрино, возникающих при коллапсе массивных звезд с последующим снятием возбуждения через испускание частицы (протон, нейтрон или α -частица). Процесс испускания частиц является преимущественным по отношению к снятию возбуждения излучением. Он рассмотрен Вусли и др. [396] при моделировании SN II, м.б. эффективен для производства Li.

реакции скалывания – образование легких элементов (^2D , ^3He , ^6Li , ^7Li , ^7Be , ^9Be , ^{10}B и ^{11}B), возможно, на поверхности звезд и в МЗС при столкновении электромагнитно ускоренных протонов с ядрами средних масс (^{12}C , ^{14}N , ^{16}O , ^{20}Ne) [371].

Основные характеристики прохождения некоторых реакций собраны в таблице 1.2.

В целом галактическая химическая эволюция (ГХЭ) включает в себя ядерную физику, звездную эволюцию, эволюцию галактик, наблюдения и космологию. Постоянная прямая и обратная связь между этими областями является ключевым фактором для улучшения

Таблица 1.2

Условия прохождения реакций и продукты горения

Тип горения	Обычная эволюция	Взрывной нуклеосинтез
Водород	$T \sim 10^7 \text{ K}$, 100 г см^{-3} ^4He , ^{14}N	$T \sim 10^8 \text{ K}$, $>100 \text{ г см}^{-3}$ ^{13}C , ^{15}N , ^{17}O , ^{22}Ne
Гелий	$T \sim 10^8 \text{ K}$, 10^4 ^{12}C , ^{16}O , ^{18}O ; ^{20}Ne , ^{22}Ne s-процесс	$T \sim 6 \cdot 10^8 \text{ K}$, $>10^4$ ^{15}N , ^{18}N , ^{19}F , ^{26}Al
Углерод	$T \sim 6 \cdot 10^8 \text{ K}$, 10^5 ^{20}Ne , ^{23}Ne , ^{24}Mg	$T \sim 2 \cdot 10^9 \text{ K}$, 10^5 изотопы Ne, Na, Mg, Al
Кислород	$T \sim 10^9 \text{ K}$, 10^6 ^{28}Si , ^{31}P , ^{32}S , ^{56}Fe , ^{58}Fe	$T \sim 5 \cdot 10^9 \text{ K}$, 10^6 изотопы Si, S, Cl, Ar
Кремний	$T \sim 3 \cdot 10^9 \text{ K}$, 10^7 изотопы Si, S, Cl, Ar, K	$T \sim 5 \cdot 10^9 \text{ K}$, 10^7 Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni

нашего понимания того, как формируются галактики и какие химические элементы создаются и перерабатываются в звездах, галактиках и межгалактическом пространстве.

2. МОРФОЛОГИЯ ГАЛАКТИКИ

2.1. Галактический диск

Яркая клочковато-диффузная полоса на небе, называемая Млечный Путь, и является диском нашей Галактики. **Что же представляет собой галактический диск?** Это относительно тонкий слой, в котором сконцентрирована большая часть объектов Галактики: звезды, рассеянные скопления, газопылевые облака. Разделяют звездный и газопылевой диски. Важным вопросом является наличие темной материи (скрытой массы) в диске и ее процентное соотношение. Дело в том, что на некотором расстоянии от центра в диске скорости вращения звезд оказываются аномально высокими для плотности, оцениваемой из зависимости «масса – светимость». Объяснить высокую скорость звезд на краю диска можно, предположив, что на больших расстояниях от центра Галактики основную роль играет масса, проявляющая себя исключительно через гравитационное взаимодействие, т.н. темная материя. Независимым образом можно прийти к выводу о наличии скрытой массы, если оценивать общую массу исходя из условия динамической устойчивости звездного диска. По современным оценкам в окрестностях Солнца скрытая масса занимает $6 \div 10\%$, но в пределах оптического диска Млечного Пути может достигать 30% от суммарной массы (звезды + газ) [322].

Так, на основе ряда моделей нашей Галактики [43; 89], в которых темная материя, а также звезды диска представлены функциями распределения, являющимися аналитическими функциями интегралов движения, показано, что для реального описания Галактики необходимо учитывать гало темной материи. В нем плотность фазового пространства примерно постоянна, и это гало имеет радиус ядра ~ 2 кпк. В моделях применяется самосогласованный потенциал, обусловленный темной материей, звездами и газом, согласующийся с наблюдательными ограничениями (кривой круговой скорости, вертикальным профилем плотности звездного диска вблизи Солнца, кинематикой почти $2 \cdot 10^6$ звезд-гигантов в пределах 2 кпк от Солнца, включая оценки поглощения и микролинзирования звезд балджа).

2.1.1. Звездные диски

Джери Гилмор и Нил Рейд [145], исследуя плотность звезд в направлении Южного галактического полюса, обнаружили, что ее распределение описывается двумя экспонентами, различающимися по высоте и плотности, ввели понятие “толстый диск” (рис. 1 на цветной вкладке). Обратим внимание, что за несколько лет до этого Владимир Марса-

ков и Анатолий Сучков первыми выделили подсистему Галактики, названную ими промежуточным гало, которая соответствует нынешнему представлению о толстом диске [464; 465; 466; 467]. Позже было показано, что звезды толстого и тонкого дисков отличаются кинематикой, возрастом, содержанием α -элементов, т. е. элементов, образованных в процессах захвата α -частицы, ядра гелия [143]. Толщина звездных дисков зависит от дисперсии скоростей звезд, которая не может быть ниже некоторого уровня, определяемого устойчивостью к изгибным и радиальным возмущениям. Самым молодым галактическим образованием является тонкий диск, оценка его возраста по функции светимости белых карликов дает величину 10 млрд лет с точностью 15%. Данные по нейтральному водороду HI говорят о существовании искривления диска, которое накладывает ограничение на время его жизни (временную шкалу), при этом звезды не следуют поведению газа. Искривление может быть обусловлено взаимодействием между диском и близкими галактиками, например, Магеллановых Облаков, или притоком межгалактического газа [209]. Оценки возраста толстого диска, как и определения его основных характеристик, более разноречивы, чем в случае тонкого диска. Так, приведенные оценки возраста толстого диска на основе исследований химического состава дают значения от 8 млрд до 13 млрд лет, а кинематические определения дают величину 9 млрд лет.

В настоящее время для выделения звезд тонкого и толстого дисков используют ряд особенностей дисков. Например, то, что эти два диска отличаются пространственным распределением и локальной плотностью звезд, а также пространственными скоростями, металличностью и возрастом (см. рис. 1 на цветной вкладке). Рассмотрим отбор звезд, выполненный Каролин Субиран [359; 274]. Для вычисления трех компонентов (U , V , W) пространственной скорости относительно Солнца были использованы данные по параллаксам π и собственным движениям μ , измеренные спутником «Гиппархос» (*Hipparcos – High Precision Parallax Collecting Satellite*, название созвучно с именем древнегреческого астронома Гиппарха, составителя первого в Европе звездного каталога) [432], а также лучевые скорости V_r , измеренные в спектрах звезд методом кросс-корреляции (с точностью лучше, чем 100 м/с). При этом общая ошибка измерения скоростей, включающая ошибки измерения параллаксов, собственных движений и лучевых скоростей, равна порядка 1 км/с. Далее уравнения движения были интегрированы с использованием модели распределения массы в Галактике [15] на возраст 12 млрд лет для звезд с дефицитом металлов и на возраст 8 млрд лет для звезд диска, опираясь на принятые компоненты скорости Солнца относительно местного (локального) стандарта покоя (локального цен-

троида) LSR с компонентами скорости – (9, 5, 6) км/с, галактоцентрическое расстояние Солнца ($R_{\odot} = 8.5$ кпк) и круговую скорость $V_{\text{lsr}} = 220$ км/с. Полученные параметры были использованы для определения принадлежности звезд к различным населением Галактики (гало и диск, тонкий и толстый диски) по кинематическим критериям.

Критерии отбора – гало и диск. К звездам диска (D) были отнесены объекты, имеющие кинематику, характерную для диска, – круговые (или почти круговые) орбиты, небольшие расстояния от галактической плоскости и большое значение вращательной скорости. Эта группа является доминирующей для толстого диска. В нее включены звезды с Z_{max} (максимальное расстояние от плоскости Галактики) < 4.0 кпк, e (эксцентриситет) < 0.45 и скоростью вращения звезды в Галактике $V_{\text{вр}} > 160$ км/с. К звездам гало (H) были отнесены все звезды, находящиеся на значительных расстояниях от галактической плоскости и имеющие большие значения эксцентриситетов и ретроградные вращательные скорости ($Z_{\text{max}} > 6$ кпк, $e > 0.75$ со скоростью вращения $V_{\text{вр}} < 0$ км/с). Звезды, которые не удовлетворяли этим критериям, были отнесены к промежуточной группе (I), соответствующей переходу между толстым диском и гало.

Критерии отбора – тонкий и толстый диски. Чтобы вычислить вероятность принадлежности каждой звезды тонкому или толстому диску, основываясь на ее пространственной скорости, необходимо знать их кинематические параметры и долю звезд каждого диска в конкретной выборке. Например, выбирая диапазон металличности $-1 < [\text{Fe}/\text{H}] < +0.3$, полагаем, что данная выборка имеет большую долю звезд толстого диска, чем реальная доля в солнечной окрестности (2% – 15%). Чтобы оценить доли звезд тонкого и толстого дисков в рассмотренной выборке, применялся алгоритм мультивариатного разделения свертки гауссиан-распределения U , V , W скоростей. Этот алгоритм, SEM [69], находит максимум уравнения вероятности методом итераций, со стохастическим шагом без предварительной информации относительно смеси гауссовых распределений. Рассматриваемая выборка совместима с суммой двух гауссиан, соответствующих двум распределениям звезд с параметрами, близкими к тем, что были приняты ранее для звезд тонкого и толстого дисков, но с относительным удельным весом 75% и 25%, соответственно. Таким образом, вероятность принадлежности к тонкому (P_{r1}) и толстому (P_{r2}) дискам каждой звезды с измеренной скоростью (U , V , W) равна:

$$P_1 = p_1 \frac{F_1}{F_2}, \quad P_2 = p_2 \frac{F_2}{F}, \quad (2.1)$$

$$F_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi}^3 \sigma_{U_i} \sigma_{V_i} \sigma_{W_i}} \cdot \exp \left(-0.5 \left[\frac{U}{\sigma_{U_i}^2} + \frac{V - V_i}{\sigma_{V_i}^2} + \frac{W}{\sigma_{W_i}^2} \right] \right), \quad (2.2)$$

$$F = p_1 F_1 + p_2 F_2 \quad (2.3)$$

где: $p_1 = 0.75$, $p_2 = 0.25$ – относительная плотность двух населений (субструктур) в данной выборке; V_i , σ_U , σ_V , σ_W , $i = 1, 2$ – кинематические параметры.

Из этих двух распределений выбраны две субструктуры, представляющие населения тонкого и толстого дисков, чтобы выделить их основные свойства. Рассмотрение звезд с вероятностью принадлежности $Pr_i > 80\%$ гарантирует минимальное «загрязнение» каждой субструктуры звездами другого населения.

До настоящего времени имеется противоречие между сторонниками плоского и плотного толстого диска, с типичной высотой порядка 800 пс и локальной относительной плотностью от $6 \div 7\%$ [323] до 15% [359], и сторонниками наличия толстого диска, с большим масштабом высот, около 1300 пс, и более низкой локальной относительной плотностью, порядка 2% [319]. Дисперсии же компонентов пространственных скоростей (σ_U , σ_V , σ_W) в целом установлены – от 30 до 50 км/с, с асимметричным сдвигом V_{lag} между -20 и -80 км/с. Так, в работе Субиран и др. [359] собственные движения, расстояния и лучевые скорости большой выборки (400) гигантов были объединены с помощью уравнений [184] для вычисления трех компонентов пространственной скорости (U , V , W) по отношению к Солнцу (в точках оси U в направлении Галактического центра). Используя теоретическую Безансонскую модель, описывающую распределение звездного населения нашей Галактики [324] были получены основные параметры тонкого и толстого дисков в солнечной окрестности (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Кинематические параметры толстого и тонкого дисков

	Тонкий диск	Толстый диск
V_{lag} (км/с)	-15	-51
σ_U (км/с)	39	63
σ_V (км/с)	20	39
σ_W (км/с)	20	39

В контексте формирования толстого диска путем слияния эти результаты поддерживают идею раннего нагрева тонкого диска, в то время как другие авторы могут говорить о наблюдениях «следов» остатков разрушенного спутника и пр.

Полученные параметры тонкого диска согласуются с предыдущими исследованиями (в частности дисперсия скоростей тонкого диска почти в два раза ниже, чем для толстого), но вертикальный градиент параметров тонкого диска не найден. Полученные параметры толстого диска по сравнению с предыдущими исследованиями заметно «горячее» для скорости U , но «холоднее» для более металлической части распределения рассматриваемых звезд в V , W и $[\text{Fe}/\text{H}]$. Доля звезд толстого диска оказалась выше, чем ожидалось, с локальной оценкой $15 \pm 7\%$.

Иной кинематический критерий отбора звезд предложен в работе Марсакова и Борковой [222]. Они показали, что наиболее простым и надежным критерием разделения звезд толстого диска и гало является полная остаточная скорость звезды относительно локального центроида, равная $V_{\text{lsr}} = 175$ км/с. Владимиром Марсаковым предложено выделение и звезд «аккрецированного» гало по полной остаточной скорости, равной $V_{\text{lsr}} > 240$ км/с [52].

Что касается диапазона металличностей для звезд тонкого и толстого дисков, он не определен окончательно и его значения обсуждаются до настоящего времени. Авторы, исследующие распределения металличности, зачастую были заинтересованы только описанием химической эволюции Галактики и вообще не пытались разделять тонкий и толстый диски, а скорее рассматривали толстый диск как часть диска. Это утверждение имело место, например, в ставшей классической работе Эдвардссона и др. [379].

Миша Хайвуд [157] рассмотрел распределения металличности в солнечной окрестности и обнаружил, что максимум металличности соответствует $[\text{Fe}/\text{H}] = 0$ и только 4% близлежащих звезд имеют $[\text{Fe}/\text{H}] < -0.50$. Исследование соотношения возраст/металличность (AMR – *age metallicity relation*) звезд в солнечной окрестности по данным спутника «Гиппархос» [174] показало значительный разброс AMR для тонкого диска, следуя однозонной модели ГХЭ, который является существенной особенностью в формировании и эволюции Галактики. AMR для звезд толстого диска показывает, что формирование звезд в нем прекратилось 8 млрд лет назад. Найдено также, что звезды толстого диска показывают вертикальный градиент содержаний и избытки кальция по отношению к тонкому диску той самой металличности. Эти три факта, по мнению авторов, поддерживают монолитный коллапс и/или слипание спутниковых карликовых галактик как вероятные сценарии формирования толстого диска.

Изучение AMR гигантов клампа диска (891 звезда) [433] показало распределение металличности, отличающееся от звезд-карликов, с меньшим количеством богатых металлами звезд. Найдены доказательства вертикального градиента металличности $-0.31 \text{ dex кпк}^{-1}$ и «переход» в металличностях и скоростях на возрастах $\sim 4\text{--}5$ млрд лет. Зависимость AMR для гигантов клампа имеет очень низкую дисперсию, плавно возрастает от 10 до 4 млрд лет, с ростом для более молодых звезд.

На основе тригонометрических расстояний, фотометрических металличностей, определения возраста и спектроскопических содержаний железа Fe и магния Mg изучены зависимости «возраст–металличность» и «возраст–относительное содержание магния $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ » для звезд тонкого диска [375]. Показано, что в течение первых нескольких миллиардов лет формирования тонкого диска межзвездная среда в диске в среднем достаточно богата тяжелыми элементами ($\langle [\text{Fe}/\text{H}] \rangle = -0.2$) и слабо перемешана. Однако дисперсия металличности непрерывно уменьшается с возрастом, от $y [\text{Fe}/\text{H}] = 0.22$ до 0.13 . Среднее относительное содержание Mg несколько выше, чем солнечное значение ($\langle [\text{Mg}/\text{Fe}] \rangle = 0.1$). Примерно 4-5 млрд лет назад средние значения $[\text{Fe}/\text{H}]$ начали систематически увеличиваться, достигнув практически солнечной величины, при сохранении той же дисперсии; а среднее относительное содержание Mg начало уменьшаться сразу же после этого. В то же время число звезд в этой подсистеме резко возросло. Результаты этого исследования не только показывают среднюю металличность диска (отличающуюся, заметим, от найденной в [157] на -0.1), но и позволяют предположить, что скорость звездообразования была низкой на начальной стадии формирования тонкого диска, но резко увеличилась примерно 4-5 млрд лет назад.

Определения металличности толстого диска дают средние значения от -0.36 до -0.70 [324; 453], а промежуточное между ними значение -0.48 , полученное в работах [240; 359], включает также звезды с более низкой металличностью – до $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.6$ и дископодобной кинематикой. Чибя и Бирс [78] полагают, что 30% звезд с $-1.6 < [\text{Fe}/\text{H}] < -1.0$ принадлежит населению толстого диска. В то же время Бенсби и др. [38] находят звезды с металличностью, превышающей солнечную, но имеющие кинематику толстого диска. Остается неясным, являются ли эти звезды частью толстого диска, их бедных металлами или металлически-богатых «хвостов» или они не принадлежат диску вообще. Кроме того, из-за большого перекрытия распределения металличностей тонкого и толстого дисков очень трудно установить место (точку) пересечения значений $[\text{Fe}/\text{H}]$, соответствующих переходу между ними.

Можно ли использовать химический состав в качестве признака принадлежности звезд к тому или иному диску или как критерия выбо-

ра модели образования дисков? В первых работах по исследованию кислорода и магния в звездах дисков было показано, что содержания этих элементов в звездах толстого диска близки по значениям к их содержанию в звездах гало и, более того, эта величина постоянна [134; 13]. Но одновременно с этим другими исследователями было обнаружено, что поведение содержания этих элементов в звездах обоих дисков подобно [73]. В ряде последующих работ было найдено повышенное содержание α -элементов в звездах толстого диска по отношению к тонкому [38; 13; 317; 274]. Однако вопрос наличия резкого скачка или плавного уменьшения их содержания с увеличением металличности $[\text{Fe}/\text{H}]$ оставался предметом обсуждения [225; 226]. На рис. 2.1 приведены определения содержания α -элемента магния от металличности $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ vs. $[\text{Fe}/\text{H}]$, полученные в работе Редди и др. [317]. Помимо результатов, полученных авторами (черные точки) для всех звезд диска без разделения на толстый и тонкий, содержатся определения других авторов (подробнее см. Редди и др.: [317]). Как видно из этого рисунка, наблюдается различие в обогащении магнием звезд тонкого и толстого дисков, на что указывают работы многих авторов [38; 274; 134]. Затем Томас Бенсби и коллеги [26] нашли, что: 1) для тонкого и толстого дисков наблюдаются «гладкие» и четкие тренды содержаний различных элементов, при этом они явно разделены; 2) тренды содержаний α -элементов для толстого диска показывают типичные свидетельства обогащения SN Ia; 3) толстый диск, представленный данной звездной выборкой, в среднем старше, чем тонкий диск этой же звездной выборки. В работе [422] показано, что толстый галактический диск достигает, по крайней мере, солнечных металличностей и он подвергся заметному обогащению в течение периода ~ 3 млрд лет, которое закончилось около 8-9 млрд лет тому назад. Фельцинг и др. [123] нашли, что толстый диск простирается до солнечной металличности с трендом содержания α -элементов, четко отличающимся от тренда для малометаллических звезд толстого диска, в отличие от перекрывающейся металличности толстого и тонкого дисков. Эти результаты ставят дополнительные ограничения на границы раздела между тонкими и толстыми дисками и процессов их формирования, и могут служить дополнительным критерием их разделения.

Пол Ниссен и Уильям Шустер [253; 254] обнаружили, что звезды с большим содержанием α -элементов могут быть старыми звездами диска или балджа с «подогреваемой» кинематикой вследствие слияния со спутником Галактики, или это звезды, образовавшиеся как первые звезды во время коллапса протогалактического облака газа. Кинематика таких звезд с низким содержанием α -элементов позволяет предположить, что они были образованы от слияния с карликовыми галактиками,

и что некоторые из них могут происходить из предшественников галактики ω Центавра. В настоящее время известно, что ω Центавра – самое крупное шаровое скопление в нашей Галактике, которое населяют несколько поколений звезд. Возможно, в прошлом оно было карликовой галактикой, поглощенной Млечным Путем много миллиардов лет тому назад [224]. Тренды полученных содержаний $[\text{Cu}/\text{Fe}]$, $[\text{Zn}/\text{Fe}]$ и $[\text{Ba}/\text{Y}]$ можно объяснить, основываясь на имеющихся расчетах нуклеосинтеза в случае, если звезды с высоким содержанием α -элементов образовались в регионах с такой высокой скоростью звездообразования, что обогащение химическими элементами было обеспечено только массивными сверхновыми II типа. Звезды с низким содержанием α -элементов, скорее всего, происходят из систем с более медленной химической эволюцией, характеризующейся дополнительным обогащением от сверхновых типа Ia и звезд АВГ малой массы.

В недавней работе Бенсби и коллег [39] исследовано содержание элементов в звездах в галактическом диске и проведено сопоставление с их возрастами. Звезды (714 звезд) были отобраны по кинемати-

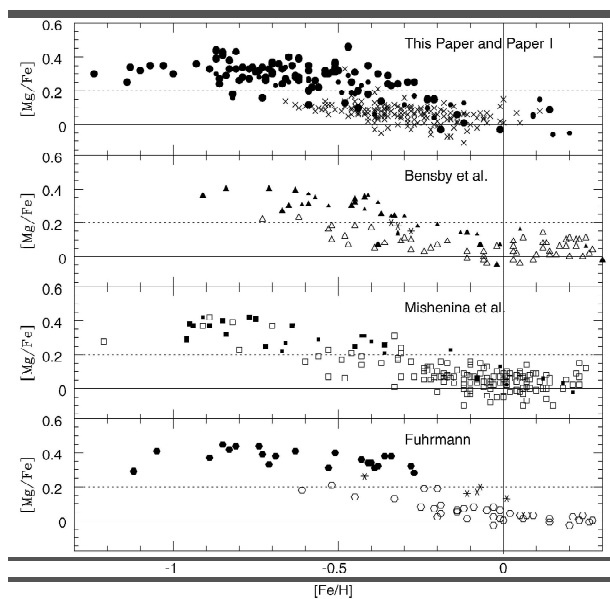


Рис. 2.1. Зависимость содержания магния от металличности для звезд галактического поля [317] ([317] – верхняя панель, затем данные из [38], [274], [134]); толстый диск – черные символы для всех работ, тонкий диск – полые символы, для данных [317] – кресты

ческим критериям, чтобы проследить полностью галактические тонкий и толстый диски, богатые металлами звезды гало, субструктуры в пространстве скоростей, такие как поток Геркулеса (*Hercules*) и движущаяся группа Арктур (*Arcturus*), а также звезды, которые не могут (кинематически) ассоциироваться со звездами тонкого или толстого дисков. Определение параметров звезд и содержаний элементов основано на спектрах с высокой разрешающей способностью (40 000 – 110 000) и высоким отношением сигнал – шум ($S/N = 150 - 300$). Полученные результаты показали, что наблюдаются две подструктуры диска, одна – старая обогащенная α -элементами, и другая – более молодая и менее обогащенная α -элементами. Они в значительной степени перекрываются при металличностях между $-0.7 < [Fe/H] < +0.1$ и показывают бимодальное распределение в $[\alpha/Fe]$. Кроме того, α -обогащенное население имеет орбитальные параметры, соответствующие положению мест рождения звезд во внутренней части галактического диска, в то время как звезды с низкими содержаниями α -элементов в основном приходят из внешнего галактического диска, в полном соответствии с короткой временной шкалой обогащения α -элементами толстого диска. Исследования химического состава и возрастов звезд потока Геркулеса и движущейся группы Арктур показали, что они не могут представлять собой ни разрушенные рассеянные скопления, ни внегалактические аккреционные остатки от старых событий мерджинга. Скорее всего, они имеют динамическую природу, обусловленную внутренними процессами в Галактике. В частности, в работе [223] на основе изучения нескольких звездных потоков, включая поток Геркулеса, подтверждается предположение, что все исследованные потоки могли образоваться в результате резонансных эффектов, вызванных галактическим баром или спиральными волнами плотности, действующими на звезды поля. Однако поток Арктур все же может быть остатком довольно большой распавшейся галактики с массой около $> 10^7 M_{\odot}$, которая значительно проэволюционировала, прежде чем разрушиться.

Т. о. подтверждается связь кинематики и химического состава звезд, однако она не столь проста, поскольку наблюдаются звезды с околосолнечными значениями $[Fe/H]$ и содержаний элементов, с кинематикой толстого диска и наоборот. Сложно говорить об однозначном критерии «содержания элементов» в качестве принадлежности звезды к той или иной популяции еще и из-за перекрывающейся металличности дисков, и точности определения химического состава.

Вообще необходимого и достаточного критерия для классификации принадлежности каждой звезды к тонкому и толстому дискам или гало Галактики не существует. Мы знаем (в той или иной мере надежно) только значения и отклонения ключевых параметров этих звезд-

ных подсистем, таких как возраст, пространственные скорости, положения, элементы галактических орбит, металличности и относительные содержания некоторых химических элементов. Любое из этих свойств может быть использовано для классификации каждой звезды как наиболее вероятного члена данного звездного населения. Используя единообразную классификацию принадлежности звезды к той или иной подструктуре, мы можем изучать свойства популяции в целом.

Подчеркнем, что важным в рассмотрении и интерпретации результатов является анализ ошибок определения характеристик элементов, а также точности определения характеристик толстого и тонкого дисков, возрастов звезд, критериев принадлежности звезд к той или иной структуре и др.

Интерпретация поведения содержания элементов с металличностью, характеристики дисков и пр. связаны как с различными гипотезами обогащения элементами дисков, так и с происхождением дисков. Их можно разделить на два типа: 1) эволюционные и 2) взаимодействия или слияния, мерджинга. Оба подхода сталкиваются с трудностями.

Эволюционные модели предсказывают плавный переход к толстому диску и прогнозируют непрерывность возраста, металличности $[Fe/H]$, содержания элементов $[El/Fe]$ и кинематических связей. Однако в рамках этих гипотез «нагревание» в течение длительного периода времени звезд тонкого диска спиральными рукавами или центральным баром, или гигантскими молекулярными облаками, или аккрецией и расширением диска Галактики не в состоянии объяснить наблюдаемое различие в масштабе высот дисков. С другой стороны, толстый диск может сформироваться во время мерджинга путем нагрева уже существующего холодного тонкого диска. Также есть свидетельства возможности прямой аккреции звезд из галактик-спутников. С точки зрения кинематики диск содержит и более разогретые звезды, которые, имея химический состав, соответствующий толстому диску, попадают в тонкий и наоборот. К тому же тонкий диск содержит отдельно движущиеся группы и скопления звезд. Как мы уже упоминали, к таким звездным объединениям относится, например, поток Геркулеса. Различные исследования его химического состава и кинематики показывают, с одной стороны, что содержания элементов в звездах потока Геркулеса ближе к содержанию в звездах тонкого диска, а с другой – что это смесь звезд толстого и тонкого дисков [290].

Происхождение толстых дисков звезд остается одной из главных тем дискуссий по галактической структуре [281]. Перечислим семь самых популярных сценариев:

1. Брук и др. [383] свидетельствуют о том, что толстые диски формируются во время интенсивной газовой фазы слияния на высо-

ких красных смещениях; этот сценарий подтверждается другими наблюдениями, полученными Гилмором и др. [144; 135];

2. Абади и др. [350] постулируют, что толстый диск формируется из прямой аккреции остатков только что разрушенных сверхмассивных спутников; при этом спутник должен быть такой массы, чтобы позволить правильно описать металличности звезд;

3. Куинн и Бинни [311], Виллалобос и Хелми [434], Ку и др. [71], Робин и др. [404] рассмотрели сценарий, в котором толстый диск возник из кинематического нагрева ранее существующего тонкого диска вследствие слияния спутниковых галактик;

4. Шенрик и Бинни [340], а также в [313; 382; 387] предположили, что толстый диск мог бы образоваться вследствие радиальной миграции звезд диска из внутренних во внешние области;

5. Круппа [194] и Ассман и др. [303] предположили, что толстый диск возник из-за «выброса» звезд из скоплений;

6. Бурно и др. [53] представили сценарий, в котором массивные скопления разбрасывают звезды с высокой дисперсией скоростей и образуют толстые диски;

7. В соответствии с Хейвудом и др. [374] толстый диск формируется за счет рождения звезд в газовом слое, создавая толстый диск турбуленцией.

Самые последние исследования кинематики химически разделенных тонкого и толстого дисков в расширенной окрестности Солнца выполнены в работе Войно и др. [76], где используются расстояния и металличности звезд из базы данных RAVE (*Radial Velocity Experiment*). Для исследования зависимости между скоростями и металличностью выделена выборка ~ 20 000 звезд с низким содержанием α -элементов (тонкий диск) и высоким содержанием α -элементов (толстый диск) с помощью вероятностного метода, а также исследованы кинематические параметры в зависимости от металличности. Для тонкого диска обнаружена отрицательная динамика средней скорости вращения ($V_{\text{вр}}$) в зависимости от содержания железа [Fe/H], а также положительный градиент скорости вращения для толстого диска и различия между дисками для дисперсии всех трех компонентов скорости (U , V , W) в окрестности Солнца.

В моделях галактик, где старые звезды находятся в центре, тонкие диски расширены вдоль радиуса. Молодые звездные населения «вспыхивают» во внешних регионах моделируемых дисков, в результате этого такие звезды находятся высоко над средней плоскостью. Таким образом, в результате в тонких дисках обнаруживается радиальный градиент возрастов – от старых в их центральных районах, к молодым на окраинах. По оценкам возраста для большой выборки звезд гигантов из

обзора APOGEE (*Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment*), этот сценарий опробован для Млечного Пути. Найдено, что тонкий диск в Млечном Пути действительно имеет сильный (заметный) радиальный градиент возрастов: средний возраст для красных гигантов клампа от ~ 9 млрд во внутреннем диске до 5 млрд во внешнем диске. Т. о., тонкие диски характеризуются неравномерным содержанием старых звезд и могут иметь сложную структуру как результат различных механизмов формирования их внутренней и внешней частей [312].

Наше знание структуры диска Млечного Пути изменилось революционно в последнее десятилетие, поскольку новое глубокое фотометрическое зондирование, проведенное близко к галактической плоскости, выявило новые подструктуры. Помимо тонкого и толстого дисков и рассеянных скоплений сегодня рассматривается пять основных звездных подструктур во внешнем диске: это Кольцо Единорога (*The Monoceros Ring*), потоки Треугольника-Андромеды (*Triangulum-Andromeda*) и антицентр (*the Anti-Center*), Восточная Пластинчатая (окаймленная) структура (*the Eastern Banded Structure*) и Приливной рукав карликовой галактики в Стрельце (Поток Стрельца, *the Sagittarius Stream*). Так, например, недавнее масштабное исследование Кольца Единорога Эриком Моргансоном и соавторами [221] показало, что оно является огромной и сложной звездной подструктурой во внешнем диске Млечного Пути, видимой в области на стороне Галактического антицентра, с галактическими координатами $120^\circ < l < 240^\circ$, $-30^\circ < b < +40^\circ$ и состоящей из двух галактоцентрических колец (окружностей) с центром в точке, находящейся на расстоянии 4 кпк от центра Галактики, в направлении на антицентр; и его масса оценена в $4 \cdot 10^{-7} M_\odot$.

Еще одним звездным образованием диска является Пояс Гулда (*Gould Belt*) – группа очень молодых массивных звезд с возрастом $10 \div 30$ млн лет, образующих диск диаметром $500 \div 1\,000$ пк, центр которого находится на расстоянии $150 \div 250$ пк от Солнца в направлении антицентра Галактики и наклоненный к ее плоскости. Назван в честь Бенджамина Гулда, впервые обратившего в 1879 году внимание на то, что яркие звезды на небе образуют некий пояс, наклоненный к плоскости Млечного Пути (на угол порядка 20 градусов). В работе [85] на основе исследования столкновения большого облака высокой скорости с галактическим диском оценены характеристики области, где масштабный фазовый переход межзвездной среды (МЗС) происходит в результате удара. Проанализированы связанные комплексы из-за гравитационных неустойчивостей в МЗС, характерные длины и временные шкалы роста, принимая во внимание галактическое дифференциальное вращение и магнитное поле на больших масштабах. Физическая эволюция

«потрясенной» МЗС проходит в значительной степени под влиянием замороженного магнитного поля. Этот механизм может объяснить происхождение Пояса Гулда, состоящего из молодых массивных звезд.

Недавно было показано, что распределение скоростей звезд в окрестности Солнца характеризуется наличием двух глобальных звездных потоков (I и II) [272]. Поток I содержит кинематические подструктуры, названные движущимися группами звезд, такими как группы Плеяд и Гиад. Поток II связан с группой Сириуса (*Sirius*). Происхождение и природа этих двух звездных потоков до сих пор не совсем ясны. Авторы полагают, что потоки I и II были гравитационно связаны со старым сверхоблаком газа, которое распалось на части, в результате чего образовались новые подсистемы, а именно, рукав Ориона и Пояс Гулда. Опираясь на эту идею, для объяснения кинематических и структурных характеристик локальной системы газа и звезд была построена динамическая модель сверхоблака. После изучения относительных орбит двух звездных потоков относительно центра сверхоблака и галактической орбиты сверхоблака, опираясь на соответствующие уравнения движения, показана возможность того, что около 75-100 млн лет назад сверхоблако пересекло рукав Персея и, как следствие, сильно затормозило. Кроме того, около 60 млн лет назад, положение сверхоблака примерно совпало с местоположением Большого Зуба (*Big Dent*), «впадиной» диска Галактики. Причиной возникновения Большого Зуба могут быть возмущения в сверхоблаке из-за начавшегося формирования рукава Ориона и пояса Гулда. Поиск образований молодых звезд, свидетелей и участников недавних процессов звездообразования, продолжается. Так, на основе мазеров с измеренными тригонометрическими параллаксами подтверждено наличие пояса В-звезд Вокулер-Долидзе (*Vaucouleurs-Dolidze*) [49].

2.1.2. Рассеянные звездные скопления

Рассеянное звездное скопление (РС) – это группа звезд, родившихся в течение одного акта звездообразования в ограниченном объеме пространства. Рассеянные звездные скопления обнаружены в спиральных и неправильных галактиках, где происходят активные процессы звездообразования, и не наблюдаются в эллиптических галактиках, в которых процесс звездообразования давно окончен. Принято считать, что во Вселенной существует иерархия звездных группировок. Согласно характерному количеству звезд, входящих в группировку, можно построить такой ряд: одиночная звезда – двойная звезда – кратная система – рассеянное звездное скопление – звездная ассоциация – шаровое скопление – галактика – группа галактик – скопление галактик – сверхскопление галактик. Млечный

Путь вместе с Галактикой Андромеды (М31), Галактикой Треугольника (М33) и более 40 маленькими галактиками-спутниками его и Андромеды образуют Местную Группу галактик, которая входит в Местное Сверхскопление (Сверхскопление Девы). Яркие рассеянные скопления имеют имена собственные – Гиады (др.-греч. Υάδες), Плеяды (др.-греч. Πλειάδες), Ясли (Praesere) и хорошо известны еще со времен Клавдия Птолемея. Хотя первое наскальное изображение Плеяд датируется 16 500 годом до нашей эры.

В настоящее время в Галактике выделено несколько более 2 000 рассеянных звездных скоплений, а всего в Галактике может быть до 10 раз больше и даже достигать 100000. Первый каталог космических объектов, включающий рассеянные скопления, «Каталог туманностей и звездных скоплений», был опубликован в 1771 году Шарлем Мессье [232]. Он содержал всего 103 объекта, кроме рассеянных скоплений, это были шаровые скопления, планетарные туманности и галактики. В настоящее время база данных WEBDA (<http://obswww.unige.ch/webda/navigation.html>), созданная в Лозаннском университете под руководством Жана-Клода Мермийо, предоставляет данные о различных каталогах, об отдельных скоплениях и звездах скоплений. В последние годы сбором опубликованных данных (скорости, металличности, возрасты и др.) о РС и выпуском все новых версий сводного каталога занимается группа бразильских астрономов под руководством Вилтона Диаса [306]. Отметим также каталог скоплений Харченко и др. [146], содержащий однородные данные о пространственных, структурных, кинематических и астрофизических параметрах для 3006 реальных объектов, большинство из которых являются РС, но имеется также ряд ассоциаций и шаровых скоплений.

Рассеянные звездные скопления состоят из относительно плотного ядра (средний радиус ядра = 1.3 пс) и более разреженной короны (= 5.6 пк). Средний (типичный) диаметр скопления 5÷30 пк, масса порядка $10^3 M_{\odot}$. От случайных сгущений звезд на небе скопления отличаются по общему движению в гравитационном поле Галактики.

Определение координат центра скопления проводится путем подсчета звезд в секторах поля скопления. Звездная плотность в ядрах скоплений в среднем равна ≈ 15.4 звезды на пк^2 , а в коронах – ≈ 1.6 звезды на пк^2 . Располагаются рассеянные скопления в диске Галактики, не далее 100÷300 пк от галактической плоскости, и наблюдаются в полосе Млечного Пути или около нее. Звездные скопления населяют голубые и красные сверхгиганты, гиганты, двойные, переменные (цефеиды, вспыхивающие и другие) и пекулярные (имеющие отличающийся химический состав) звезды. При этом в силу общности происхождения, металличность (содержание металлов) звезд скопления предполагает

ся достаточно однородной и не более чем в 5 раз отличается от солнечной металличности. Однако последние исследования РС обнаруживают неоднородности химического состава ([196] и см. ниже по тексту).

Для классификации рассеянных скоплений была принята «двойная» классификация Роберта Трюмплера [428]. Одна из них основывается на виде диаграмм «светимость – цвет» каждого скопления и отражает их спектральный состав, вторая система классификации по Трюмплеру опирается на степень концентрации звезд в скоплении, разброс звездных величин звезд скопления, и количество звезд в скоплении.

Звездные скопления и более молодые образования, ассоциации продолжают рождаться в настоящее время в холодных газопылевых молекулярных облаках, в молодых скоплениях возле звезд видны остатки газо-пылевой туманности. Массы рассеянных скоплений невелики, и их гравитационное поле не в состоянии долго противодействовать разрушению скоплений. Возраст рассеянных скоплений колеблется от нескольких млрд лет до 1 млн лет, ассоциации еще моложе [306]. Самые молодые рассеянные скопления возрастом $1\div 10$ млн лет еще погружены в родительское газовое облако. Скопление Плеяд относится к сравнительно молодым скоплениям (рис. 2 на цветной вкладке), его возраст около 100 млн лет, и на фотографиях, полученных космическим телескопом «Хаббл», можно заметить газовые оболочки вокруг звезд, которые еще не рассеялись со времени образования скопления звезд.

ОВ-ассоциации состоят из очень молодых звезд и являются основными местами для изучения процессов звездообразования и взаимодействия между молодыми массивными звездами и межзвездной средой.

Возраст скоплений ранее определялся по Точке Поворота на диаграмме «светимость – цвет», часто называемой диаграммой Герцшпрунга – Расселла (ГР), путем совмещения Главной Последовательности (ГП) наблюдаемой диаграммы «светимость – цвет» $M_v - (B-V)$ с ГП начального (нулевого) (НГП) возраста $M_v - (B-V)_0$ с исправленными показателями цвета за селективное поглощение. Основная масса звезд на диаграмме ГР расположена вдоль диагонали на полосе, идущей от правого нижнего угла диаграммы в левый верхний угол, которая и называется Главной Последовательностью. Диаграмма названа по имени двух ученых, первыми построивших такую зависимость (Эйнара Герцшпрунга и Генри Расселла). Она представляет собой зависимость светимости или абсолютных величин звезд от их температуры или показателя цвета (для скоплений, впервые построенная Герцшпрунгом, и звезд поля – Расселом [164; 331]), и является великолепным тестом теорий эволюции звезд (рис. 3 на цветной вкладке).

Именно указание на генетическую связь между красными гигантами и звездами-карликами, находящимися на ГП, было получено из анализа

диаграммы ГР и дало толчок для развития теории внутреннего строения эволюции звезд. Эволюция звезд отражает изменение физических характеристик, внутреннего строения и химического состава звезд со временем. Ход эволюции звезды зависит в основном от ее массы и начального химического состава, и, в некоторой степени, от ее вращения и магнитного поля. Изучение звездной эволюции в дальнейшем привело к расчетам теоретических изохрон [173].

В настоящее время для определения возраста сравнение наблюдаемых диаграмм проводят не с НГП, а с последовательностями теоретических изохрон [239], или базы данных изохрон в Падуе (Италия), или Женевской базы моделей звездной эволюции – *Padova traks* <http://pleiadi.pd.astro.it/>, *Geneva traks* <https://obswww.unige.ch/Recherche/evol/Geneva-grids-of-stellar-evolution>), выбирая при этом изохрону, наилучшим образом соответствующую форме наблюдаемой ГП скопления.

НГП отражает тот факт, что звезды скопления находятся практически на одном расстоянии от Солнца. Разница между звездной величиной точки поворота НГП и абсолютной звездной величиной точки поворота НГП с показателем цвета, равным исправленному за покраснение, показателю цвета звезды, и есть оценка модуля расстояния до данной звезды. Характерная величина ошибки определения модуля расстояния методом совмещения диаграмм ($0^m.1 - 0^m.2$) в зависимости от длины фотометрированного участка ГП и наличия («загрязненности») звезд галактического фона на диаграмме ГР скопления, а также богатства скоплений звездами. Первым определил расстояние до Плеяд в 1907 г. Эйнар Герцшпрунг, сравнивая видимую величину звезд ранних спектральных классов скопления со средней величиной подобных звезд в окрестности Солнца, а в 1914 г. Якобус Каптейн вывел формулу для модуля расстояния [471]. Отметим еще один метод определения расстояния, подходящий для получения оценок расстояний как до рассеянных скоплений, так и до ассоциаций. Он основан на использовании отношения дисперсии лучевых скоростей и собственных движений звезд данной группировки. Впервые его применил Кай Странд [368] для определения расстояния до ассоциации Ориона.

РС охватывают значительный диапазон металличности ($-0.6 < [\text{Fe}/\text{H}] < +0.4$), и в целом показывают содержание элементов, подобное найденному у звезд диска того же возраста. Любые отклонения несут важную информацию о путях формирования РС, а также о производстве этих элементов в звездах. Так, для элементов, образованных в процессах нейтронного захвата, наблюдается большой разброс содержания бария (Ba), при этом многие РС и молодые ассоциации показывают избытки $[\text{Ba}/\text{Fe}]$ по отношению к содержанию на Солн-

це [114; 29; 378]. Происхождение этого переизбытка не ясно. Согласно современным работам, обогащение Ba по сравнению с другими элементами захвата нейтронов в РС не может быть объяснено дополнительными вкладами от s- или r-процессов нейтронного захвата, проходящих у звезд малых масс, или неучетом влияния отклонений от локального термодинамического равновесия (ЛТР) при расчетах содержания бария [114; 29]. Одним из возможных объяснений аномального содержания бария может быть предложенный в работе [251] дополнительный вклад в обогащение барием от промежуточного i-процесса (i, *intermediate*) нейтронного захвата (рис. 2.2).

Девид Ламберт и др. [196] на основе определения химического состава красных гигантов для большой выборки РС, имеющих близкую к солнечной металличности, показали, что содержание элементов нейтронного захвата La, Ce, Nd и Sm, Y и Eu (в меньшей степени) варьируется от одного скопления к другому. Для La, Ce, Nd и Sm амплитуды вариаций соответствуют основному вкладу s-процесса в вещество Солнечной системы. Анализ опубликованных ранее содержаний элементов у звезд поля говорит о том, что подобный разброс в содержаниях тяжелых элементов присутствует также у звезд различной металличности в тонком и толстом дисках. Это говорит о том, что, используя содержания тяжелых элементов, можно восстановить, реконструировать «растворенные» рассеянные скопления из звезд поля Галактики.

Возможность надежно определять расстояния до РС, их возраст, химический состав и другие параметры позволяет решать широкий класс задач, касающихся не только изучения структуры и эволюции Галактики, но и построения шкал спектральных и фотометрических калибровок.

Очень важную роль играют РС в построении современной шкалы расстояний до космических объектов: базой этой шкалы является шкала расстояний, калиброванная по расстоянию до рассеянных звездных скоплений [147].

Исследование распределения РС по возрастам показало наличие большого числа молодых скоплений

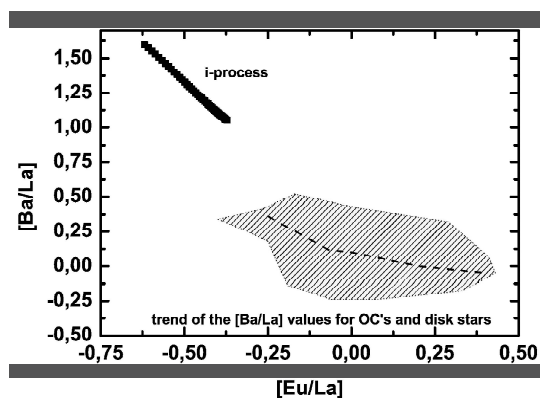


Рис. 2.2. Схематическое изображение обогащения барием и возможное влияние i-процесса [251]

по сравнению с количеством старых РС. Это говорит о том, что скопления постепенно теряют звезды за счет динамических эффектов, взаимодействуя друг с другом, при этом некоторые звезды приобретают скорости большие, чем скорость отрыва, и покидают скопление.

РС играют важную роль в исследовании эволюции Млечного Пути. Так, в частности, в работе [316] не найдено соотношения «возраст – металличность» (AMR) для РС, но отмечается, что отсутствие такой зависимости возникает из-за небольшого диапазона металличности скоплений по сравнению со звездами поля, которые охватывают более широкую область металличностей и возрастов. Тем не менее, подтверждается, что радиальный градиент металличности, определенный по РС, более крутой для галактоцентрических расстояний $R < 12$ кпк и более плоский – для $R > 12$ кпк. Показано, что выборка скоплений, показывающая крутой радиальный градиент металличности для расстояний $R < 12$ кпк моложе 1.5 млрд лет, расположена близко к средней галактической плоскости ($|z| < 0.5$ кпк) и имеет кинематику, типичную для тонкого диска. В то время как скопления, имеющие небольшой наклон и $R > 12$ кпк относительно старые, являются членами толстого диска с заметным разбросом по возрасту и высоте над средней плоскостью ($0.5 < |z| < 2.5$ кпк). Также показано, что звезды РС и поля показывают согласующиеся радиальные градиенты металличности, если сравнение проводится для аналогичных вертикальных высот. Основываясь на расчете галактических орбит, показано, что все внешние скопления диска на самом деле родились внутри радиуса в 12 кпк, но, судя по эксцентриситетам их орбит, в настоящее время они находятся на местах, очень далеких от их мест рождения.

Ранее в работе Гожи и Марсакова [151] было показано, что РС присутствуют в различных подструктурах Галактики – галактические скопления в тонком диске, пекулярные скопления – в толстом диске и гало. Авторами были предложены следующие критерии, являющиеся комбинациями кинематики и металличности, для выделения скоплений тонкого диска – $(Z^2_{\max} + 4e^2)^{1/2} < 0.35$, $[Fe/H] > -0.2$, толстого диска – $0.35 < (Z^2_{\max} + 4e^2)^{1/2} < 2.30$, $[Fe/H] < -0.2$, и гало – $(Z^2_{\max} + 4e^2)^{1/2} > 2.30$. Эти три группы скоплений показали различие возрастов 0.39, 0.92, и 2.55 соответственно $< Z_{\max} >$, кпк – 0.11, 0.39, 7.71, $< R_{GC} >$ 7.86, 10.01, 15.14. $< R_{GC} >$ соответствуют среднему расстоянию различных групп галактических скоплений от центра Галактики. Анализ элементов орбит показал, что основная масса скоплений обеих групп образовалась внутри галактоцентрического радиуса $R \approx 10.5$ кпк и ближе, чем ≈ 180 пк от галактической плоскости, но благодаря высоким начальным скоростям пекулярные скопления со временем оккупировали объемы, занимаемые объектами толстого диска, собственного гало и даже аккрецированного гало (короны) Галактики. В результате исследования авторы

пришли к выводу, что значительная часть РС в Галактике образовалась как следствие взаимодействия внегалактических фрагментов (например, высокоскоростные облака, шаровые скопления, карликовые галактики) с межзвездным веществом тонкого диска, что привело к более низким металличностям по сравнению со звездами диска и орбитам, характерным для более старых подструктур Галактики.

На основе компилятивного каталога параметров 346 рассеянных скоплений, содержащего их металличности, положения, возрасты и скорости, а также рассчитанных элементов орбит для 272 скоплений и спектроскопических определений относительных содержаний $[E/Fe]$ в 90 скоплениях получено, что относительные распространенности первичных α -элементов (кислород и магний), а также относительные содержания элементов нейтронных захватов (r -процесса, Eu , и s -процесса, Y , Ba , La и Ce) имеют различные зависимости от металличности, возраста, галактоцентрического расстояния и элементов орбит в скоплениях с высокими вытянутыми орбитами и в звездах поля тонкого диска Галактики [293; 294]. Показано, что у молодых скоплений не только барий, но и три других исследованных s -элемента показывают содержания значительно более высокие, чем относительные содержания у звезд поля той же металличности. Найдено также, что в относительно богатых металлами скоплениях с высокими вытянутыми орбитами в среднем относительные содержания первичных α -элементов выше, а европия ниже, чем в звездах поля. При этом у более бедных металлами скоплений с высокими вытянутыми орбитами наблюдается обратное соотношение. Авторы объясняют это тем, что скопления с высокими вытянутыми орбитами разной металличности образуются в результате взаимодействия двух типов высокоскоростных облаков с межзвездной средой галактического диска. Один из них – малометаллические высокоскоростные облака, образованные из «первичного» газа, и другой – более металлические облака с промежуточными скоростями, образовавшиеся в процессе «галактического фонтана». К появлению «галактических фонтанов» приводят турбулентные потоки в межзвездной среде, вызванные взрывами массивных сверхновых, которые выбрасывают в МЗС большое количество атомов первичных α -элементов и мало атомов r -элементов. По мере того, как потоки раскаленного газа поднимаются над поверхностью диска галактики и достигают «высоты» в несколько килопарсек, они, испуская излучение, теряют энергию и остывают. Этот охлажденный газ понемногу конденсируется в более плотные облака, которые притягиваются обратно, в диск галактики, напоминая фонтан, поднимающий быструю струю воды, которая затем падает вниз. Этот процесс обеспечивает глобальную циркуляцию газа, связывающую основную часть галактики с ее гало, и обмен материей между ними.

2.1.3. Газопылевой диск

В нашей Галактике межзвездный газ и пыль составляют примерно 2% от полной массы Галактики и концентрируются в основном в плоскости Галактики. С физической точки зрения газ скапливается там, где его полная (кинетическая + потенциальная) энергия минимальна. К основным компонентам МЗС относятся: 1) газ, который разделяется на корональный газ (горячая плазма, температура $T \sim 10^6$ К, плотность $n \sim 0.003$ см⁻³), зоны HII (ионизованный водород, $T \sim 10^4$ К, $n \sim 1$ см⁻³), атомарный водород (облака HI, $T \sim 100$ К, $n \sim 10$ см⁻³), молекулярные облака ($T \sim 10\text{--}30$ К, $n \sim 300$ см⁻³), мазерные конденсации ($T < 100$ К, $n \sim 10^{10}$); 2) пыль; 3) магнитные поля (напряженность B порядка 10^{-6} Гс); 4) космические лучи (энергия E порядка $10^{11} \div 10^{20}$ эВ). Межзвездная среда проявляется в покраснении света от звезд, которое связано с рассеянием и поглощением на пылинках, в поляризации светового потока при отражении света и в линиях поглощения в спектрах звезд (пыль, газ).

Рассмотрим подробнее составляющие МЗС. Межзвездный газ – это в основном смесь водорода (около 70%) и гелия (около 28%) с очень небольшой примесью более тяжелых химических элементов. Самый распространенный атомарный газ – водород (HI) излучает в радиодиапазоне на длине волны около 21 см. Радионаблюдения показали, что газ образует облака неправильной клочковатой формы (в спиральных ветвях размером до 100 пк и с температурой в несколько сотен градусов Кельвина) и более разреженную и горячую межоблачную среду. Как было сказано выше, газ может находиться также в ионизированном состоянии ($T \sim 10^4$ К), в светлых диффузных туманностях размером до 10 пк, и в молекулярном состоянии ($T \sim 10$ К), в гигантских молекулярных облаках размером около 40 пк. Туманности делятся на: 1) эмиссионные – наблюдаются вблизи молекулярных облаков в областях звездообразования и связаны с горячими звездами спектрального класса O (Туманность Ориона, рис. 4 на цветной вкладке); 2) отражательные – небольшие области с высоким содержанием пыли, которые отражают и рассеивают свет ближайших звезд, как правило, горячих спектрального класса A. Поскольку рассеивание света сильнее в коротковолновой части спектра, то они имеют голубоватый цвет (Плеяды, см. рис. 2 на цветной вкладке); 3) планетарные туманности – сброшенная расширяющаяся оболочка красного гиганта, превращающегося в белого карлика (пример – туманности «Кошачий глаз» (*Cat's Eye Nebula*, NGC 6543), открытая Уильямом Гершелем, в 1786 году и «Бабочка» (*Butterfly Nebula*, NGC 6302), первый рисунок опубликован Эдуардом Барнардом в 1906 году (рис. 5а, б на цветной вкладке) и 4) остатки от взрыва сверхновых (Крабоидная туманность, рис. 6 на цветной вкладке).

В эмиссионных туманностях плотность газа значительно выше, чем в окружающем их пространстве, но и в них концентрация частиц составляет лишь десятки или сотни атомов в кубическом сантиметре. Примером такой туманности является Туманность Ориона (см. рис. 4 на цветной вкладке). Впервые подробно ее описал Х. Гойгенс в 1656 г. Она имеет сравнительно небольшой линейный размер (20–30 св. лет), является областью ионизованного водорода с активным звездообразованием.

Поскольку диаметры некоторых туманностей превышают 100 св. лет, полная масса газа в них может достигать десятков тысяч $M_{\odot}$. Зоны HII – самый распространенный вид эмиссионных туманностей вокруг горячих звезд, ионизация водорода обеспечивается ультрафиолетовыми (УФ) квантами $\lambda < 912 \text{ \AA}$ и электронными ударами. Т. о. эти туманности светятся потому, что внутри них или рядом с ними находятся звезды – горячие голубые звезды-сверхгиганты, жесткое ультрафиолетовое излучение которых преобразуется (переизлучается) газом в форме видимого света (флуоресценция). Линии водорода придают туманности розоватый цвет. Температура около 10^4 K , плотность до 10^3 ионов/см³. Подобную природу имеют и планетарные туманности, в которых светится газ, сбрасываемый звездами в процессе эволюции, на стадии после АВГ (см. рис. 5а, б на цветной вкладке).

Крабовидная туманность, остаток сверхновой SN 1054 (рис. 6 на цветной вкладке). Ее свечение – это преобразованная энергия газа, разлетающегося после взрыва звезды, плюс энергия, выделяемая сохранившимся остатком сверхновой. В центре находится пульсар, быстровращающаяся нейтронная звезда. Под номером 1 она записана в Каталоге Шарля Мессье.

Еще одними представителями молодых звездных образований являются т. н. вложенные (встроенные) скопления (*embedded clusters*). Вложенные звездные скопления – это скопления, которые частично или полностью окружены межзвездным газом и пылью в пределах молекулярных облаков (рис. 7 на цветной вкладке). Они состоят из очень молодых, недавно образованных или образующихся звезд. Поскольку они погружены в значительное количество межзвездной пыли то, как правило, невидимы в оптическом диапазоне длин волн, а обнаружены и изучены по инфракрасной части электромагнитного спектра. Эти системы представляются важными лабораториями для изучения формирования звезд и ранней эволюции звезд, а также одним из индикаторов спиральных ветвей. Они являются предшественниками красивых рассеянных скоплений, населяющих диск нашей Галактики, лишь небольшая часть из них «выживает» и появляется, в конечном счете, как видимые рассеянные скопления, такие как Плеяды или Гиады. Одним из примеров вложенного скопления является скопление Трапеция Ориона, находящееся в Большой Туманности Ориона, видимое невооруженным глазом как средняя звезда в Мече Ориона [394].

Часто на фоне изображений эмиссионных туманностей наблюдаются резкие темные детали – причудливые очертания пятен, струй. Это проектирующиеся на светлую туманность расположенные недалеко от нее небольшие и более плотные облака, содержащие и межзвездную пыль, поглощающую свет (рис. 8 на цветной вкладке).

«Раздвоение» полосы Млечного Пути в области созвездия Лебедя является «следом, отпечатком» космической пыли, которую можно увидеть и невооруженным глазом. Если вблизи холодных газопылевых облаков располагаются яркие звезды, то их свет рассеивается на пылинках и видна «отражательная туманность». По поляризованному непрерывному спектру такой туманности было установлено, что твердые частицы космической пыли имеют размер порядка $0.1\div 1$ мкм. Вероятно, у них железо-силикатное или графитовое ядро, покрытое льдом из легких элементов. Полная масса пыли в Галактике составляет не более 1% от массы межзвездного газа.

Исследование пыли проводится по излучению в ИК- и радиодиапазонах, а также в полосах и линиях поглощения в видимом диапазоне спектра. Изучение линий ионизованного кальция CaII и нейтрального натрия NaI в спектрах $3\cdot 10^5$ галактических и внегалактических объектов на основе обзора SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*) позволило построить карты распределения поглощения, которое необходимо учитывать при точной фотометрии и, что более важно, для оценки фотометрических красных смещений галактик, которые показывают активное звездообразование [63]. Диффузные межзвездные полосы (*diffuse interstellar bands, DIBs*) также являются хорошими индикаторами и пыли, и теплой нейтральной, и слабо ионизированной диффузной МЗС [110; 220]. Использование более 1.5 млн спектров для изучения свойств диффузных межзвездных полос (DIBs) в Млечном Пути и исследования корреляции эквивалентной ширины восьми полос DIBs с экстинкцией (поглощением) пыли и некоторыми атомными линиями, а также распределение четырех полос DIBs – 5780.6, 5797.1, 6204.3, 6613.6 Å показали, что интенсивности полос DIBs заметно коррелируют с экстинкцией и поэтому они неизбежно коррелируют друг с другом. Однако отмечено то, что особенно интересно, что DIBs могут существовать даже в областях без пыли, а их корреляция с пылью значительно изменяется по небу. Соответственно происхождение их может быть различно [110]. Используя объединение поглощения на луче зрения по направлению на многочисленные звезды, расположенные в разных местах в Галактике, и измеренные расстояния, в модели пространственной корреляции пыли воспроизводится 3D (трехмерное) распределение пыли.

По исследованию двух сильных полос DIBs и линий NaI D и CaII K в спектрах 666 звезд МО подтверждена связь 5797 Å DIB с

нейтральным газом, а 5780 Å DIB с более полупрозрачным газом, в целом прослеживающих области звездообразования в Магеллановых Облаках [220]. Подобным образом, линия NaI D отслеживает более плотную МЗС, тогда как линия CaII K характеризуют более диффузный, более теплый газ. Линия CaII K обнаруживает дополнительный компонент на ~ 200-220 км/с, видимый в направлении Магеллановых Облаков; который может ассоциироваться с большим Магеллановым гало. Сходство в поведении между DIBs и NaI в ММО, БМО и Млечном Пути указывает, что химический состав DIB-носителей, обеспечивающих поглощение, пропорционален металличности.

Запрещенные линии атомов в МЗС в видимой области [OIII], [OII], [SII], [NII], а также запрещенные линии [CII], [OI] в далеком ИК-диапазоне являются индикаторами звездообразования в запыленных областях и дают возможность наблюдать и изучать эти процессы.

Наиболее холодные и плотные области наблюдаются в массивных газовых комплексах и обычно связаны с областями звездообразования. В плотных областях водород становится молекулярным и становится «невидимым» в радиодиапазоне. В таких холодных облаках (до Т порядка 10 К) радионаблюдения позволили обнаружить довольно сложные молекулы: гидроксил OH, пары воды H₂O и аммиака NH₃, формальдегид H₂CO, окись углерода CO, метанол (древесный спирт) CH₃OH, этиловый (винный) спирт CH₃CH₂OH и еще десятки других, даже более сложных молекул. И химический состав, и размеры молекулярных облаков очень разнообразны. Энергия взрывов сверхновых, звездный ветер от массивных звезд, а также коротковолновое излучение молодых горячих звезд могут нагревать и разрушать молекулярные облака. Газ расширяется и нагревается до миллиона и более градусов. Такой газ часто называют «корональным» – по аналогии с газом горячей солнечной короны, хотя межзвездный горячий газ на несколько порядков разреженней, чем газ короны Солнца.

2.1.4. Межзвездное магнитное поле и космические лучи

Магнитное поле Галактики – это слабое магнитное поле (10⁻⁶ Гс), пронизывающее Галактику, линии индукции которого в основном параллельны галактической плоскости и, изгибаясь, направлены вдоль спиральных рукавов Галактики. Межзвездные газопылевые облака пронизаны магнитным полем Галактики, и самая длинная ось пылевых частиц, как правило, направлена под прямым углом к полю. В результате их излучение является частично поляризованным и может быть зарегистрировано соответствующими датчиками, что дает наблюдаемую поляризацию непрерывного радиоизлучения галактик. Вообще магнитные поля галактик проявляют себя по синхротронному радиоизлучению релятивистских электронов, поляризации света

при рассеянии на упорядоченных пылинках и Фарадеевскому вращению плоскости поляризации в магнитном поле.

Принято выделять крупномасштабную составляющую магнитного поля (масштаб однородности порядка сотен и тысяч пк) и флуктуационную составляющую с широким спектром масштабов (от долей пк до сотен пк). Крупномасштабная составляющая сосредоточена в основном в ионизованном газовом диске Галактики. Распределение поля симметрично относительно галактической плоскости. В плотных межзвездных облаках, туманностях и конденсациях, например, в космических мазерах, индукция магнитного поля может достигать 10^{-3} Гс (флуктуационная составляющая).

Происхождение магнитного поля галактик связывают с гидродинамическими движениями ионизованного межзвездного газа (гидромагнитное динамо) [470]. Под действием движений первоначальное слабое (затравочное) магнитное поле экспоненциально нарастает во времени. Главную роль в генерации крупномасштабного поля играют неоднородное вращение ионизованного газа и зеркально несимметричные турбулентные движения. Нарушение зеркальной симметрии движений газа (появление т. н. средней спиральности) обязано действию кориолисовых сил на неоднородно распределенный по высоте (над плоскостью галактики) турбулизированный газ. Согласно теории гидромагнитного динамо в тонком турбулентном вращающемся диске в первую очередь возбуждается магнитное поле с преобладающим азимутальным компонентом, симметричным относительно плоскости диска. Основное возбуждаемое магнитное поле не зависит от азимута. В следующем приближении возбуждаемое магнитное поле имеет вид двухрукавной спирали (бисимметричная структура). Т. о. теория гидромагнитного динамо объясняет и предсказывает наблюдаемые конфигурации магнитных полей галактик. Источником затравочного поля галактик могут служить выбросы вещества с магнитным полем из сверхновых, массивных звезд с истечением вещества и пр. Сумма большого числа случайно ориентированных мелкомасштабных магнитных полей, согласно расчетам, дает слабое крупномасштабное поле порядка 10^{-3} мкГс, которое достаточно усилить процессом динамо лишь в 10^3 раз, чтобы получились характерные для галактик величины крупномасштабных магнитных полей.

На рис. 9 (а, б) на цветной вкладке представлена карта магнитного поля Галактики с высоким разрешением, полученная при помощи спутника ЕКА «Планк» [300]. Нежные пастельные тона и тонкая структура этого изображения показывают, как взаимодействуют пыль и магнитное поле нашей Галактики. Цветовая гамма полностью отражает интенсивность излучения пыли, показывая, что межзвездное магнитное поле силь-

нее всего в центральном диске, а его расположение более упорядочено вдоль плоскости Галактики и следует за спиральным узором Млечного Пути. Небольшие облака видны только выше и ниже плоскости, там, где структура магнитного поля становится менее упорядоченной. Магнитное поле создается вращением заряженного газа вокруг центра Галактики. Предполагается, что если смотреть сверху, магнитное поле Млечного Пути выглядит как спираль, раскручивающаяся из центра.

Магнитные поля спиральных галактик играют важную роль в управлении огромными комплексами молекулярных облаков, которые являются местами звездообразования в галактиках [200], а также в процессах переноса момента количества движения из межзвездных облаков при формировании звезд, в перераспределении момента количества движения между протозвездами и протопланетами. Оно, в частности, ответственно за удержание космических лучей в Галактике и за вытянутую форму и волокнистую структуру многих типов туманностей.

Исследованы статистические свойства межзвездной поляризации пыли на высоких галактических широтах вокруг Южного полюса ($\delta < -60^\circ$), используя данные со спутника «Планк» с целью улучшения понимания намагниченной МЗС [299]. Представлена феноменологическая модель распределения доли поляризованного излучения (степени поляризации) и угла поляризации в статистическом описании упорядоченных и турбулентных составляющих галактического магнитного поля. Достаточно простая модель позволяет составить карту поляризации пыли, что является важным для оценки точности используемых методов в разделении компонентов магнитного поля в экспериментах, направленных на поиск поляризации от первичных гравитационных волн.

Как замечено в [215], магнитные поля наблюдаются и за периферией обнаруженных оптически галактических дисков, в то время как численные модели их происхождения и типичные величины индукции до сих пор отсутствуют. Ранее исследователи галактического динамо избегали рассмотрения периферий галактических дисков из-за очень ограниченного знания о локальных свойствах МЗС. На основе простой эволюционной модели галактического динамо, применимой к периферийным областям галактик, для различных предположений о радиальных и вертикальных профилях ионизированного газа диска, показано, что магнитное поле может увеличиваться по мере эволюции галактики даже в более отдаленных частях галактического диска с радиусами от 15 до 30 кпк, становясь существенным после около 10 млрд лет. Магнитное поле в отдаленных частях галактического диска может быть сгенерировано на месте путем локального действия динамо. Другой возможностью является создание поля в централь-

ных областях галактики, а затем перенос его к периферии диска совместным действием динамо и турбулентной диффузии.

Помимо газа и пыли межзвездное пространство заполнено также очень энергичными частицами космических лучей (КЛ), имеющими электрический заряд, – электронами, протонами и ядрами некоторых элементов (He, C, Fe). За открытие космических лучей в 1912 г. Виктор Гесс и Карл Андерсон (за открытие позитрона) получили Нобелевскую премию по физике 1936 года. Различают первичные КЛ – космические лучи до входа в атмосферу и вторичные КЛ, образовавшиеся в результате процессов взаимодействия первичных космических лучей с атмосферой Земли. Эти частицы летят практически со скоростью света по всем возможным направлениям. Их основными (но не единственными) источниками служат взрывы сверхновых звезд. Частицы движутся в слабом магнитном поле Галактики. Межзвездное магнитное поле, действуя на заряженные частицы с силой, зависящей от их энергии, «запутывает» траектории частиц, и они непрерывно меняют направление своего движения в Галактике. Лишь наиболее высокоэнергичные КЛ движутся по слабо искривленным путям, поэтому не удерживаются в Галактике, уходя в межгалактическое пространство. Они излучают (т. е. отслеживаются) в радиодиапазоне. Также они проявляются в ионизации атмосферы Земли. Возможность получать информацию о галактических космических лучах (ГКЛ) сверхвысоких энергий обусловлена тем, что первичная частица в земной атмосфере вызывает адронно-электромагнитный каскад. Он состоит из большого числа вторичных частиц (пионов, протонов, нейтронов, мюонов, электронов, позитронов и фотонов) и называется широким атмосферным ливнем (ШАЛ). Это название связано с тем, что вторичные частицы, возникающие в результате взаимодействий и распадов, могут быть зарегистрированы на достаточно больших расстояниях от оси ШАЛ – прямой, совпадающей с направлением движения первичной частицы. Исторически первым методом, использованным для исследования ШАЛ, был метод детектирования ШАЛ путем регистрации потоков заряженных частиц (например, камера Вильсона, счетчики совпадений и др.), и благодаря относительной простоте широко распространен и в настоящее время. В 1938 г. Пьер Оже предпринял исследования атмосферных ливней с помощью счетчиков, включенных в схему совпадений. Ему удалось проследить такие ливни вплоть до расстояний между счетчиками в 300 м. В 1940 году под руководством Дмитрия Скобельцина, обнаружившего в 1929 г. свойство космических частиц появляться в виде групп или ливней, представляющих собою поток ионизирующих частиц, одновременно проходящих через камеру, была организована экспедиция, которую возглавил Александр Блещунов.

Она была отправлена в район перевала Ак-Байтал (4655 м, Памир) для заброски аппаратуры по исследованию КЛ, однако из-за начавшейся войны исследования были перенесены на несколько лет позже. Но уже в 1946 г. на Памире, на высоте 3860 м были обнаружены гигантские сверхширокие ливни, покрывающие до 1 кв. км и более, благодаря новому методу регистрации ливней с использованием счетчиков, предложенному Д.В.Скобельцыным [473]. Наряду с регистрацией ШАЛ по потоку заряженных частиц получили широкое распространение также методы детектирования ШАЛ, основанные на регистрации сопутствующих ШАЛ оптических излучений – черенковского излучения и ионизационного свечения или флуоресценции. В настоящее время исследования ГКЛ проводятся наземными, атмосферными и внеатмосферными, космическими детекторами частиц.

На сегодняшний день построены достоверные модели взаимодействия КЛ с ядрами атомов атмосферы, позволившие изучить энергетический спектр и состав их первичных частиц очень высоких энергий. Стало ясно, что КЛ в динамике развития Галактики играют не меньшую роль, чем ее поля и потоки межзвездного газа – удельная энергия КЛ, газа и магнитного поля примерно равны 1 эВ в см³. Большие энергии ГКЛ (до 10¹⁶ эВ) являются следствием ускорения частиц в остатках сверхновых на фронтах ударных волн, скорости которых на порядки выше скоростей облаков. Сегодня мы достоверно знаем, что механизм ускорения космических протонов и ядер ударной волной в оболочках сверхновых наиболее эффективен. Наблюдения оболочек сверхновых (остатков «туманностей») в оптическом, в радио-, рентгеновском и гамма-диапазонах, выполненные космическими обсерваториями «Чандра» (названа в честь Субраманьяна Чандрасекара, рентгеновский телескоп НАСА), «Хаббл» и «Спитцер», показали, что в оболочках действительно происходит ускорение электронов и протонов, сопровождаемое рентгеновским излучением. Еще одним источником КЛ являются вспышки на Солнце.

Природа КЛ сверхвысоких энергий пока не установлена однозначно. Это может быть ускорение КЛ на ядрах активных галактик со струями газа или элементарные частицы с массой порядка 10²³ – 10²⁴ эВ, из которых вероятно состояло вещество на самой ранней стадии Большого взрыва, сохранение которых до наших дней пресказывается в некоторых космологических моделях (места таких частиц – топологические дефекты Вселенной). Интенсивность ГКЛ на больших интервалах времени оставалась постоянной в течение ~10⁹ лет. Однако на основе исследований относительной концентрации радиоактивных изотопов ¹⁴C, ¹⁰Be, показано, что 30–40 тыс. лет тому назад наблюдался пик интенсивности КЛ. Его связывают с взрывом близ-

кой к Солнечной системе сверхновой (~ 50 пк). КЛ играют важную роль в нуклесинтезе химических элементов, который не связан непосредственно с ядерными реакциями внутри звезд. Некоторые легкие ядра образуются в результате реакций скалывания – реакции деления ядер C, N, O при столкновении с ядрами H и He либо в КЛ, либо КЛ с атомами МЗС или в поверхностных слоях атмосфер звезд.

2.1.5. Процессы звездообразования в Галактике

Еще в 1811 г. Уильм Гершель предложил гипотезу формирования звезд и звездных скоплений из вещества – газопылевых туманностей, хотя пространство окружающего мира, мира звезд и туманностей, считал абсолютно прозрачным. Он предполагал развитие космической материи под действием силы тяготения – от разряженных, хаотических форм к сложно организованным – звездам и звездным скоплениям. Писал также о туманности Ориона, что она представляет «хаотический материал для будущих солнц».

Согласно современной точке зрения на процессы формирования звезд, предпосылками для этого являются достаточно высокая плотность и не очень высокая температура среды (газа и пыли), которая находится в состоянии гравитационной неустойчивости. Спусковым механизмом начала звездообразования могут быть взрывы сверхновых звезд, наличие внешних магнитных полей, таких как магнитное поле Галактики, близкое соседство с массивными звездами и др. Случайно возникший в одном месте, процесс формирования звезд может инициировать звездообразование в соседних участках. Такое явление называется вынужденным или стимулированным звездообразованием. Физически оно связано с тем, что молодые звезды своим мощным излучением и звездным ветром создают вокруг себя расширяющиеся оболочки, которые уплотняют окружающий газ и “запускают” тем самым процесс звездообразования на некотором расстоянии от уже существующего очага молодых звезд.

Базовые процессы звездообразования включают в себя возникновение гравитационной неустойчивости в облаке, формирование аккреционного диска и начало термоядерных реакций в звезде. Флуктуации плотности в газе возникают и распадаются вследствие хаотического движения атомов и молекул. Для неоднородностей больших масштабов может оказаться, что собственное притяжение такой флуктуации способно удерживать газ в данном объеме и не дать ему рассеяться. Процесс фрагментации и конденсации МЗС обуславливается критерием Джеймса Джинса, который гласит, что бесконечная однородная среда не может быть устойчива по отношению к раскатке волн плотности большой длины [462]. Гравитационная неустойчивость ведет к образованию неоднородностей (сгустков) в первоначально

однородной среде и сопровождается уменьшением гравитационной энергии системы, переходящей в кинетическую энергию сжимающегося вещества. Она, в свою очередь, может переходить в тепловую энергию и излучение. Фактором, удерживающим облака от сжатия, является магнитное поле, однако поддержка магнитного поля теряется из-за амбиполярной диффузии [233].

Принято считать, что время жизни молекулярных облаков не превышает $3 \cdot 10^7$ лет. Однако, как показано Засовым и Каспаровой [456], значительная часть молекулярных облаков (преимущественно во внешних областях диска) может избежать процессов разрушения, по крайней мере, до 10^8 лет или даже дольше. Молекулярное облако может жить долго, если массивных звезд мало или они отсутствуют вообще. Массивные звезды, которые способны уничтожить облако, не могут образовываться в течение длительного времени, если облако маломассивное или есть задержка начала активного звездообразования. Продолжительность неактивной фазы облаков согласуется с небольшим количеством наблюдаемых гигантских молекулярных облаков, не содержащих звезд. При условии, что они предшествовали фазе медленного сжатия намагниченного темного газа, не обнаруживаемого в СО-линиях.

В случае, когда образование (конденсация) протопланетного диска становится возможным, он может считаться аккреционным диском, поскольку газ из окружающего пространства (внутреннего радиуса) выпадает на протозвезду. По мере уплотнения такое облако начинает коллапсировать и по достижении T порядка 10^7 К в ядре протозвезды начинаются ядерные реакции. Наличие дисков вокруг звезд и субзвезд в пределах 10 пс от Солнечной системы [454] говорит о правильности предполагаемых сценариев звездообразования. При этом наличие дисков позволяет очертить современные концепции астрофизических свойств околозвездных дисков и проблем, связанных с результатами их поиска и обнаружения, в частности на основе ИК-избытков в спектрах ближайших звездных и субзвездных систем.

Кун и др. [195] исследовали характеристики процессов формирования звезд, в частности возможность локализовать формирование отдельной звезды, изучая молодые звезды ОБ спектральных классов в 17 массивных областях звездообразования (MSFRs), на основе каталога порядка $> 31\,000$ вероятных членов звездных комплексов галактического диска. Полученные карты проекций структуры молодых звездных популяций (населений) в единицах собственной звездной поверхностной плотности позволяют осуществлять прямое сравнение между различными областями. В некоторых регионах обнаружено несколько плотных «комков», близких по размеру и плотности к Туманности Ориона. Однако гистограммы по-

верхностной плотности показывают различные диапазоны значений в разных регионах, т. е. поверхностная плотность не может дать ответ на вопрос: это независимое формирование отдельных звезд или звезд в скоплениях? Хотя сам комплекс Ориона хорошо изучен [199], но пространственное распределение звездного населения все еще остается неопределенным; в частности не установлены достоверно расстояния и возраст различных подгрупп, входящих в состав ассоциации Орион OB, и их связь с окружающей МЗС. В последнее время найдены доказательства существования молодого и богатого металлами населения по всей области, свободно группирующегося вокруг некоторых известных и исследованных ранее групп. Эта недавно обнаруженная популяция молодых звезд дает повод для пересмотра истории звездообразования в области Ориона.

Звездообразование сопровождается значительными преобразованиями в химическом составе и физическом состоянии МЗС. Объединение наблюдений в ИК- и радиодиапазонах позволяет получить множество данных о формировании звезд как в континууме, так и в спектральных линиях. Эти линии в основном принадлежат к молекулам – от простых двухатомных до сложных органических соединений.

Так, например, мазеры метанола и гидроксила (CH^3OH и OH) являются источниками нетеплового излучения и связаны с зонами звездообразования, протопланетными дисками, поэтому их рассмотрение позволяет изучать физические процессы в этих областях.

Однако межзвездные молекулы недостаточно хорошо смешиваются с массой межзвездного газа (молекулярный и атомарный водород) и обладают сложной своей собственной эволюцией. Таким образом, простая интерпретация данных наблюдений редко удается. Требуются сложные химические и физические модели, чтобы «расшифровать» процессы, происходящие в областях звездообразования. На основе анализа оптической спектроскопии и инфракрасной фотометрии для более 100 комплексов HII в девяти галактиках [280] исследована связь между интенсивностью эмиссии полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) и возрастом, свойствами поля УФ-излучения и металличностью изученных комплексов HII. Хорошо известная корреляция между физическими свойствами (возраст, параметры поля излучения) и металличностью подтверждается в данных исследованных комплексов. Отношение ИК-потока также коррелирует с отношением линий кислорода и водорода $[\text{OIII}] \lambda 5007/\text{H}\beta$ (соотношение, которое часто рассматривается как показатель плотности поля излучения), но эта корреляция, вероятно, есть простым отражением корреляции между $[\text{OIII}] \lambda 5007/\text{H}\beta$ и металличностью. В отдельных областях металличности отношение параметров коррелирует с возрастом комплекса HII, который оценивается по эквивалентной ширине линии $\text{H}\beta$. Корреляция положительна для

низкометаллических комплексов и отрицательна для высокометаллических комплексов. Анализ различных механизмов формирования и разрушения ПАУ в контексте обнаруженных корреляций доказывает, что содержание ПАУ может изменяться под действием УФ-излучения в комплексах HII, и не обязательно из-за их разрушения. ПАУ могут также образовываться в комплексах HII вследствие иных процессов, таких как ароматизация, фотодеструкция, разбивка и распыление очень мелких зерен. В этом случае коэффициент отношения параметров определяется балансом между всеми этими процессами, которые могут быть разными при различных металличностях.

При детальном рассмотрении гигантских очагов звездообразования размером порядка 1 кпк и массой $10^7 - 10^8 M_{\odot}$ установлено, что они «распадаются» на отдельные структуры размером 100 пк, немного различающиеся по возрасту, то есть по моменту прохождения через них волны, стимулировавшей звездообразование. Сама же область размером 1 кпк напоминает некий «котел», в котором звездообразование бурлит достаточно долго (порядка 100 млн лет) и в который могут поступать извне новые порции вещества. То есть звездообразование носит характер локальных вспышек. Скорее всего, и магнитное, и гравитационное поля, влияние которых разделить трудно, совместно управляют межзвездной средой и удерживают облака газа и молодые звезды.

Звезды на начальной стадии своего существования, как правило, скрыты внутри плотного облака пыли и газа. Часто силуэты таких звездообразующих коконов можно наблюдать на фоне яркого излучения окружающего газа (рис. 8 на цветной вкладке). Космический телескоп «Спитцер», предназначенный для исследования в ИК-диапазоне спектра, обнаружил более 300 протозвезд в одной из туманностей (RCW49), скрытых пылью в видимом диапазоне. Это один из многочисленных очагов звездообразования в нашей Галактике. Результаты исследования этой космической миссии показали, что, очевидно, в настоящее время в нашем Млечном Пути звезды рождаются более интенсивно, чем предполагали ранее астрономы. Современное значение скорости звездообразования в Галактике равно $1.65 \pm 0.19 M_{\odot}$ в год [46].

Скорость процесса звездообразования в дисковых галактиках обусловлена тем, насколько «равномерно» в них движется газ – его скорость сильнее меняется там, где рождается больше звезд. Наблюдения за старыми галактиками показывают, что около двух третей из них – это массивные вращающиеся диски, где скорость движения газа, как правило, меняется в пять раз сильнее, чем в более «молодых» дисковых галактиках. Источником такой нестабильности или турбулентности могут быть потоки холодного и плотного газа, проходящие через более горячий газ гало, сферические облака вокруг галактических дисков.

Важным вопросом является также вопрос о причинах остановки звездообразования в галактиках. Остановка, прекращение звездообразования является одним из наиболее значительных событий в эволюционном цикле галактик. Анализируя два пика в функции распределения масс нашей Галактики, Анатолий Сучков и Владимир Марсаков еще в 1976 году предложили гипотезу о переменной во времени интенсивности звездообразования в нашей Галактике [466; 467]. В недавнее время Джон Скало с коллегами [75] независимо показали, что на временах 0–1 млрд, 2–5 млрд и 7–9 млрд лет назад звездообразование шло необычайно интенсивно и не было постоянным с уровнем вероятности 98%. А перерыв в звездообразовании связан, видимо, с тем, что после взрывов сверхновых последовал разогрев МЗС, который остановил в ней звездообразование, поскольку звездообразование может происходить лишь в холодной среде.

Хайвуд и др. [447], привели доказательства тому, что Млечный Путь пережил существенную остановку звездообразования в конце формирования толстого диска ~ 9 млрд лет назад. Следы этого события «отпечатаны» в содержании элементов в звездах, изученных в окрестности Солнца (см. рис. 10 на цветной вкладке). Исследования, основанные на данных APOGEE, показывают, что менее чем за ~ 2 млрд (от 10 до 8 млрд лет назад) скорость звездообразования в нашей Галактике упала на порядок величины. Из-за сильной корреляции, которая существует между возрастом звезд и содержанием α -элементов, общее прекращение активности звездообразования отражается в недостатке звезд диска на зависимостях $[\alpha/\text{Fe}]$ - $[\text{Fe}/\text{H}]$. До этого этапа, который длился около 1.5 млрд лет, в Млечном Пути было активное звездообразование. Затем, чтобы сформировать тонкий диск, звездообразование возобновилось на более низком уровне. Такие события, наблюдаемые в нашей Галактике, полностью соответствуют самым последним наблюдениям прародителей галактик типа Млечного Пути на больших красных смещениях. Результаты показывают, что в Млечном Пути «отключение» произошло на более коротком интервале времени, в то время как химическая непрерывность между звездными популяциями, сформированными до и после остановки, указывает на исчерпание газа, который был ответственным за прекращение формирования звезд. Анализ новых данных показывает, что это происходит в галактиках, подобных Млечному Пути, где классический балдж считается малым или вообще отсутствует, возможно, вследствие морфологического перехода от толстых к тонким дискам. В качестве классического балджа рассматривается галактическая структура, образованная в результате событий слияния/слипания на ранних галактических временах. Учитывая демографию галактик позднего типа в локальной Вселенной, в которой класси-

ческие балджи встречаются редко, далее предполагается, что остановка может быть непосредственным следствием формирования толстого диска, в то время как резкое охлаждение может быть связано с развитием сфероидов в более массивных галактиках. Авторы подчеркивают, что фаза остановки в Млечном Пути может быть современной и связанной с формированием бара, в конце фазы толстого диска. Рассмотрен сценарий сильного бара, который может препятствовать звездообразованию.

2.2. Выделенные структуры диска

2.2.1. Большой спиральный узор

Спиральная структура нашей Галактики Млечный Путь недостаточно изучена, несмотря на огромные усилия исследователей, а многие фундаментальные положения о структуре Млечного Пути все еще не определены. К ним относятся: сколько спиральных рукавов на самом деле и почему в оптическом и в радиодиапазоне астрономы видят разное их количество?, каково точное расположение этих рукавов?, какова природа структуры межрукавного пространства – это хорошо определяемые отроги («шпury») или перемычкоподобные структуры? И есть ли еще смысл описывать Млечный Путь как «Большой спиральный узор», и является ли он плодотворным для подсчета числа спиральных ветвей? Стоит ли использовать такие термины, как «логарифмическая спираль», «шпора (шпур), *spur*», «перо» или «угол наклона», чтобы структурировать то, природа чего еще не известна? Проще говоря, спиральная структура Млечного Пути далеко не определена, и понимание истинной структуры продолжает ускользать от нас, в основном из-за того, что мы находимся внутри Галактики, внутри того, что хотим обрисовать.

В Галактике, по данным наблюдений (если следовать разным работам и разным индикаторам), прослеживается довольно много спиральных рукавов (или ветвей): рукав Лебедя (*Cygnus*), рукав Ориона (*Orion*), рукав Персея (*Perseus*), рукав Стрельца (*Sagittarius*), рукав Центавра (*Centaurus*) и др. (рис. 11 на цветной вкладке). Их названия обусловлены местоположением на небесной сфере в соответствующих созвездиях. Солнечная система расположена примерно посередине между рукавом Персея и рукавом Стрельца, на расстоянии около 7 тысяч св. лет от каждого, возможно, в небольшом локальном рукаве. Измерения расстояний в радиодиапазоне с помощью радиointерферометра VLBA (*Very Long Baseline Array*, состоит из десяти радиотескопов) и обзора BeSSeL, для восьми областей звездообразования вблизи Локального спирального рукава Млечного Пути [276; 393], показали, что этот рукав представляет собой не небольшой отросток

(шпора) рукава Стрельца, а может быть крупным притоком рукава Персея (и находится немного ближе к рукаву Персея) или даже самостоятельным большим витком спирали нашей Галактики и имеет аналогичные кинематические свойства, определенные для других основных спиральных рукавов. В сторону созвездия Лебедя Локальный рукав распространяется на большее расстояние (в четыре раза) вдоль луча зрения и примерно вдоль солнечной орбиты, чем показывали расчеты, проведенные ранее. Обнаружена также «шпора» между Локальным рукавом и рукавом Стрельца.

Вид спиральных ветвей хорошо описывается выражением для логарифмической спирали, важным является определение направления закручивания спиральных ветвей. Для нашей Галактики предполагается, что спирали являются закручивающимися; последнее установлено по направлению среднего градиента возраста объектов, индикаторов спирального узора. Аналогичная картина показана в расчетах приливного характера спиралей, образованных в результате взаимодействия со спутниками или другими галактиками, проходящими мимо [344].

На первый взгляд может показаться, что спиральный узор галактик вызван их дифференциальным вращением. Однако главное возражение – это долгоживучесть спиральных рукавов на протяжении многих оборотов Галактики, несмотря на разрушающее действие дифференциального галактического вращения. На данный момент все больше сторонников того, что спиральные ветви – это волны плотности, образовавшиеся в ходе развития возникших неустойчивостей в диске. Идея о спиральных волнах плотности, предложенная шведским астрономом Бертилем Линдбладом в 20-х годах XX века, не получила развития из-за сложности построения и положения о лидирующих спиральных волнах. В настоящее время считается, что они «волочатся», отстают. То, что спиральные ветви могут существовать как результат твердотельного вращения спиральных волн, распространяющихся в тонком дифференциально вращающемся диске Галактики, состоящем из звезд и газа, показали Ци-Цзяо Лин и Франк Ши (1964) [203]. В случае учета вклада в динамику волн плотности не только дисковой, но и других подсистем Галактики, длинноволновая мода является наиболее вероятной и имеет скорость вращения спирального узора около 21 км/с кпк [464]. Спиральные рукава Галактики вращаются как единое целое, с одной и той же угловой скоростью. На определенном удалении от центра Галактики скорость вращения рукавов практически совпадает со скоростью вращения вещества диска галактики. Зона, в которой наблюдается совпадение угловых скоростей, представляет собой узкое кольцо, вернее тор радиусом порядка 250 пк. Такая кольцеобразная область вокруг центра Галак-

тики получила название зоны коротации (совместного вращения). Резонанс коротации диска Галактики, где звезды и газ вращаются с одинаковой скоростью спирального узора, расположен близко к солнечной орбите и имеет важные последствия для локальной динамики Галактики. Некий островок стабильности устанавливается между соседними основными спиральными рукавами, Киля – Стрельца (*Carina – Sagittarius*) и Персея (*Perseus*). Эта зона совпадает с Локальным рукавом. Используя положение и скорости мазеров в качестве начальных условий для интеграции их орбит, показано, что большинство из этих объектов оказались в ловушке в зоне стабильности и не могут уйти от нее. Это означает, что Солнце также «попало» в эту зону стабильности. С другой стороны, можно считать, что Солнце находится в привилегированном положении и, возможно, никогда не покидает свое галактическое место, двигаясь вместе с Галактикой.

Обратимся к результатам, полученным авторами по различным индикаторам спирального узора. Дельфина Русель [330] на основе каталога комплексов звездообразования, которые отождествлены как совокупность HII областей, диффузного ионизованного газа, молекулярных облаков и звезд ОБ, определила остаточные скорости и кинематическое расстояние для каждого комплекса. Интерпретация распределения комплексов в терминах спиральной структуры путем подгонки моделей с двумя, тремя и четырьмя логарифмическими спиральными рукавами показала, что модель с четырьмя рукавами представляется наиболее подходящей для описания Большого спирального узора Галактики. В этой модели рукав Наугольник (*Norma*) и внешний рукав проявляются как две части одного рукава под названием Наугольник – Лебедь (*Norma – Cygnus*) рукав.

Васкес и др. [362], используя оптические наблюдения молодых РС в сочетании с радионаблюдениями молекулярных облаков CO, проследили спиральную структуру в третьем квадранте Галактики. В частности они классифицируют внешний рукав Лебеда (*Cygnus*) как большой спиральный рукав, который хорошо прослеживается как звездами, так и CO облаками. В то же время Майесс и др. [218] предположили, что молодые РС (возраст < 10 млн лет) и долгопериодические классические цефеиды (с характерным возрастом 40 ÷ 80 млн лет) все еще достаточно молодые и не отдалены заметно от мест их рождения внутри спиральных рукавов, что делает их надежными индикаторами спиралей. Авторы [218] подтверждают, что Стрелец – Киль (*Sagittarius – Carina*) является главным спиральным рукавом, и обращают внимание на наличие другой спиральной особенности, сосредоточенной в Лебедь – Лисички (*Cygnus – Vulpecula*) области. И, наконец, Карраро с коллегами [67] и Камарго и др. [65], используя UBVl

фотометрию молодых звезд и изображения вложенных скоплений (*embedded clusters*), полученные на WISE (*Wide-Field Infrared Survey Explorer*) инфракрасном космическом телескопе НАСА, прослеживают основные сегменты спирали. В первом случае две из трех главных групп молодых звезд находятся в пределах основных спиральных рукавов Киль – Стрельца (*Carina – Sagittarius*) и Щита – Южного Креста (*Scutum – Crux*). Во втором случае анализ распределения вложенных скоплений обнаруживает их предпочтительное расположение в пределах тонкого диска и вдоль спиральных рукавов, трассирующих ветви (рукава) Стрелец–Киль, Персей и внешние рукава.

Вследствие значительного сжатия газа в галактической ударной волне она является важным пусковым механизмом процесса звездообразования. Именно этим объясняется сосредоточение молодых и короткоживущих объектов в спиральных ветвях. Так как спиральная волна при своем движении по диску вызывает активное звездообразование и оставляет за собой звезды и скопления, возникает градиент возраста звездных объектов поперек спиральных ветвей. Обнаружение такого градиента может быть свидетельством в пользу того или иного предположения или гипотезы механизмов звездообразования. Косвенно это подтверждается тем, что молодые и старые объекты спиральных ветвей показывают смещение по галактоцентрическому углу [468]. Наличие такого градиента может также обуславливать различие, получаемое по разным индикаторам спиралей.

Благодаря значительному количеству спектроскопических исследований, лучевые скорости известны для большей части молекул, атомов и ионизованного газа Галактики. Наблюдения массивных областей звездообразования предоставляют кинематические данные и информацию о расстояниях для газа высокой плотности. Такие индикаторы, как CO [97, 107] или HI [345] обеспечивают лучшие ограничения на общую анатомию (структуру) Галактики. А измерения тригонометрических параллаксов и собственных движений мазеров (CH_3OH и OH) из обзора BeSSeL дают точные места для многих сегментов спиральных рукавов, вместе с соответствующими углами наклона [425].

Важным этапом исследования спиралей Галактики в последнее время является численное моделирование путем задачи N-тел эволюции галактического диска – возможное возникновение бароподобных возмущений в центральной области диска и появление спиральных ветвей. В работе Анатолия Засова [457] была показана возможность возникновения четырехрукавной спиральной структуры и ее эволюция во времени в плоских дифференциально вращающихся звездных системах. Другой сценарий из современных разработок предполагает, что спиральные ветви обусловлены приливными взаимодействиями с другим телом, например, с галактикой аналогично-

го размера. Эта идея впервые изучалась Эриком Холмбергом (1940–1941 гг.) [166; 167]. Более поздние исследования [271] поддерживали гипотезу, что приливные взаимодействия создают в основном картину двухрукавной спиральной структуры (как это наблюдается, например, в галактике M51). Формирование Большого спирального узора рукавов в галактике может быть вызвано приливным взаимодействием с темной материей гало размера скопления.

Используя распределения наблюдаемой плотности газа и звезд в диске галактики Млечный Путь, вместе с кривой вращения диска, и измеренные дисперсии скоростей дисков Владимир Корчагин построил бесстолкновительные и комбинированные бесстолкновительно-газовые модели равновесных дисков Млечного Пути. Показано, что только бесстолкновительный диск неустойчив к образованию центрального бара. Всего лишь 10% примеси газа достаточно, чтобы привести к развитию трех компонентов (рукавов) спиральной структуры в звездном диске, а также к нескольким рукавам спирального узора в газовом диске. Для развития трехрукавного спирального узора в звездном диске требуется около 3 млрд лет. Численное моделирование с учетом темной материи гало показывает, что при этом темп роста спирального узора увеличивается примерно на 10%, а время его жизни и динамика возмущений плотности спиральных рукавов существенно не меняется.

Наличие спиральных ветвей играет важную роль в космологических симуляциях гало галактик, рассматривающих не идеальные начальные условия, а учитывающие дополнительные эффекты воздействия. Гранд и др. [152], изучая динамическое влияние спиральных рукавов на наблюдаемые особенности скоростей и металличностей и основываясь на самосогласованном космологическом моделировании, включающем широкий спектр физики образования галактик, показали систематическую радиальную миграцию звезд вокруг спиральных рукавов. Это означает, что природа спиральных ветвей преходящая, временная, а «намотка» плотности спиралей часто представлена именно в идеализированном моделировании N-тел.

В то же время обнаружена группа звезд за пределами орбиты Солнечной системы, которые движутся с высокой скоростью вокруг центра Млечного Пути по сравнению со скоростью звезд во внутренней части солнечного радиуса R_0 [172]. Скорость быстро вращающейся группы не зависит от галактоцентрического расстояния до $R-R_0 \sim 0.6$ кпк. Сравнение с численными моделями показало, что возможной причиной избыточного ускорения, полученного этими звездами (высокой скорости), является совместный резонанс с вращением спирального рукава Персея. Т. е. это может быть связано с гравитационным воздействием одного из главных спиральных рукавов галактики Млечный Путь – рукава Персея. Это объяснение, в свою очередь, может быть обосновано од-

ним из двух различных модельных представлений о природе спирального рукава Персея. Согласно первой модели спиральный рукав движется через галактический диск как волна с постоянной скоростью, а вторая модель предполагает, что движение спирального рукава происходит с той же скоростью, что и движение этих звезд. Полученные результаты не дают однозначного ответа в пользу одного из этих сценариев, но лучше согласуются со второй из этих моделей.

2.2.2. «Кости» Галактики

Для детализации структуры Млечного Пути Алиса Гудман с коллегами [376] предположили, что потенциально для этого могут быть использованы чрезвычайно вытянутые нитевидные инфракрасные темные облака (*Infrared Dark Clouds*, IRDCs), называемые «кости». Гудман и др. [376], опираясь на зондирования густого плотного газа на галактических масштабах, представили расширенную версию IRDC под названием «Несси» (обнаружено Джексон и др. [373]) в качестве первой «кости» Млечного Пути. Они обнаружили, что «Несси» имеет, по крайней мере, 3° (~ 160 пк) в ширину и, возможно, 8° (~ 430 пк) в длину и лежит очень близко к геометрической средней плоскости Млечного Пути, на расстоянии 3.1 кпк до ветви (рукава) Щита – Центавра (*Scutum – Centaurus*). До недавнего времени моделирование не имело достаточного пространственного разрешения, чтобы предсказать нити, такие узкие, как «кости». Но в 2014 году численное моделирование, выполненное [354] с использованием скользящего кода сетки AREPO (<http://www.h-its.org/tap-images/arepo-visualizations/>), показало плотные нити с соотношением плотности сторон, похожим на «Несси», образующиеся внутри моделируемой спиральной галактики. Подробный анализ свойств «Несси», наряду с этими новыми результатами моделирования, прогнозирует, что «Несси» может быть первой в классе объектов, которые дали бы возможность проследить в нашей Галактике особенности спиральных плотных образований [376]. Отрадно осознавать, что найден, возможно, самый простой объект в этом роде. «Несси» находится в ближайшей крупной спиральной ветви к Солнцу, перпендикулярной к лучу зрения, с небольшим смещением от центра Галактики. Такое расположение делает «Несси» четко видимой на ярком фоне центра Галактики, при этом более вытянутой, чем объекты значительно отдаленные. Итак, эти «кости» представляют собой длинные и плотные нити из холодного космического газа и до последнего времени ученым было известно всего о девяти таких образованиях. Однако новый метод анализа (обычно используемый для расчетов оптимизированных сетей трубопроводов и дорог), через который были «просеяны» данные, собранные в ходе наблюдений на 10-метровом

субмиллиметровом телескопе обсерватории Калифорнийского технологического института (*Caltech Submillimetre Observatory*), телескопах обсерватории в Аризоне (*Arizona Radio Observatory*) и космическими телескопами «Спитцер» и WISE, позволил обнаружить еще 45 газовых нитей, что позволило построить относительно подробную картину «скелета» Млечного Пути. В ходе анализа данных этот алгоритм определяет все точки в Галактике, где присутствует холодный газ определенной плотности. Затем алгоритм соединяет между собой точки, руководствуясь рядом определенных критериев, которые описывают газовые нити. Каждая из обнаруженных нитей имеет уникальную форму. Длина обнаруженных газовых нитей колеблется в диапазоне от 32 до 900 св. лет, и они окружены слоем газа, пыли и звезд. Обнаруженный «скелет» покрывает собой практически всю плоскость нашей Галактики, а значительное скопление этих образований наблюдается в центральных областях ее спиральных рукавов [460]. На рис. 12 на цветной вкладке приведен пример для нити (8).

2.2.3. Кольцо Единорога

Так называемое Кольцо Единорога было обнаружено в 2002 году в процессе анализа изображений Слоановского цифрового обзора неба (SDSS – *Sloan Digital Sky Survey*). Проект назван в честь фонда Альфреда Слоуна. В 2006 году, основываясь на данных 2MASS (*Two Micron All Sky Survey*), исследователи предположили, что кольцо является частью искривленного галактического диска Млечного Пути. Однако существует мнение, что данная структура имеет внегалактическое происхождение.

Эрик Моргансон с коллегами [221] построили карту Кольца Единорога (рис. 13 на цветной вкладке). Это образование является огромной и сложной звездной подструктурой во внешнем диске Млечного Пути. Кольцо Единорога значительно ближе к нам на юге (6 клк), чем на севере (9 клк). Северная и южная структуры представляют собой примерно концентрические круги и, предположительно, они могут быть волнами «ряби» общего происхождения. Если предположить (достаточно смело), что Кольцо Единорога представляет собой два галактоцентрических кольца, то его общая масса составляет $6 \cdot 10^7 M_{\odot}$. В том случае, если оно является набором из двух окружностей с центром в точке 4 клк от центра Галактики в направлении на антицентр, как следует из данных Моргансона и др. [221], то его масса несколько меньше и равна $4 \cdot 10^7 M_{\odot}$.

Факундо Гомес с коллегами [2] исследовали вертикальную структуру звездного диска, полученную в результате полного космологического гидродинамического моделирования формирования галактики, подобной Млечному Пути, с высоким разрешением. По их данным, на средней высоте рассматриваемого диска виден хорошо оп-

ределяемый некий большой узор, с амплитудой около 3 кпк в его внешних областях. Эта картина является результатом взаимодействия «спутник – гало-диск» и качественно воспроизводит многие из наблюдаемых свойств Кольца Единорога. В частности обнаружено вещество диска на галактоцентрическом расстоянии Кольца Единорога ($R \sim 12\text{--}16$ кпк), простирающееся намного выше средней плоскости (30° , $\langle Z \rangle \sim 1\text{--}2$ кпк) в обоих полушариях, а также четко определенные арки вещества диска на гелиоцентрических расстояниях ≥ 5 кпк. Структура впервые образовалась ≈ 3 млрд лет назад и впоследствии превратилась в ведущую ветвь спирального узора. Интересно отметить, что основной причиной этого возмущения является встреча-столкновение с маломассивным низкоскоростным объектом. Спутник имеет общую массу $\sim 5\%$ от галактики-хозяина, перигалактическое расстояние и перигалактическую скорость около 80 кпк и 215 км/с соответственно. Спутник недостаточно массивный, чтобы непосредственно возмущать галактический диск, но поле плотности темной материи гало Галактики реагирует на это взаимодействие и приводит к большому усилению пертурбативных возмущающих эффектов. Это впоследствии приводит к возникновению и развитию особенности, подобной Кольцу Единорога. В работе [83] показано, что такие наблюдаемые сложные звездные компоненты могут возникнуть вследствие столкновений звезд диска с подструктурами холодного темного гало (CMD, *cold dark matter*). Эти результаты свидетельствуют о значительной роли подструктуры ХТГ в создании структуры дисковых галактик и дальнейшей их эволюции.

Механизм формирования деформации (искривления диска) Млечного Пути продолжает оставаться предметом исследований. Данные по нейтральному водороду HI [104] говорят о существовании искривления диска, которое накладывает ограничение на время его жизни (временную шкалу), при этом звезды не следуют поведению газа. Искривление может быть обусловлено взаимодействием между диском и близкими галактиками, например, Магеллановыми Облаками, или притоком межгалактического газа. Одно из возможных кинематических свидетельств «перекоса» галактической плоскости основано на отборе и анализе отдаленных далеких звезд спектральных классов O и B, опираясь на новые данные каталога Gaia DR1 [136]. Действительно, собственные движения таких звезд, как ожидается, должны отражаться на долгоживущем перекосе в вертикальной составляющей, который усиливается к галактической окраине. Путем сравнения с моделированием найдено, что наличие искривления, индуцированного вертикальными движениями таких звезд, является более вероятным ($\sim 3:1$) по сравнению с моделированием без учета движения этих звезд [301].

Рукава Млечного Пути очерчены различными объектами, они и состоят из различных объектов. Эти объекты представляют собой, в частности, области ионизованного водорода (HII-области), пыль, голубые и, в меньшей степени, красные и ОВ-звезды, цефеиды, пульсары, молодые и очень молодые (вложенные) РС, звездные ассоциации и гигантские молекулярные облака. Практически все эти объекты связывают спиральную структуру с газо-пылевым диском и процессами звездообразования.

Согласно современным исследованиям спиральной структуры Млечного Пути количество рукавов и их расположение зависят от объектов, которые мы выбираем в качестве индикаторов. Но можно с большой долей достоверности указать на существование рукавов Персея, Лебеда и Киля – Стрельца. При этом все еще представляют важными такие термины, как «логарифмическая спираль», шпур, «угол наклона» для изучения Большого спирального узора. Количество рукавов, Большой спиральный узор, их происхождение и детализация тонкой структуры галактического диска по-прежнему остаются приоритетной задачей наблюдательной (на всех диапазонах электромагнитного излучения) и теоретической астрофизики.

2.3. Сферическая составляющая, гало Галактики

Гало Галактики представляет собой сферическое образование малой плотности, по-видимому, слегка сплюснутое по оси Z, перпендикулярной плоскости Галактики. Оно состоит из газа, звезд и темной материи. Полная масса звездного гало составляет приблизительно $10^9 M_{\odot}$, из которой около 1% приходится на шаровые скопления, а остальную часть составляют звезды поля. Гало разделяют, как минимум, на два компонента: собственное гало и аккрецированное гало. Следует отметить, что ни один из компонентов Галактики не имеет резких границ, включая гало, диск и балдж. Звездный диск заканчивается на периферии Галактики раньше, чем газовый (имеет меньший диаметр), при этом толщина газового диска увеличивается к периферии Галактики из-за уменьшения составляющей силы тяготения в направлении оси Z. Самой большой подсистемой по размерам оказывается аккрецированное гало, которое простирается примерно до 100 кпк. Аккрецированные объекты – звезды, ШС, горячий газ, первичный газ, высокоскоростные облака – делают «видимой» корону Галактики, образованную темной материей.

2.3.1. Шаровые скопления

Пониманием местоположения центра Галактики мы обязаны Харлоу Шепли. Как писал Х. Шепли в своей книге «Галактики» [472] (1942 г., перевод на русский 1947 г.): «Еще до 1920 года мне стало ясно, что

перепись шаровых скоплений в основном закончена и что поэтому их пора изучать как единую систему скоплений. Шаровые скопления, в противоположность рассеянным, находятся не во всех галактических долготах, а резко концентрируются в созвездиях Скорпиона, Стрельца и Змееносца. Анализируя положение сотни шаровых скоплений, я нашел, что центр их системы находится на среднем круге Млечного Пути, вблизи того места, где сходятся границы трех названных созвездий. Его прямое восхождение $\alpha = 17^{\text{h}} 30^{\text{m}}$, склонение $\delta = -30^\circ$ (современные значения его координат – $\alpha = 17^{\text{h}} 42^{\text{m}}$ и $\delta = -29^\circ$ мало отличаются от этого). Тогда я сделал несколько смелое гипотетическое предположение, которое потом многие исследования звезд и галактик перевели из класса гипотез в класс установленных наблюдением истин. Вот суть этого предположения. Система шаровых скоплений является своего рода скелетом тела всей Галактики, так что пространственное расположение сотни шаровых скоплений показывает расположение миллиардов остальных звезд Галактики. Отсюда и следовал вывод, что центр нашей звездной системы лежит в направлении созвездия Стрельца. Следствием этих наблюдений и заключений явился пересмотр представлений о нашем собственном положении в Галактике. Теперь Солнце нельзя больше считать расположенным в центре нашей звездной системы, оно отодвинулось на несколько десятков тысяч световых лет от галактического ядра». Однако Гебер Кертис с ним был не согласен, он настаивал на том, что Солнце находится в центре нашей звездной системы. Их «Большая дискуссия» (1920 г.) касалась и вопросов расстояний и того, что представляют собой туманности – далекие звездные острова (Кертис) или образования внутри нашей Галактики (Шепли). В данном случае ошибся Шепли, хотя впоследствии очень много занимался галактиками.

На диаграмме ГР типичного шарового скопления M3 (рис. 13 на цветной вкладке) непосредственно от главной последовательности, населенной звездами-субкарликами, начинается последовательность субгигантов, то есть звезд, в которых выгорание водорода в ядерных реакциях приводит к перестройке их структуры и изменению параметров, таких как светимость и температура. К еще более поздним эволюционным стадиям относятся последовательность красных гигантов и горизонтальная ветвь, в разрыв которой попадают переменные звезды.

История шаровых скоплений начинается в телескопическую эпоху, когда во второй половине XVII столетия Абрахам Ил (1665) обнаружил в созвездии Стрельца диффузный объект, впоследствии получивший название M22. Спустя несколько лет Эдмунд Галлей обратил внимание на странный вид звезды ω Центавра (1677) и диффузное пятнышко в созвездии Геркулеса, впоследствии объект M13 (1714). Но прошло более ста лет, прежде чем Шарль Мессье в 1764 году начал систематические

поиски туманных объектов, дабы не путать их с предметом его интереса – кометами, и в 1771 году опубликовал свой знаменитый «Каталог туманностей и звездных скоплений», куда вошли подобные объекты.

Многие шаровые скопления до сих пор носят имя по порядковому номеру этого каталога. Несмотря на то, что в названии каталога Шарля Мессье входит словосочетание «скопления звезд», Шарль Мессье описывал M13, например, как круглый объект с ярким ядром, а уже Вильям Гершель с более мощным телескопом увидел скопления (рассеянные и шаровые), разрешенными на звезды, и в течение 20 лет после выхода «Каталога...» открыл свыше 2500 туманностей и скоплений. К концу XVIII столетия было обнаружено около 70 шаровых скоплений. Затем Джеймс Данлоп (1828) пополнил список за счет Южного полушария, где открыл 629 объектов, но только треть из них в действительности существовала. «По-видимому, Данлоп хотел видеть больше, чем мог. Это вечная беда и печаль астрономов», – так работы Данлопа прокомментировал П.Н.Холопов в книге «Звездные скопления» [469]. К настоящему времени известно более 150 шаровых скоплений в Галактике, а их может быть более 200. Шаровое звездное скопление в отличие от рассеянного скопления имеет большее количество звезд и четко очерченную симметричную форму с увеличением концентрации звезд к центру скопления. Количество звезд в шаровом скоплении $\sim 10^4 - 10^6$, диаметры шаровых скоплений составляют $20 \div 60$ пк, массы – $10^4 \div 10^6 M_{\odot}$. Шаровые скопления являются коллективными членами нашей Галактики и входят в ее сферическую подсистему: они обращаются вокруг центра масс Галактики по сильно вытянутым орбитам со скоростями ~ 200 км/с и периодом обращения $10^8 - 10^9$ лет [21]. Возраст шаровых скоплений приближается к возрасту Галактики, что подтверждается их диаграммами Герцшпрунга – Рассела, содержащими характерный обрыв главной последовательности с голубой стороны (Точку Поворота), указывающий на переход массивных звезд – членов скопления в стадию красных гигантов.

Шаровые звездные скопления первоначально были выделены по характерному внешнему виду [426]. Однако сейчас скопления относят к шаровым не по внешнему виду, а по звездному составу, то есть по характерному виду диаграммы Герцшпрунга – Рассела (см. рис. 14 на цветной вкладке). В силу общего происхождения звезд одного ШС можно считать, что звезды скопления имеют, как правило, примерно одинаковый возраст и одинаковое содержание ряда элементов, прежде всего элементов железного пика. В атмосферах звезд большинства ШС содержание тяжелых элементов понижено по сравнению с солнечным (в отдельных случаях > 100 раз). Различия в светимости скоплений оказываются связанными с различиями в массе звезд, которая и определяет их путь эволюции. Только два скопления M22 и ω Центавра показывают

заметные отличия в содержании металлов [380]. Однако исследования последних лет показали наличие нескольких типов ШС, различающихся содержанием элементов, прежде всего кислорода, азота, натрия, магния, алюминия [282; 307; 308; 8; 115]. Это может быть связано как с самообогащением вещества скоплений продуктами проэволюционировавших звезд (горячие сверхгиганты, звезды АВГ и даже сверхновые I типа), так и с обогащением облака протоскопления.

Рено и др. [320] использовали моделирование Млечного Пути как галактики для изучения формирования и эволюции звездных скоплений, в частности происхождения бимодальности, наблюдаемой в цвете и металличности ШС. Полученные результаты подтверждают предыдущие выводы о том, что синие, малометаллические или бедные металлами скопления формируются в галактиках-спутниках, которые были «аккрецированы» – захвачены Млечным Путем, а красные, богатые металлами скопления формируются в основном в Галактике, или, в меньшей степени, при слиянии массивных галактик с Млечным Путем. Путем мониторинга приливных полей этих популяций найдено, что скопления, образованные в Галактике (как правило, с высокой центральной концентрацией), подвержены значительно более сильному приливному воздействию, чем аккрецированные, как на современном этапе существования, так на протяжении всей эволюции. Таким приливным потоком в Млечном Пути является недавно обнаруженный звездный поток Змееносца. Поток проходит на расстоянии от 7.5 до 9 кпк от Солнца, его возраст оценивается в 12 млрд лет, а его начальная масса была $\sim 2 \cdot 10^4 M_{\odot}$. Он имеет орбитальный период ~ 350 млн лет и находится на довольно вытянутой орбите ($e \sim 0.66$) с перигальным ~ 3.5 кпк и апогальным ~ 17 кпк. Структура фазового пространства и звездное население потока показывают, что его предшественником должно было быть шаровое скопление, которое было разрушено всего лишь ~ 240 млн лет назад [395].

В исследовании Купера и др. [148] показано, что звездные потоки, появившиеся в результате распада ШС, могут быть использованы для измерения веса нашей Галактики и определения местоположения Солнца в Млечном Пути. Используя данные SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*, англ. – «Слоуновский цифровой небесный обзор») и опубликованные лучевые скорости, авторы нашли, что расстояние от Солнца до центра Галактики $R_0 = 8.30 \pm 0.25$ кпк, а скорость вращения $V_{\text{вр}} = 253 \pm 16$ км/с. Обе оценки хорошо согласуются с независимыми измерениями этих двух величин. Опираясь на стандартную модель диска и балджа, полученная масса Галактики (в пределах апогалактического радиуса 19 кпк) равна $2.1 \pm 0.4 \cdot 10^{11} M_{\odot}$. Т. о. моделирование потоков шаровых скоплений является эффективным способом исследования структуры нашей Галактики с высокой точностью.

2.3.2. История исследования химического состава шаровых скоплений

На примере изучения химического состава звезд ШС рассмотрим исторический аспект спектрального исследования звезд.

Уильям Хеггинс (1824-1910) одним из первых оценил значение открытого Густавом Робертом Кирхгофом и Робертом Вильямом Бунзеном в 1859 г. метода спектрального анализа для изучения небесных тел. Первые спектры планетарных туманностей и звездных скоплений были получены Хеггинсом в 1864 г. [171] спустя почти сто лет после выхода каталога Мессье [232]. Хеггинс впервые получил и исследовал спектры газовых туманностей, состоящие из отдельных линий излучения. И первой туманностью, спектр которой он получил, была планетарная туманность «Кошачий глаз» (см. рис. 5б на цветной вкладке). Наблюдения он проводил на 20-см телескопе-рефракторе со спектроскопом собственной конструкции. Уильям Хеггинс установил сходство спектров многих звезд со спектром Солнца, исследуя область длин волн от λ 4870 до λ 3300 Å [170]. Практически в одно и то же время с Хеггинсом, в 1863-1868 гг. итальянский астрофизик Анджело Секки (1818-1878) изучил спектры 4 тыс. звезд и создал первую классификацию звездных спектров, сначала разделив их на четыре класса, затем добавил пятый. В середине XX века классификация Анджело Секки была заменена Гарвардской классификацией, отражающей, прежде всего, зависимость вида спектра от температуры, а затем и Йеркской (*Yerkes Spectral Atlas*), учитывающей светимость звезды. Американский любитель астрономии Генри Дрэпер в 1872 г. получил первую фотографию спектра звезды Веги, а в дальнейшем – спектры ярких звезд, Луны, планет, комет и туманностей. Спектральные исследования ШС проводились как по их интегральным (составным) спектрам, так и по спектрам отдельных звезд. Анализ составных спектров ШС впервые был проведен Эдвардом Артуром Фатом [121]. Сначала в 1911 году на 36" рефлексоре Кроссли Ликской обсерватории (Маунт-Гамилтон), по спектрам с дисперсией 430 Å/mm, длительность экспозиции равнялась 13–16 часам. Затем в работах, выполненных на 60" рефлексоре обсерватории Маунт-Вилсон, Фат показал [122], что в спектрах скоплений M53, M13, NGC 6229, M92, M22, NGC 6934, M15 доминируют линии водорода серии Бальмера и H и K CaII, спектры всех скоплений аппроксимируются спектром спектрального класса F. Звезды шаровых скоплений, меняющие свой блеск, «анормальные», прежде всего обратили на себя внимание астрономов. Эдвард Эмерсон Барнард [30] и Эдуард Чарлз Пикеринг [295] были первыми открывателями большого числа переменных звезд в ШС. Это оказались ко-

роткопериодические пульсирующие переменные звезды типа RR Lyr. Они сыграли выдающуюся роль в исследовании Галактики. В 1918 г. Харлоу Шепли, приняв правильное толкование асимметрии распределения ШС относительно Солнца и используя звезды типа RR Lyr как индикаторы расстояния ШС, определил место галактического центра и положение Солнечной системы в Галактике [472].

Первые спектры звезд в ШС были получены в 1913–1914 гг. Френсисом Гледхеймом Пизом [292] в области длин волн λ 3900 ÷ 5000 Å для звезд скопления М13 на спектрографе с узкой щелью, установленном на 60" рефлекторе обсерватории Маунт-Вилсон. Экспозиции были еще более длительными, чем при получении спектров скоплений и составляли 21–22 часа. Спектры 19 звезд скопления М13 укладывались в довольно правильную последовательность спектральных классов Sp от A0 до G0. Первые определения лучевой скорости звезд ШС выполнены Весто (Мелвиллом) Слайфером [352] в 1918 г. Бертил Линдبلاد в 1922 г. первым отметил ослабление линий полос молекулы циана CN λ 4215 в спектрах звезд ШС (наблюдения на обсерватории Маунт-Вилсон, 60" рефлектор) [206]. В дальнейшем эта особенность спектров сыграла важную роль в исследовании химического состава ШС. Он также заметил, что звезды ШС принадлежат к той же группе галактического населения, что и высокоскоростные звезды. В 1946 г. Майал [229] по спектрам с дисперсией 430 Å/mm (36" рефлектор Кроссли) обнаружил различие составных спектров ШС в пределах спектральных классов A5–G5 и обратил внимание, что ослабление Ca II K линии и линии стронция Sr II напоминает спектры звезд с ослабленными линиями в солнечной окрестности. Обнаружение Вильямом (Алвином) Баумом [33] в 1952 году экстремально слабых линий металлов в скоплениях М92 и М3 и отличия спектров звезд ШС и звезд поля солнечной металличности можно считать первым серьезным указанием на пониженное содержание металлов в звездах ШС, полученное по спектрам с умеренной дисперсией 38 Å/mm (200" телескоп обсерватории Маунт-Паломар). Эти первые исследования выявили схожесть спектров звезд ШС и звезд поля с ослабленными линиями в спектрах и высокими пространственными скоростями, т. е. со звездами с дефицитом металлов. Дальнейшие количественные оценки химического состава звезд ШС и звезд поля с дефицитом металлов также сравнивались и сопоставлялись между собой.

Первой работой по количественной оценке содержания элементов в звездах с дефицитом металлов можно считать работу Мартина и Барбары Шварцшильдов [342]. Наблюдения для карликов спектрального класса F получены на 100" телескопе обсерватории Маунт-Вилсон, дисперсия 10 Å/mm, диапазон длин волн λ 4220 ÷ 4680 Å. Определено, что

отношение водорода к железу в 2 раза выше в высокоскоростных карликах по сравнению с содержанием в низкоскоростных карликах. На этом же телескопе Джозеф Чемберлен и Лоуренс Аллер [70] для звезд-субкарликов спектрального класса А обнаружили дефицит содержания кальция и железа. И только в 1956 г. Маргерит и Джеффри Бербиджи [58] определили содержание ряда элементов Mg, Al, Ca, Sc, Ti, Cr, Mn, Fe, Sr, Y, Zr, Ba у звезд с дефицитом металлов. В 1954 г. по спектрам, полученным на Паломарском телескопе, было показано, что звезды спектрального класса В скопления NGC 1647 имеют спектры, отличающиеся от спектров своих аналогов в поле [154]. Отмечено, что линии He I 4121, 4144 Å слабее у звезд ШС, а линии Si II 4128, 4132 Å усилены по сравнению со спектром звезды-стандарта χ Нуа.

Возможно, это первое упоминание о проблемах химического состава звезд горизонтальной ветви ГВ ШС. В 1959 г. Генри Хельфер, Джорж Валлерстейн и Джесси (Леонард) Гринштейн [162] выполнили первое определение содержания большого ряда элементов: Na, Mg, Ca, Sc, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, Sr, Y, Zr, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Eu в атмосферах звезд ШС; это были К-гиганты шаровых скоплений M13 и M 92. Спектры получены на Паломарском куде-спектрографе в области длин волн 4000 ÷ 4900 Å с дисперсией 17.8 и 9 Å/mm. Температура возбуждения определялась по отношению интенсивностей пар линий железа Fe I с различающимися потенциалами возбуждения нижнего уровня. Для определения содержаний элементов использовались кривые роста, представляющие собой зависимость эквивалентной ширины EW линии от количества атомов, участвующих в ее образовании (для сравнения использовались теоретические кривые роста Врубеля [452]).

Исследуя субкарлики и звезды-карлики спектрального класса F по фотометрическим наблюдениям (U, B, V-система Моргана – Джонсона) на 13" рефракторе обсерватории Мак-Доналд, Нэнси Роман [326] обнаружила, что ряд звезд-субкарликов поля по своей кинематике напоминают кинематику ШС и показывают заметный избыток в УФ. Тот факт, что в F-, G-, K-звездах поглощение в линиях элементов железного пика обуславливает вид УФ и синей части спектра (λ 3000 ÷ λ 5000 Å), определил развитие методов и использование многоцветной фотометрии и распределения энергии в спектрах отдельных звезд ШС для определения металличности и химического состава скоплений и звезд в скоплениях. Так, например, Сэндиджем [336; 337] был показан в фотометрической системе Моргана – Джонсона вертикальный сдвиг в цветах δ (U-B) на (B-V) = 0.6, который коррелирует с металличностью субкарликов $[\text{Fe}/\text{H}] = \lg A(\text{Fe}) - \lg A(\text{Fe})_{\odot}$, полученной ранее методом кривых роста, где $\lg A(\text{Fe})_{\odot}$ – содержание железа в звезде, а $\lg A(\text{Fe})$ – содержание железа на Солнце в шкале содержания водорода $\lg A(\text{H})$

= 12. Использование шестицветной фотометрии, системы Стебинса – Уитфорда и системы DDO [230] позволило исследовать содержание элементов группы CNO независимо от содержания элементов железного пика. Фотометрическая система C, M, T1, T2 была предложена Валлерстейном и Хельфером (1966) [438] специально для исследования K-гигантов и состояла из отдельно выбранных участков спектра, чувствительных к содержанию CNO и поглощению в линиях металлов. Изменения интенсивности полос окиси титана в области $7000 \text{ \AA}$ использовались для определения поокиснения и содержания металлов в высокометаллических ШС [241], вильнюсская фотометрическая система [458] – для интегральной фотометрии шаровых скоплений. Метод Сирля – Цина [343] использует распределения энергии в узких участках спектра ($160 \text{ \AA}$) и чувствительность УФ области спектра к поглощению в линиях металлов, но не зависит от межзвездного покраснения в отличие от фотометрических методов. В этой работе [343] получены новые фундаментальные данные формирования и эволюции Галактики, интерпретируемые как иерархическое слипание протофрагментов в отличие от модели Эггена и др. [111], описывающей формирование Галактики как однородный коллапс.

Особо следует упомянуть метод Престона [305] или δ метод, где $\delta S = 10\text{Sp(H)} - \text{Sp(CaII)}$ – различие в определении спектрального класса Sp по линиям водорода и линиям кальция. Метод предложен Престоном для звезд типа RR Lyr с использованием спектров умеренного ($10\div 20 \text{ \AA}$) разрешения. Метод основан на том, что в диапазоне спектральных классов A3–F5 и в соответствующем им диапазоне температур непрозрачность в континууме определяется поглощением на H^- и связано-свободными и свободно-свободными переходами водорода и зависит от содержания водорода. Интенсивность линий водорода зависит от температуры и не зависит от содержания металлов, в то время как интенсивность линий кальция зависит и от температуры, и от содержания кальция. На основе этого метода выполнено определение металличности большого числа звезд типа RR Lyr для 17 ШС [62]. Все перечисленные методы не являются прямыми методами определения металличности и требуют калибровок по спектрам высокого разрешения.

Особенности морфологии диаграммы «цвет C – звездная величина M_V » также были использованы для определения содержания металлов. Как показали исследования, увеличение металличности $[\text{Fe}/\text{H}]$ или массовой доли тяжелых элементов Z приводит к смещению Ветви Гигантов (ВГ) в красную сторону и искажению Горизонтальной Ветви (ГВ). Однако на морфологию диаграммы C – M_V влияют также содержание гелия и возраст скопления. И, тем не менее, был предложен ряд индикаторов, использующих особенности морфологии диа-

граммы, для определения металличности. Это: δV – высота ВГ над ГВ на $B-V = 1.40$ [336], не покрасневшее значение $(B-V)$ ВГ, соответствующее светимости ГВ, наклон ВГ относительно точки пересечения ГВ и ВГ [47]. Первые два зависят от покраснения, последний – не зависит, но теряет чувствительность при $[Fe/H] < -1.5$.

Завершая обзор классической эпохи исследования ШС, остановимся на работе Цина и Веста [459]. В ней определена металличность 121 ШС Галактики и 3 ШС в Малом Магеллановом Облаке. Для 60 шаровых скоплений использовались спектрограммы с дисперсией $121 \text{ \AA/mm}$ в диапазоне λ $3600\div 5700 \text{ \AA}$, полученные на 1 м Йельском рефлекторе в Сьерро Тололо. Для определения металличности использовались измеренные псевдоэквивалентные ширины линий H, Ca II K, G полосы и линий MgIb, а также не зависящий от покраснения фотометрический индекс Q39 (мера блокировки линий в области $3820\div 4100 \text{ \AA}$) и новые температурные калибровки. Авторами было установлено, что металличность ШС $[Fe/H]$ лежит в диапазоне от $+0.24$ до -2.58 . Определения для металличных ШС ($[Fe/H] \sim +0.2$), находящихся по направлению к центру Галактики, взяты из работы Малкана [219]. По определениям авторов самыми металличными скоплениями являются скопления NGC 5927, 6553, с металличностью $[Fe/H] \sim -0.3$, самое низкометаллическое скопление NGC 5053, его $[Fe/H] = -2.58$. Сравнение определений металличности скоплений с использованием различных методов показало заметный разброс в $[Fe/H]$, он равен $\pm 0.5 \text{ dex}$.

Существенной составляющей определения химического состава звезд по высокодисперсионным спектрам является определение и знание параметров атмосфер звезд, прежде всего эффективной температуры T_{eff} и ускорения силы тяжести на поверхности $\lg g$. В определении этих параметров для звезд ШС важную роль сыграли фотометрические методы, использующие калибровки различных показателей цвета [16], и их теоретическое обоснование [37], а в последнее время и такие методы, как метод ИК-поток. Анализ шкалы металличности, выполненный Робертом Беллом и Беном Густавссоном [36], привел к изменению шкалы в сторону большего дефицита высокометаллических ШС (от -0.3 до -0.7 dex) из-за неучета в вычислениях источников непрозрачности в УФ и синей области. Создание многослойных моделей атмосфер для звезд с дефицитом металлов [4] позволило активно применить метод расчета синтетического спектра для исследования спектров звезд с дефицитом металлов, а затем и для звезд ШС.

Современные актуальные вопросы исследования химического состава ШС касаются популяций разного возраста, связанных как с различием интенсивности молекулярных полос CN и CH, так и с наличием корреляций кислород – натрий и магний – алюминий. Это

может свидетельствовать либо о различной эффективности механизмов перемешивания как в звездах скоплений различной металличности, так и в звездах гало при всех металличностях, либо о различных схемах обогащения легкими элементами дозвездного вещества некоторых ШС и гало. Не исключается также возможность совместного действия упомянутых механизмов.

На основе исследования фундаментальных астрофизических параметров для 145 ШС Галактики [51], показано, что шаровые скопления делятся на две отдельные группы по металличности, с максимумами при $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.60 \pm 0.03 \text{ dex}$ и $-0.60 \pm 0.04 \text{ dex}$, и по строению горизонтальной ветви. При этом малометаллические скопления занимают в пространстве почти сферический объем, заметно концентрируясь к центру Галактики. Население металлических скоплений (подсистема толстого диска), обладая значительно меньшими размерами, концентрируется не только к центру, но и к плоскости Галактики. Оно имеет значительную скорость вращения ($V_{\text{вр}} = 165 \pm 28 \text{ км/с}$), очень большой отрицательный вертикальный градиент металличности при ничтожно малом радиальном градиенте, в среднем является самым молодым и состоит только из скоплений с экстремально красными горизонтальными ветвями. ШС сферической подсистемы являются неоднородными и, в свою очередь, делятся по крайней мере на две группы. Полученные результаты поддерживают предположение Цинна и Веста о том, что скопления молодого гало были захвачены из межгалактического пространства на более поздних стадиях эволюции. Подсистема скоплений с экстремально голубыми горизонтальными ветвями занимает в Галактике сфероидальный объем радиусом 9 кпк, имеет большую скорость вращения ($V_{\text{вр}} = 77 \pm 33 \text{ км/с}$), заметные и равные по величине отрицательные радиальный и вертикальный градиенты металличности и в среднем оказалась самой старой (подсистема старого гало). Подсистема скоплений с горизонтальными ветвями промежуточного типа занимает объем, близкий к сферическому с радиусом (для подавляющего большинства) $\sim 18 \text{ кпк}$ и слегка сжатый вдоль оси, перпендикулярной к Z и лежащей под углом $\sim 30^\circ$ к X -координате. В среднем несколько моложе скоплений «старого гало», подсистема молодого гало обнаруживает градиенты металличности примерно такие же, как и в старом гало, так что в результате на данном галактоцентрическом расстоянии и на данном расстоянии от галактической плоскости металличность скоплений молодого гало систематически на $\Delta[\text{Fe}/\text{H}] \sim 0.3 \text{ dex}$ выше. Подсистема молодого гало, состоящая, скорее всего, из скоплений, захваченных Галактикой в разное время, содержит большое количество скоплений с ретроградными орбитами и поэтому скорость ее вращения мала и определяется с большой ошибкой ($V_{\text{вр}} = -23 \pm 54 \text{ км/с}$).

Вентура и др. [116] исследовали формирование нескольких звездных популяций в ШС исходя из предположения, что звезды во втором поколении могут быть обогащены от ветров звезд АВГ промежуточных масс. Для этой цели использованы данные APOGEE, которые предоставляют содержание элементов для большой выборки звезд-гигантов, принадлежащих ШС в широком диапазоне металличности. Авторы полагают, что набор данных APOGEE исключительно подходит для обоснованного выбора среди различных сценариев «загрязнения», предложенных в настоящее время. Данные APOGEE дают возможность определить содержания Mg и Al, двух элементов, участвующих в ядерном синтезе, чрезвычайно чувствительном к температуре, следовательно, к металличности «загрязнителей». Проведенный анализ показывает полное согласие между наблюдениями и теоретическими выходами от массивных звезд АВГ. В частности наблюдаемое увеличение истощения Mg и O и увеличение содержания Al хорошо воспроизводится моделями и согласуется с трендами содержаний с металличностью. Это исследование еще раз подтверждает идею, что звезды АВГ были определяющими источниками в загрязнении среды в ШС, из которой впоследствии сформировались другие поколения звезд в ШС.

В работе [8] объяснено наличие нескольких типов населений, недавно обнаруженных в «прототипе» ШС – NGC 2808 в рамках сценария обогащения скопления продуктами эволюции звезд АВГ. Химический состав пяти или более населений приблизительно отражает последовательность событий звездообразования, начинающихся после эпохи обогащения сверхновыми II типа, продолжающихся пока эпизод третьего перемешивания не затронет эволюцию АВГ (возраст ~ 90–120 млн лет), а заканчивающихся, когда сверхновые типа Ia начинают взрываться в скоплении. Образование различных населений предполагает события звездообразования в МЗС, обогащенной продуктами эволюции звезд АВГ, разбавленной различным количеством чистого газа. В богатой азотом, нормальной по содержанию гелия популяции, идентифицированной в NGC 2808 по исследованию УФ излучения, увеличение содержания азота происходит вследствие третьего перемешивания и очень небольших выбросов массы вещества, обогащенного продуктами эволюции звезд АВГ, участвующих в звездообразовании этой популяции. Возможно, богатая железом небольшая популяция в NGC 2808 может быть результатом «загрязнения» одной сверхновой типа Ia.

Отметим также, что при исследовании химического состава звезд ШС важным является анализ точности определения содержаний. Возникновение ошибок возможно из-за неопределенностей параметров, влияния отклонений от локального термодинамического равновесия

(НЛТР) и применения (или неприменения) гидродинамических моделей (3D моделирование) [255]. Исследование НЛТР содержаний из Na, Mg и Ba в гигантах позднего типа, принадлежащих шаровым скоплениям M10 и M71, показали, что среднее значение отношения $[Na/Fe]$ в M10 равно $+0.3$ dex. Содержание $[Mg/Fe]$ в обоих скоплениях изменяется от $+0.15$ до $+0.28$ dex, а отношения $[Ba/Fe]$ – от -0.14 до $+0.09$ dex. Различия между НЛТР и ЛТР содержаниями в пределах ± 0.1 dex. А численное моделирование с CO⁵BOLD [351] гидродинамическим (3D) кодом звездной атмосферы позволяет исследовать влияние конвекции на формирование спектральных линий, используемых в данном НЛТР исследовании. Найдено, что для Na, Mg и Ba (3D – 1D) поправки (разница содержаний, полученных по гидродинамическим, трехмерным (3D), и одномерным (1D) моделям) в содержании ниже, чем 0.02 dex. Величина поправок заметно зависит от величины микротурбулентной скорости, используемой в 1D моделях [28].

2.3.3. Современный взгляд на химический состав звезд гало

Звезды поля гало, в отличие от звезд ШС, имеют более широкий диапазон металличности, который достигает значений $[Fe/H] = -6.0$ [17]. Это связано, прежде всего, с тем, что первые малометаллические ШС распались к настоящему времени и цепочки звезд-остатков ШС, наблюдаемых в Галактике, свидетельствуют об этом.

Распространенность элементов в самых бедных металлами звездах гало Галактики (население III) и в маленьких карликовых галактиках дают нам огромное количество информации о ранней Вселенной. В частности, эти старые «уцелевшие» звезды позволяют изучить природу первых звезд и первых сверхновых, соответствующие процессы нуклеосинтеза, ответственные за формирование и эволюцию элементов, процессы раннего звездообразования и образования галактик, а также процесса «сборки» звездных гало из карликовых галактик много млрд лет тому назад. Разнообразная и важная роль звезд, бедных металлами, в частности, в изучении условий формирования первых звезд и выходов от сверхновых населения III, и как, в конечном счете, это привело к химической эволюции и дальнейшему обогащению химическими элементами, обсуждено в подробном обзоре Анны Фребель [131]. Ею также представлен компилятивный каталог, включающий параметры и химический состав около 1000 звезд, бедных металлами. «Следы» процессов быстрого захвата нейтронов, которые отражены в химическом составе и найдены в металлическибедных звездах, могут быть использованы для определения возрастов звезд, а также для наложения ограничений на процессы нуклеосинтеза в соответствии с наблюдательными данными. Кроме того, содержания элементов в чрезвычайно

бедных металлами звездах в различных типах карликовых галактик могут быть привлечены, чтобы пролить свет на формирование гало и роль карликовых галактик как галактических строительных блоков.

Обычно термин «чрезвычайно бедные металлами звезды» (EMP), относится к звездам с $[\text{Fe}/\text{H}] < -3.0$. «Ультрабедные металлами» (UMP), называют звезды с $[\text{Fe}/\text{H}] < -4.0$ и “гипербедные металлами” (HMP) это звезды с $[\text{Fe}/\text{H}] < -5.0$.

Согласно космологическому моделированию, основанному на холодной темной материи, иерархической структуре Вселенной, первые звезды образовались после Большого взрыва за время порядка нескольких сотен миллионов лет в небольших минигало. Численное моделирование коллапса и фрагментации газа без присутствия металлов показало, что первые звезды были преимущественно очень массивны, поскольку из-за недостатка охлаждающих агентов в первичном газе значительная фрагментация была подавлена до $\sim 100 M_{\odot}$ [56] и другие.

Эти объекты вскоре взорвались, как массивные сверхновые II типа, либо коллапсировали в черные дыры (массы предшественников $25 M_{\odot} < M < 140 M_{\odot}$ и $M > 260 M_{\odot}$ соответственно) или были подвержены термоядерному взрыву в двойной системе SN I ($140 M_{\odot} < M < 260 M_{\odot}$; [161], сверхновые I типа). Во время их гибели образовалось огромное количество ионизирующей радиации и некоторые из первых металлов в случае SN I, которые изменили условия окружающей среды для последующего образования звезд даже в соседних минигало. Поэтому второе поколение звезд, возможно, состояло из менее массивных звезд ($M \sim 10 M_{\odot}$). Частично ионизированный газ поддерживал образование молекул H_2 , а затем молекул с дейтерием HD, которые в свою очередь способствовали более эффективному охлаждению по сравнению с нейтральным газом. Кроме того, любые металлы или частицы пыли, выброшенные сверхновыми SN I, приводят также к аналогичным последствиям охлаждения. Затем это могло привести к первым SN I, которые обеспечивали более регулярное производство металлов.

Ранние же звезды населения II начали формироваться из обогащенного материала, оставшегося после первых звезд. Сам процесс формирования этих первичных маломассивных звезд ($M \leq 0.8 M_{\odot}$) населения II (то есть большинства бедных металлами звезд, известных в настоящее время) не очень хорошо понятен до сих пор из-за неопределенности необходимых процессов охлаждения. Эффекты охлаждения, обусловленные нейтральным углеродом (CI) и однократно ионизованным кислородом (OII), были предложены в качестве основного охлаждающего агента, способствующего формированию маломассивной звезды [57]. Эти элементы (C, O) могут быть произведены, вероятно, в огромных количествах в объектах населения III (напри-

мер, [235] и др.). При достижении некоторой «критической» металличности в МЗС индуцируется фрагментация газа. Обнаружить такую «критическую» металличность можно при помощи большого числа бедных металлами звезд с пониженным содержанием углерода и кислорода. При металличности $[Fe/H] > -3.5$ большинство звезд имеют содержания углерода и/или кислорода, соответствующие шкалируемым солнечным содержаниям C и O, т. е. просто масштабируемым до соответствующих их значений Fe. Естественно, что этот диапазон металличности не подходит для прямого зондирования первых маломассивных звезд. Для металличностей $[Fe/H] \sim -3.5$, однако, наблюдаемые величины содержаний C и/или O должны быть выше, чем шкалируемые по железу солнечные содержания и выше, чем в случае критической металличности. Действительно, имеются звезды, бедные металлами, химические характеристики которых находятся в соответствии с этой теорией охлаждения. Это звезды, например, HE 0557-4840 с $[Fe/H] = -4.75$ [158], или звезды в ультраслабых карликовых галактиках с $[Fe/H] = -3.7$, показывающие избытки C и O, в предположении, что содержание кислорода вдвое больше, чем углерода.

Первая звезда с рекордно низким содержанием железа была найдена в 2001 году; это слабый ($V = 15^m.2$) красный гигант HE 0107-5240 имеет $[Fe/H] = -5.2$ [9]. В 2004 году был обнаружен более яркий ($V = 13^m.5$) субгигант HE 1327-2326 с еще более низким содержанием железа $[Fe/H] = -5.4$ [159, 259].

Около 5% бедных металлами звезд с $[Fe/H] < -2.5$ имеют заметное увеличение содержаний элементов нейтронных захватов, связанное с г-процессом [35]. Наблюдения показывают, что распространенность элементов нейтронного захвата (особенно с $Z > 56$) очень хорошо согласуется между собой во всех звездах, показывающих избытки г-процесса [25; 389; 106; 127; 244; 266; 185; 407], и с масштабированным (шкалированным) солнечным г-процессом [248]. В целом такое поведение свидетельствует о том, что г-процесс является универсальным и приводит к тем же соотношениям элементов в ранней Вселенной, как и в более поздние времена, когда формировалось Солнце.

Исследование звезд с заметным дефицитом металлов позволяет пролить свет на первые этапы эволюции Галактики и Вселенной: а) происхождение и эволюцию химических элементов; б) соответствующие процессы и места нуклеосинтеза; в) общую химическую и динамическую историю Галактики. Т. о. позволяет вносить коррективы в существующие модели галактической химической эволюции и совершенствовать методы и расчеты нуклеосинтеза. Более того, гипербедные металлами звезды ($[Fe/H] < -5.0$) дают ограничения на природу первых звезд, их начальную функцию масс (НФМ), выходы эле-

ментов от первых SN, а также ранние процессы образования звезд и галактик, включая образование галактического гало. Эти звезды крайне редки, однако их исследование является дальнейшим важным этапом в понимании эволюции Галактики и Вселенной.

В работе [191] авторы задались вопросом – можем ли мы наблюдать звезды населения III ($[\text{Fe}/\text{H}] < -5$), родившиеся из первичного газа, поскольку звезды населения III с массами ниже $0.8 M_{\odot}$ должны сохраниться до настоящего времени. Они рассмотрели выброс (вылет) звезд из минигало, учитывая выброс вторичных членов из двойных систем, когда их массивные предшественники взрываются как сверхновые. Вычисляя формирование звезд и химическую эволюцию вместе с формированием иерархической структуры на основе слияния, показали, что из «строительных блоков» Млечного Пути выбрасывается от нескольких сотен до десятков тысяч маломассивных звезд населения III. Второе и последующие поколения очень бедных металлом звезд также «вырвались» из минигало. В работе показано, что уцелевшие звезды распределяются по профилю плотности, близкому к таковому гало темной материи. При этом 6% – 30% «убегающих» звезд покидают Млечный Путь и выходят в межгалактическое пространство. К настоящему времени известно небольшое число звезд с такой металличностью, однако результаты этой работы обнадеживают.

Остановимся на том, как можно определить возраст звезд и Вселенной, опираясь на звезды с дефицитом металлов. Для определения возраста по нуклеокосмохронологии применяется ряд индикаторов, основанных на применении изотопов радиоактивных элементов [74; 81]. Так, Фаулер и Хойл [128] предложили использовать полураспад урана и тория для определения возраста, а Батчер [61] – радионуклиды, в частности ^{232}Th (период полураспада 14 млрд лет) и неодим, как стабильный референс-элемент (как элемент сравнения). В звездах разного возраста это дает возможность напрямую связать временные шкалы нуклеосинтеза со звездной и галактической эволюцией. Однако в исследовании Бутчера [61] не было обнаружено детектируемой эволюции содержания тория относительно стабильного элемента (Nd, в данном случае). Одной из причин могло бы быть то, что используемые элементы образованы в различных процессах нейтронного захвата Th (r-процесс) Nd (s-процесс). В связи с этим, Пейджел [288] рассмотрел два элемента, оба образованных в r-процессе (Th, Eu). Для звезд диска он не нашел изменений в отношении содержаний и пришел к выводу, что звезды диска – молодые и малый возраст диска не «чувствителен» к таким отношениям. Тем не менее отношение содержания Th, радиоактивного элемента r-процесса, к содержанию Eu, стабильного элемента r-процесса (см. на-

пример, [130]), используется как индикатор возраста обычно для звезд с дефицитом металлов $[Fe/H] < -2$ и с усиленными линиями других элементов, образующихся в процессах нейтронных захватов.

Среди объектов с высокими скоростями, исследованных в работе Ключковой и др. [74], имеется такая звезда (с усиленными линиями элементов нейтронного захвата), HD 115444 с металличностью $[Fe/H] = -2.91$. Определения содержания тория в атмосфере этой звезды выполнялись неоднократно. Так, например, Вестин и др. [400] для этой звезды получили отношение $[Th/Eu] = 0.496$ и оценили ее возраст 15.0 млрд лет, а определенное в работе [185] отношение $[Th/Eu] = 0.52$ и возраст соответственно 11.4 млрд лет. Ошибка определения содержания тория при этом составляет 0.07 dex, что в калибровках возраста дает ошибку ± 4.2 млрд В действительности ошибка, вероятно, больше, поскольку линия тория $4019 \text{ \AA}$, по которой выполнены определения содержания, входит в бленду, составляющие которой всегда имеют некоторую неопределенность (т. е. линии каких элементов и молекул образуют эту бленду), так же как и значения сил осцилляторов. Линия тория находится в красном крыле сильной бленды линий $FeI+NiI$ и на той же длине волны, что и у самой линии тория, включает линию CoI (25% вклада в эквивалентную ширину) и около 10% вклада в эквивалентную ширину линии $V II$ (оценки вкладов сделаны для атмосферы Солнца), и также находится в области линий поглощения молекулы ^{13}CH . Т. о. один из источников ошибок в значениях возраста обусловлен точностью определения содержания тория.

Долгоживущие радиоактивные изотопы ^{232}Th (период полураспада 14 млрд лет) и ^{238}U (4.5 млрд) пригодны для измерения времени в космических масштабах. Эти элементы имеют переходы в оптическом диапазоне, так что, в принципе, содержания Th и U можно измерять в звездных спектрах звезд, обогащенных продуктами r -процесса.

По сравнению с Th/Eu отношение U/Th является более устойчивым к неопределенностям в теоретически полученных выходах этих элементов, поскольку Th и U имеют близкие атомные массы (для которых неопределенности будут в значительной степени компенсироваться, например, [327; 399]). Т. о. элементы Th и U являются более подходящими для определения возраста звезд. По той же причине устойчивые элементы 3-го пика r -процесса ($76 \leq Z \leq 78$) лучше всего использовать в сочетании с актинидами ($Th, Z = 90$ и $U, Z = 92$). Первое определение возраста по отношению Th/U было сделано для гиганта CS 31082-001 [231] и получен возраст 14 млрд лет. Другие отношения – индикаторы возраста для этой звезды, такие как Th/Eu , дали отрицательные значения возраста. Это связано с необычно высокими содержаниями Th и U в сочетании с дефицитом содержания Pb по отноше-

нию к большинству элементов r-процесса у бедных металлами звезд. К настоящему времени есть, по крайней мере, четыре известные звезды с усиленными линиями r-процесса [390; 127; 361; 102] и такими высокими коэффициентами Th/Eu ($\sim 20\%$ от r-процесса). Но как только элементы тяжелее, чем 3-й пик r-процесса, оказывают (в равной степени) влияние [365], отношение U/Th по-прежнему дает разумные значения возраста для CS31082-01. Такое поведение было названо «импульсо-актинидное» [413], но позже стало ясно, что эти звезды, вероятно, имеют попросту другое, отличающееся происхождение [120], чем «нормальные» звезды r-процесса. Это также поддерживает гипотезу о мультивариантности источников r-процесса [127]. К сожалению, точность подобных определений возраста находится в диапазоне возрастов от ~ 2 до ~ 5 млрд лет [106]. Тем не менее, возраст самых старых звезд, естественно, обеспечивает важный независимый нижний предел возраста Галактики и, следовательно, Вселенной. Полученные в настоящее время значения возраста Вселенной по исследованиям WMAP равны 13.7 млрд лет [415] и 13.8 млрд лет по «Планку» [300], что близко к возрасту звезд с усиленными линиями r-процесса и делает их одними из самых старых известных объектов. Это согласуется с оценками возраста звезд низкой металличности, которые тоже указывают на очень раннее время формирования. Заметим, что звезды с усиленными линиями r-процесса, которые обеспечивают решающие эмпирические ограничения на природу этого процесса нуклеосинтеза и возраста Галактики, требуют высокого качества наблюдательных данных. Например, измерения отношения урана и свинца в настоящее время возможны только для очень ярких звезд.

Свидетельства s-процесса, медленного захвата нейтронов также наблюдаются в некоторых бедных металлами звездах, и их содержания следуют масштабируемому солнечному s-процессу. Бедные металлами звезды с усиленными линиями элементов s-процесса получили s-обогащенный материал во время переноса массы в двойной системе от более массивного компаньона, вещество которого прошло через фазы асимптотической ветви гигантов АВГ [246; 179; 259]. В этом процессе большое количество углерода, произведенное массивным компаньоном, также передается к менее массивному спутнику. Некоторые бедные металлами звезды несут «следы» обоих g- и s-процессов [249; 391]. Так, обогащенные углеродом звезды, бедные металлами (*carbon-enhanced metal-poor*, CEMP), демонстрируют обогащение элементами s-, r-процессов (например, бария и европия соответственно), а в некоторых случаях они показывают доказательства того и другого. Звезды CEMP-s/r, обогащенные Ba, и Eu, особенно озадачивают, поскольку s- и r-процессы требуют нейтронных плотностей, отли-

чающихся более чем на десять порядков друг от друга, и проходят в очень разных объектах с очень разными физическими условиями. В работе [391] рассмотрен промежуточный *i*-процесс нейтронного захвата, который характеризуется плотностью нейтронов в диапазоне 10^7 – 10^{15} см⁻³. По сравнению с классическим *s*-процессом, происходящим при плотности нейтронов, соответствующей нижней части этого диапазона, плотности нейтронов на верхних значениях приводят к увеличению производства тяжелых элементов *s*-процесса и *r*-процесса, но дают сходные концентрации легких элементов *s*-процесса. Такие высокие значения концентраций могут возникать в тепловых импульсах звезд АВГ из-за инъекции протонов. Сравнение с поверхностным содержанием 20 СЕМР-*s* / *r* звезд показало, что рассчитанные авторами содержания *i*-процесса успешно воспроизводят наблюдаемые распространенности элементов, которые ранее не могли быть объяснены нуклеосинтезом *s*-процесса. Поскольку модели *i*-процесса хорошо описывают содержания элементов у звезд СЕМР-*s* / *r*, авторы предложили, чтобы этот класс был переименован в СЕМР-*i*.

Звезды с дефицитом металлов, имеющие особенности обогащения α -элементами или элементами нейтронного захвата, могут также свидетельствовать о недостаточном перемешивании в ранней Галактике (смогли сохранить вещество взорвавшейся рядом сверхновой) или быть звездами, «захваченными» нашей Галактикой [55; 74].

2.3.4. Внешнее гало

Аккрецированные звезды, ШС, горячий газ, первичный газ, высокоскоростные облака – это объекты, которые населяют внешние части нашей Галактики, погруженные в темную материю. Такие термины, как аккрецированное гало, корона, внешнее гало, молодое гало, темное гало – это все синонимы, которые упоминаются в зависимости от контекста. В этом подразделе мы остановимся на некоторых последних исследованиях в основном теоретического характера. В последующих – рассмотрим высокоскоростные облака и корону.

Модель формирования иерархической структуры предсказывает, что звездные гало должны формироваться, по крайней мере, частично, посредством слияний. В этом случае отпечатки истории слияния в виде движущихся групп или потоков должны наблюдаться в окрестностях Солнца. Исследование кинематики близлежащих звезд гало, используя TGAS (*Tycho-Gaia Astrometric Solution*) и RAVE базы данных, дает возможность определить количество субструктур, присутствующих в фазово-пространственном распределении звезд гало, которые могут быть связаны со свидетельствами такого слияния. Функция корреляции скоростей звезд в выборке показывает, что из-

быток пар звезд с аналогичными скоростями значительно выше ожидаемой для гладкого распределения. Сравнение с космологическим моделированием формирования звездных гало указывают, что уровни найденных подструктур согласуются с гало Галактики, которое строится полностью с помощью аккреции. Поразительно высокая доля (между 58% и до 84%) звезд находится на (высоких) ретроградных орбитах. Простое сравнение с космологическим гидродинамическим моделированием галактик, подобных Млечному Пути, показывает, что менее 1% галактик имеют такие в значительной степени ретроградные внешние гало. Идентифицировано также несколько других статистически значимых структур в фазовом пространстве, как потенциально связанные с событиями слияния [163].

На основе метода восстановления глобального распределения плотности раннего галактического звездного гало (до формирования диска), опираясь на нынешние орбиты звезд, бедных металлами, наблюдаемых в окрестности Солнца, получено распределение плотности гало во внутренней области гало ($R \leq 15$ кпк). Оно остается умеренно плоским, с отношением осей приблизительно 0.8 для звезд в пределах металличности $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -1.8$ и 0.7 для более обогащенного металлами интервала $-1.8 < [\text{Fe}/\text{H}] \leq -1.5$ [79]. Внешнее гало остается сферическим для обоих интервалов металличности. Авторы полагают, что первоначальное уплощение внутреннего гало обусловлено анизотропией дисперсии скоростей звезд гало. Эти результаты свидетельствуют о том, что двухкомпонентный характер современного звездного гало, характеризующийся очень сплюснутым внутренним гало и почти сферическим внешним гало, может быть следствием как первоначально двухкомпонентного распределения плотности гало (возможно, свидетельством формирования диссипативного гало), так и адиабатического уплощения внутренней части вследствие последующего формирования диска.

Современные исследования, опирающиеся на обширные звездные данные, показывают, что звездное гало имеет сложную структуру с несколькими компонентами и нерелаксированными подструктурами, и продолжает захватывать вещество в виде меньших галактик, которые затем разрушаются из-за приливного влияния гравитационного поля [176]. Это подтверждает предсказания иерархических моделей образования галактик. Из-за длинных динамических временных рамок (шкал) в гало приливные «хвосты», оболочки и другие образования плотности, являющиеся следствием слияния/слипания карликовых галактик, остаются наблюдаемыми несколько млрд лет, образуя таким образом «окаменелости» («палеонтологический» материал) истории процессов аккреции Млечного Пути. Космологичес-

кое моделирование показывают, что Галактика должна была аккрецировать до ~ 100 спутниковых галактик, которые в основном были разрушены в результате воздействия приливного поля, вызывая образование звездного гало. Нерегулярные распределения плотности прогнозируются во внешнем гало из-за оболочек и приливных течений, с большой дисперсией между различными галактиками с той же массой материи темного гало. В этих моделях большинство гало часто построены в ранние галактические времена, ~ 10 млрд лет назад, и большинство звезд гало происходят из разрушенных (одного или нескольких) массивных спутников, аккрецированных ранее. Внешнее же гало построено совсем недавно по сравнению с внутренним гало и свойства гало отражают историю аккреции [99]. Часть же внутреннего гало может быть образована на месте *in situ*, то есть внутри основного «корпуса» Галактики. Последние расчеты показывают, что доля звезд, образовавшихся в раннем галактическом диске, могла быть выброшена во внутреннее гало, и далее звезды гало также могли образоваться из падающего газа, но количественное значение этих процессов еще не полностью изучены.

С помощью моделирования N-тел ($N \sim 10^6 - 10^7$) рассмотрено [178], как неосесимметричное темное гало влияет на динамическую эволюцию структуры в бесстолкновительных звездных дисках. Показано, что параметры модели, такие как масса гало, начальные условия в диске, и отношение осей гало влияют на морфологию и кинематику звездных дисков. Неосесимметричное (триаксиальное) гало может генерировать широкомасштабную картину плотности, спирали, во встроеном звездном диске. Картина наблюдается на диске в течение многих периодов оборота, даже если диск гравитационно сверхстабилен. Рост спиральных рукавов не сопровождается значительным динамическим нагревом диска, не соответствующим его исходным параметрам. Исследовано изменение формы темного гало, которое произойдет в долгоживущем спиральном узоре в диске. Анализ поля скорости в звездном диске и в спирали дает возможность выяснить пространственную ориентацию трехосного темного гало и измерить параметры трехосности.

Влияние формирования и эволюции галактики на распределение материи в темной материи гало оценено Хоперсковым и Шустовым [188] на основе расчетов эволюции изолированной темной материи гало и с учетом и без учета барионной компоненты. При этом моделирование N-тел (для гало темной материи) и газодинамическое численное моделирование (для барионного газа) были использованы при проведении такого анализа. Звездообразование, обратная связь и нагревание, и охлаждение межзвездной среды были приняты во внимание в газодинамических расчетах. Результаты числен-

ного моделирования с высоким пространственным разрешением показывают, что: 1) включение звездообразования решает так называемую проблему гребешка (согласно космологическим моделям распределение плотности в центральных областях гало темной материи должны иметь четкий пик (параболический), который не показывают наблюдения); 2) взаимодействие темной материи с динамическими подструктурами звездного газа галактического диска (спиральных волн, бар) влияет на форму гало темной материи. В частности рассчитанное распределение темной материи в плоскости диска с учетом барионной компоненты является более симметричным.

2.3.5. Высокоскоростные облака

Радионаблюдения водорода на 21 см, оптические наблюдения в линиях водорода (H α и H β), а также в линиях поглощения ионов CII (УФ-диапазон) при наблюдениях звезд МО через гало Галактики и звезд потока, связывающего нашу Галактику и МО, свидетельствуют о наличии высокоскоростных облаков – огромных сгустков водорода с массами до $10^6 M_{\odot}$ и поперечниками порядка 10 тыс. св. лет, которые проносятся сквозь внешние области Галактики с большой скоростью, превышающей скорость орбитального движения, в отдельных случаях достигая 400 км/с. Высокоскоростные облака были открыты Гвидо Мюнхом 60 лет назад [242], а Лайман Спитцер [364] предположил, что эти сгустки удерживает от расширения давление горячей газовой короны. Янн Оорт [279] рассмотрел семь возможных сценариев для объяснения природы этих облаков. Основная его идея касалась того, что по завершении начального этапа формирования Галактики на границе ее сферы притяжения остался «неиспользованный» газ, который достиг диска спустя 10 млрд лет, и наблюдается теперь в виде высокоскоростных облаков. Данные последних 5 лет показали, что некоторые из этих облаков падают на Галактику. Интересным и особым объектом нашей Галактики является Облако Смит. Оно названо в честь Гейл Смит [353], которая открыла его почти 50 лет тому назад. Облако Смит, как представляется, чисто газообразное, без звездной составляющей, для его существования и выживания требуется, чтобы оно было встроено в гало темной материи около $10^8 M_{\odot}$. Облако взаимодействует с газовым гало Млечного Пути [208]. Эндрю Фокс с коллегами [275], благодаря наблюдениям при помощи космической миссии «Хаббл», выяснили, что Облако Смит, это высокоскоростное гигантское газовое облако, находящееся в состоянии аккреции и на расстоянии 2.9 кпк ниже плоскости Галактики, в миллионы раз превышающее по массе наше Солнце, состоящее преимущественно из водорода, имеет протяженность 11 000 световых лет (около 3.4 кпк) и ширину

2 500 световых лет (около 0.8 кпк), что соизмеримо с размерами карликовой галактики. В отличие от прежних теорий, согласно которым облако было порождением извне (фрагментом погибшей карликовой галактики или аккрецирующим межгалактическим газом), большое количество серы и других элементов тяжелее водорода и гелия, обнаруженных в нем, говорит о его происхождении во внешнем диске Галактики. Т. е. о том, что этот объект родился внутри Млечного Пути. Расчет траектории этого объекта показал, что приблизительно 70 млн лет назад он уже пересекал диск нашей Галактики, а следующее прохождение ожидается через 27 млн лет, совершенно в другой точке относительно места предыдущего пересечения. Это может быть одним из механизмов, запускающих звездообразование.

В начале 70-х годов XX века был открыт Магелланов Поток – «струя» газа, охватывающая Галактику [214; 228]. Он следует орбитам Большого и Малого Магеллановых Облаков (МО). Магелланов Поток похож на цепочку облаков, которые движутся с высокими скоростями относительно галактического гало. Основные гипотезы его происхождения – сближение и большая протяженность короны Галактики – способствуют захвату вещества МО. Облака Магелланового Потока могут находиться значительно дальше в межгалактическом пространстве, что может говорить о его приливном происхождении. Однако возникает вопрос – как они могут сохраниться. Блицц [47] предположил, что высокоскоростные облака – это сгустки темной материи, в которые включено небольшое количество газа. Десятикратное увеличение массы облаков, по сравнению с предполагаемой ранее величиной, позволит облакам сохраниться.

Еще одну связь с нашей Галактикой может «засветить» эллиптическая галактика в Стрельце SagDEG (*Sagittarius Dwarf Elliptical Galaxy*) – одна из нескольких десятков карликовых спутников Млечного Пути [50]. Она находится на краю самой нашей Галактики, в 50 тыс. световых лет (15.3 кпк) от ее центра, и сама имеет в поперечнике не более 10 тыс. световых лет (3 кпк). За время совместного существования SagDEG совершила уже не один оборот вокруг значительно более крупного и тяжелого Млечного Пути. Используя сочетание аналитического моделирования и моделирования N-тел, была построена новая модель орбиты галактики SagDEG, которая воспроизводит достаточно достоверно наблюдения [103]. Для различных вариантов расчетов были использованы разные скорости и углы сближения двух галактик. Наиболее подходящая модель точно соответствует данным о 3D положениях и радиальных скоростях «обломков» (*debris*) галактики SagDEG, обнаруженных на расстояниях до 100 кпк в гало Млечного Пути. На первых этапах этой встречи (8 млрд лет тому

назад) SagDEG была значительно крупнее своих нынешних размеров, масса ее в то время оценивается в $10^9 M_{\odot}$ (около 1% массы Млечного Пути). Однако постепенно карликовая галактика потеряла около трети своих звезд и до 90% темной материи. Это вещество образовало три отдельных звездных потока, которые растянулись на огромном расстоянии – до 1 млн световых лет (около 300 кпк) от центра Млечного Пути. К этим потокам относятся пять из группы 11 самых удаленных звезд нашей Галактики – остальные шесть, вероятно, были «захвачены» у какой-то другой карликовой соседки.

2.3.6. Корона

Наличие массивных корон галактик было показано Яном Эйнасом [112]. Скопления галактик должны содержать темную материю, так как массы горячего газа внутри таких скоплений недостаточно для их стабилизации. Авторы предположили, что возможная недооценка массы галактик (и темная материя) кроется в наличии массивных и протяженных корон неизвестного происхождения. И представили данные, показывающие, что массы и радиусы корон превышают массы и радиусы известных звездных популяций галактик на порядок величины. В настоящее время можно говорить о темной и газовой короне.

Темная галактическая корона (темное гало) – массивный компонент галактик, который обнаруживает себя не по излучению в каком-либо диапазоне электромагнитного спектра, а по гравитационному воздействию на непосредственно наблюдаемые компоненты галактики – звезды и газ, включая спиральную структуру. Прямыми указаниями на существование темной короны в спиральных галактиках являются высокие скорости вращения внешних областей их дисков, а также высокие скорости движения карликовых спутников в гравитационном поле галактики. Что и наблюдается в нашей Галактике. Форма кривой вращения Галактики, построенная по комплексам HI и HII, демонстрирует крупномасштабные волнообразные колебания и слабый рост скорости вращения к периферии и, как было показано, она определяется одним параметром – оптической светимостью галактики. Плоская кривая вращения или слегка спадающая обычно интерпретируется как свидетельство массивных, протяженных, невидимых гало, окружающих галактики. Еще одним свидетельством наличия протяженности распределения массы является значительная скорость убегания звезд в окрестности Солнца, 400–550 км/с. Учитывая среднюю скорость, получаем, что Галактика простирается, по крайней мере, до 46 кпк, т. е. до Магеллановых Облаков. Динамика систем ШС и карликовых спутников Млечного Пути, анализ динамики пар Галактика + M31 и Галактика + МО говорят о еще большей протяженности короны до 100–200 кпк и массе $10^{12} M_{\odot}$ [322].

В пределах оптических границ галактики, массы, приходящиеся на темную галактическую корону и на видимое вещество (звезды и газ), обычно сопоставимы, однако на далекой периферии галактики масса темного гало, как правило, значительно преобладает. В среднем, чем меньше поверхностная яркость галактик, тем большую роль играет в них невидимая масса. К выводу о существовании темной массы в галактиках приводят также теоретические расчеты, описывающие формирование галактик в результате гравитационного сжатия первоначально слабых неоднородностей в догалактической среде. Наличие труднообнаруживаемых маломассивных звезд очень низкой светимости может объяснить лишь небольшую часть массы темной галактической короны. Предполагается, что темное гало состоит в основном не из атомов, а из элементарных частиц, слабо взаимодействующих с обычным веществом, однако вопрос о его природе остается открытым. Газовая галактическая корона – горячий газ, окружающий массивные галактики и простирающийся, как правило, за пределы их видимых оптических границ. Полная масса газа для нашей Галактики может достигать $10^{10} M_{\odot}$. температура галактической короны составляет порядка 10^6 К, плотность $2 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-3}$, диаметр 250 кпк [46]. При такой температуре газ излучает в основном в рентгеновском диапазоне, поэтому галактические короны были обнаружены космическими рентгеновскими миссиями. В зависимости от плотности и температуры газ галактической короны со временем может охлаждаться и падать на галактику (как в случае высокоскоростных облаков) либо нагреваться и уходить в межгалактическое пространство. К основным источникам, пополняющим запасы газа галактической короны, можно отнести: а) газ вблизи плоскости галактики, часть которого получает большую энергию и покидает диск; б) звезды вдали от центра галактики или от плоскости ее диска, теряющие вещество в процессе эволюции; в) межгалактический газ, существующий в группах и скоплениях галактик.

2.4. Балдж и центр Галактики

Центральная часть диска представлена выпуклостью, утолщением, называемым балджем. Галактический центр находится на расстоянии около 8.5 кпк (значение, принятое МАС 1984 г.) от нашей Солнечной системы, в направлении созвездия Стрельца. Его экваториальные координаты на эпоху J2000.0: прямое восхождение $17^{\text{h}} 45^{\text{m}} 40^{\text{s}}.04$ и склонение $-29^{\circ}00'28.1''$ (рис. 15, 16 на цветной вкладке).

В галактической плоскости сосредоточено большое количество межзвездной пыли, благодаря которой свет, идущий от галактическо-

го центра, ослабляется на 30 звездных величин. Поэтому центр невидим в оптическом диапазоне спектра или почти невидим. Но мы все таки можем «заглянуть» в замочную скважину, т. н. Окно Бааде, (названо в честь Вальтера Бааде), просвет в галактической пыли, который открывает нашему взору многочисленные далекие звезды. И при помощи оптических телескопов мы можем исследовать эту небольшую часть балджа Галактики. К настоящему времени удалось установить, что звезды балджа не являются однородной структурой. Они различаются по возрасту, заметная их часть имеет избытки содержания металлов по отношению к содержанию на Солнце, но имеются также звезды и с более низкими значениями содержаний химических элементов, чем солнечные [77; 201; 441].

По наблюдениям в радио-, ИК-, рентгеновском и гамма-диапазонах были получены данные непосредственно о галактическом центре. Большой вклад в исследование внесли космические миссии: гамма-обсерватории «Комптон» (*Compton Gamma Ray Observatory*, 1991–2000, 20 кэВ – 30 ГэВ, названа в честь Артура Комптона), рентгеновская обсерватория «Чандра» (*Chandra X-ray Observatory*, 1999, 100 эВ – 10 кэВ), космический телескоп «Хаббл» (1990, 100–2100 нм), инфракрасный телескоп «Спитцер» (2003, 3–180 мкм), наблюдения реликтового излучения спутником COBE (*Cosmic Background Explorer*, 1989, в радио- и ИК-диапазонах). Однако исследования и балджа, и бара, и центра Галактики продолжают.

В 1999 г. были рассмотрены три качественно различных сценария формирования балджа: 1) модель эволюции, в которой балдж формируется после того, как сформированы диски и прошло несколько циклов звездообразования в центральных частях, 2) модель первичного коллапса, в которой балдж и диски образуются одновременно, 3) модель балджа, в которой он сформирован до дисков [54]. Авторы отдали предпочтение первой модели, как модели формирования балджа, хотя неопределенности наблюдательных данных на то время не позволили четко выделить ни одну из моделей.

В течение многих лет балдж рассматривался как структура, образованная за счет слияния в начале формирования Галактики, которая теперь называется классическим баром. Старые звезды балджа, с учетом их диаграммы цвет – величина, поддерживали эту точку зрения. Наблюдения спутника COBE первыми установили, что балдж имеет форму коробки ядра ореха арахиса (*boxy/peanut bulge*) [44], что позже подтверждено данными 2MASS [405]. Заметим, что научные руководители программы COBE Джордж Смут и Джон Мазер в 2006 году были удостоены Нобелевской премии по физике за их открытия в области космологии. Последние данные также четко указали, что большая часть звезд балджа является частью так называемой к/а-балдж структуры,

представляющей внутреннюю трехмерную часть Галактического бара и имеющей вид коробки/арахиса (ядра ореха арахиса) [441]. Измерение трехмерного распределения плотности галактического балджа выполнено с использованием 8 млн красных гигантов клампа, покрывающих $(2.2 \times 1.4 \times 1.1)$ кпк внутренней части балджа/бара. Полученное распределение плотности показывает, что имеется сильно вытянутый бар с проекциями осей $\approx (1 : 2.1)$ по изофотам, достигающим ~ 2 кпк вдоль главной оси. Вдоль осей бара плотность убывает примерно в геометрической прогрессии, с отношением осей $(10 : 6.3 : 2.6)$ и экспоненциальной шкалой высот $(0.70 : 0.44 : 0.18)$ кпк. На ~ 400 пк над галактической плоскостью распределение плотности балджа показывает заметную X-структуру. В целом распределение плотности Галактического балджа характерно для ярко выраженного балджа в виде коробки ядра арахиса в галактике с баром [441].

На основе комбинированных 2MASS (*Two Micron All Sky Survey*), UKIDSS (*United Kingdom Infrared Deep Sky Survey*), VVV (*Vista Variables in the Via Lactea*) и GLIMPS (*Galactic Legacy Infrared Midplane Survey Extraordinaire*) обзоров в [442] был исследован длинный бар в обширной области по широте и долготе, галактические координаты, широта $|b| \leq 9^\circ$ и долгота $|l| \leq 40^\circ$, используя красные гиганты клампа и поправки за поглощение. Авторы обнаружили, что Галактический бар продолжается до $l \sim 25^\circ$ при $|b| \sim 5^\circ$ от плоскости Галактики, и $l \sim 30^\circ$ на более низких широтах. Они нашли, что: 1) бар простирается до $l \sim 25^\circ$ при $|b| \sim 5^\circ$ от плоскости Галактики, и $l \sim 30^\circ$ на более низких широтах; 2) длинный бар имеет угол к линии прямой видимости в диапазоне $(28^\circ \div 33^\circ)$, что согласуется с исследованиями балджа при $|l| < 10^\circ$; 3) шкала высот гигантов клампа плавно переходит от балджа к более тонкому длинному бару; 4) найдены свидетельства двух масштабов высот в длинном баре; найден тонкий компонент бара, шкала высот ~ 180 пк, напоминающий старый тонкий диск вблизи Солнца, супертонкий компонент бара, шкала высот ~ 45 пк, который находится преимущественно в конце бара; 5) построены параметрические модели для распределений величин красных гигантов клампа, найдена полудлина бара 5.0 ± 0.2 кпк для двухкомпонентного бара и 4.6 ± 0.3 кпк для тонкого компонента бара. Получено, что Млечный Путь содержит центральный балдж, который является вертикальным продолжением более длинного, более пологого бара, подобно, как показывают модели внешних галактик и модели N-тел (рис. 16 на цветной вкладке).

По мнению ряда исследователей, перемычка (бар) в нашей Галактики была образована в результате потери ею устойчивости. Проведя моделирование потери галактиками устойчивости, показали, что бары в галактиках, подобных Млечному Пути сформировались только в последнее время [302]. И, в частности, что поток Геркулес в окрест-

ности Солнца является «отпечатком» взаимодействия бар – диск на внешнем линдбладовском резонансе бара. Ранее также было высказано предположение о динамической природе потока Геркулеса [207].

Заметим, что объекты, обозначенные как выпуклости (балджи) в дисковых галактиках, не образуют однородный класс [23]. Выделяются три типа: 1) классические балджи, свойства которых подобны свойствам эллиптических галактик и которые образуются при коллапсе или слиянии; 2) вида коробки ядра арахиса, которые фактически являются лишь частью наблюдаемого бара; и, наконец, 3) дисковидные балджи, которые являются результатом притока (главным образом) газа в центральные части и последующего звездообразования.

Эволюционно ядра галактик рассматриваются как центры конденсаций галактик и первоначального звездообразования, поэтому там много старых звезд, возраст которых сопоставим с возрастом Галактики. На последующих этапах эволюции ядра галактик захватывают отдельные звезды, шаровые звездные скопления и газопылевые облака, чьи орбиты проходят около ядра. Огромные скопления газа и пыли в ядре приводят к бурному развитию там процессов звездообразования на протяжении всей эволюции. Действительно, в ядре Галактики наблюдаются газо-пылевые облака и идут процессы звездообразования.

На радиоизображении области вблизи центра Галактики наблюдаются два радиоисточника: SgrA* (W) и SgrA* (E) – Стрелец A* (западный) и Стрелец A* (восточный). Западный сверхкомпактный источник совпадает с динамическим центром Галактики, восточный – протяженный, находится, по-видимому, за центром. Источник SgrA* (E) является остатком вспышки сверхновой, т. к. имеет оболочечную структуру, и спектр его излучения синхротронный. Западный источник окружен газопылевым кольцом.

В самом же центре ядра Галактики возможно существование сверхмассивной черной дыры и сверхкомпактного звездного скопления той же массы (см. рис. 17 на цветной вкладке). В 1968 г. впервые был обнаружен протяженный источник в ближнем ИК-диапазоне излучения, центрированный на Sgr A* [34], скопление звезд в ядре (*nuclear star cluster*, NSC). Исследования 2007 года подтвердили [403], что в центре Галактики наблюдается плотное и яркое скопление звезд. Плотность скопления $2.8 \pm 1.3 \cdot 10^6 \text{ M}_\odot \text{ пк}^{-3}$. Такая высокая плотность хорошо согласуется с малой протяженностью (размером). А масса звезд составляет лишь около 50% от общей массы скопления. Скопление оказалось неоднородным. Обнаружены сгустки плотности, которые, предположительно, находятся на расстояниях $R = 3''$ и $R = 7''$ от Sgr A*. Авторы полагают, что, возможно, это связано с существованием менее плотного образования красных гигантов клампа вбли-

зи $R = 5''$, или это соответствует сверхплотному образованию звезд аналогичной яркости на $R = 3''$ и $R = 7''$.

Звезды около черной дыры под действием приливных сил должны разрываться и образовывать сильно излучающую газовую оболочку, постепенно поглощаемую дырой. Наконец в окружающем черную дыру газе должны происходить процессы ускорения частиц до релятивистских энергий. В области "центрального парсека" наблюдается источник синхротронного радиоизлучения, а также излучения в рентгеновском и гамма-диапазонах. Однако полной уверенности в существовании черной дыры в ядре Галактики долгое время не было. И вот после 16 лет регулярного мониторинга области галактического центра с телескопами Южной Европейской Обсерватории (ESO – *European Southern Observatory*) на обсерваториях Ла Силья и Паранал, под руководством Стефана Жиллисена [3], получено решающее доказательство наличия черной дыры в центре Галактики. С беспрецедентной точностью установлены орбитальные движения отдельных звезд вокруг центра Галактики. Траектории движения этих звезд убедительно показали, что звезды должны двигаться по орбитам под действием колоссального гравитационного притяжения сверхмассивной черной дыры, почти в три миллиона раз более массивной, чем наше Солнце, с массой $M = (4.23 \pm 0.14) \cdot 10^6 M_{\odot}$, находящейся на расстоянии $R_0 = 8.33 \pm 0.11$ кпк. Поскольку в центре Млечного Пути очень высокая плотность звезд, для увеличения разрешающей способности Очень Большого Телескопа (VLT – *Very Large Telescope*) потребовались специальные адаптивно-оптические методы получения изображений. Наблюдения с VLT также выявили вспышки ИК-излучения, исходящие из области галактического центра через равные промежутки времени. Хотя точная причина этого явления остается непонятой, наблюдатели предположили, что это может быть следствием быстрого вращения черной дыры.

Затем в работе [397] были подтверждены данные [3] на основе нового определений масс, вращения, структуры орбит и статистического параллакса для старых звезд центрального скопления (NSC) и массы сверхмассивной черной дыры (Sgr A *). Оценки массы звезд NSC и массы черной дыры и расстояния до центра Галактики (Sgr A*) равны: $M_{\text{NSC}} = 8.94 \cdot 10^6 M_{\odot}$, $M^* = 3.86 \cdot 10^6 M_{\odot}$ и $R_0 = 8.27$ кпк соответственно. Совместный статистический анализ с результатами Жиллисена и др. [3] приводит к величинам массы черной дыры и расстояния, совпадающими с полученными в этой работе, а именно $M^* = (4.23 \pm 0.14) \cdot 10^6 M_{\odot}$ и $R_0 = 8.33 \pm 0.11$ кпк соответственно.

Гидродинамическое моделирование весьма успешно применяется для интерпретации полученных наблюдательных данных для га-

лактического центра. Последние гидродинамические расчеты Сильвии Боноли с коллегами [45] формирования, роста и обратной связи черных дыр в галактиках поздних типов предсказывают наличие центральной черной дыры с массой $2.6 \cdot 10^6 M_{\odot}$, что коррелирует с массой балджа и дисперсией скоростей в центральной части смоделированной галактики подобно тому, что наблюдается в Млечном Пути. В ходе собственной эволюции масса черной дыры растет в основном за счет слияний черных дыр, которые поступают от галактик-спутников, и незначительно вследствие аккреции газа (из-за малого количества газа, который достигает центральных областей). Формирование бара вызывает небольшой всплеск звездообразования во внутренней области в несколько сотен парсек, обеспечивает приток нового газа к центральной черной дыре и «заставляет» балдж иметь вид коробки ядра ореха арахиса. Моделирование аккреционного диска и взаимодействия звездного ветра для случая Sgr A* выполнено Кристи с коллегами [238]. Свойства аккреционного потока вокруг Sgr A* можно зондировать через его взаимодействие со звездным ветром от близких массивных звезд, принадлежащих к звездному скоплению. Когда звезда перехватывает аккреционный диск, термическое давление диска останавливает звездный ветер, ведущий к образованию главной ударной структуры (волны). Полуаналитическая модель описывает геометрию ударной волны, образованной в ветре. Ветер производит рентгеновские вспышки с пиковой светимостью $L \approx 4 \cdot 10^{33} \text{ эрг с}^{-1}$ для скорости потери массы $10^{-7} M_{\odot}$ в год и плотности диска 10^5 см^{-3} . Этот пик светимости сравним со спокойным рентгеновским излучением, детектируемым от Sgr A*, и находится в пределах возможностей обнаружения действующих рентгеновских обсерваторий. Его обнаружение может ограничить плотность и толщину диска на расстоянии $\sim 3\,000$ гравитационных радиусов от сверхмассивной черной дыры.

Во главе с Грантом Трамбле большим коллективом авторов представлены результаты по холодной, массивной аккреции на активную сверхмассивную черную дыру [84]. Сверхмассивные черные дыры в центрах галактик могут «вырасти» из аккреции газа, высвобождая энергию, которая может регулировать звездообразование на всех галактических масштабах. При описании газовых резервуаров «подпитки» для роста черной дыры используют обычно упрощенную картину притока очень горячего газа. Авторы пишут о наблюдениях, которые показывают холодный массивный аккреционный поток в сторону сверхмассивной черной дыры в ядре галактики Abell 2597. При корректных условиях тепловые неустойчивости производят «дождь» из холодных облаков, которые падают к центру галактики, поддерживая формирование звезд на масштабе килопарсека молекулярной

туманности, которая находится в ее ядре. Наблюдения показывают, что эти облака находятся в пределах требуемых сотни парсек от черной дыры и падают ближе к ней.

Роберт Гранд с коллегами [363] использовали набор из тридцати космологических магнито-гидродинамических моделей формирования галактик, подобных Млечному Пути, и их темных гало. Расчеты проводились с кодом AREPO, вместе с комплексной моделью формирования галактик, включая взаимодействие активных ядер галактик (AGN) и магнитных полей, что создает реалистичные популяции галактик в больших космологических моделях. Расчеты воспроизводят широкий диапазон наблюдаемых характеристик (особенностей), в частности для галактик с доминирующим двухкомпонентным диском; это звездные массы, размеры, кривые вращения, скорости звездообразования и металличности. Механизмы управления, которые устанавливают размеры диска/масштаб длины, связаны с угловым моментом вещества гало. Большие диски образуются скорее в результате «спокойных» слияний, чем инспирируются в самой галактике и «удерживают» большой угловой момент вещества в прадиске, одновременно увеличивая спин темной материи и газа в гало. Более жесткие слияния и взаимодействия активных ядер галактик (AGN) играют заметную роль в ограничении размера диска, разрушая уже существующие диски и подавляя аккрецию газа на внешнем диске соответственно. Наиболее важным фактором, который приводит к компактным дискам, является малый угловой момент для гало. В этих случаях обратная связь активных ядер галактик (AGN) играет важную роль в ограничении центрального звездообразования и формирования массивного балджа.

Звезды с очень высокими скоростями, гиперскоростные звезды (*hypervelocity stars*, HVSs) Млечного Пути и молодые звезды галактического центра были исследованы в предположении, что они являются продуктами приливного разрушения от одной и той же совокупности двойных звезд, связанной с центральной массивной черной дырой. Количество выбрасываемых «вылетающих» (скорость $> \sim 700$ км/с) и массивных ($7\text{--}15 M_{\odot}$) звезд от центра Галактики составляет около $\sim 20\text{--}40$ и большая часть их находится в пределах ~ 20 кпк от галактического центра. Найдены заметные пространственные корреляции между обнаруженными в настоящее время HVS в галактическом гало и молодыми звездами в центре Галактики, что соответствует предполагаемому их общему происхождению [129].

Еще одной загадкой, связанной с центром Галактики, являются два гигантских пузыря (их диаметр составляет около 25 тысяч световых лет, 7.6 кпк), зарегистрированные при помощи гамма-телескопа

«Ферми» (*Fermi Gamma-ray Space Telescope*, в честь Энрико Ферми). Оказалось, что они симметрично расположены сверху и снизу галактического диска, соприкасаясь с ним в центральной точке. Было выдвинуто предположение, что примерно раз в тысячу лет силы гравитация Sgr A* «захватывают» одну из ближайших звезд. В итоге часть звездной материи падает на черную дыру, а часть выбрасывается в космическое пространство в виде протонов, разогнанных до колоссальных скоростей. Эти протоны, проходя через газо-пылевое облако вокруг черной дыры, вызывают потоки высокоэнергетичных электронов, которые в процессе движения испускают фотоны в радио- и рентгеновском диапазонах. Эта теория объясняет избыток высокоэнергетического космического излучения, который наблюдается в центре Галактики, а также тот факт, что границы вышеупомянутых пузырей имеют резкие очертания. Однако исследователи также полагают, что «аномалии» в центре Млечного Пути могут быть результатом столкновения нашей Галактики с другой, карликовой, в центре которой находилась черная дыра массой порядка $10^5 M_{\odot}$. Она была притянута силами гравитации черной дыры Галактики, и падение огромных масс вещества способствовало выбросам энергии, которые и привели к образованию «гамма-пузырей».

Итак, пузыри Ферми являются двумя «долями», мешками, заполненными нетепловыми частицами, которые испускают гамма-лучи, простираются на ≈ 10 кпк по вертикали от центра Галактики и возможно образованы вследствие формирования звезд или активной аккреции на Sgr A*. Моделирование предсказывает, что пузыри должны содержать тепловой газ с температурой между 10^6 и 10^8 K и рентгеновское излучение. Ограничивая структуру теплового газа пузырей и моделируя O VII и O VIII эмиссионные линии, наблюдаемые в рентгене, на основе архивных данных XMM-Newton (X-ray Multi-Mirror Mission, рентгеновская космическая миссия ЕКА) и Suzaku (Сузаку, японская рентгеновская обсерватория) получена модель пузырь / оболочка с концентрацией $n \approx 1 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-3}$ и с температурой ($\lg T$) ≈ 6.60 - 6.70 , которая согласуется с наблюдаемыми интенсивностями линий. Оценки скорости расширения пузыря, возраст и коэффициент вброса энергии согласуются с пузырями, образующимися от Sgr A* в результате аккреции, а не вследствие формирования звезды [236]. Саркар и др. [338] путем 2D гидродинамического моделирования исследовали происхождение Ферми пузырей вследствие как звездообразования, так и аккреции ветра, управляемой черной дырой. Авторы сравнили результаты с недавними наблюдениями соотношения интенсивностей O VIII и O VII линий внутри и около Ферми пузырей. Независимо от механизмов движения низкая светимость и вброс энергии лучше всего воспроизводит наблюдаемое отношение интенсивности линий, для кото-

рого ударная температура составляет $\sim 3 \cdot 10^6$ К. Если предположить, что температура гало Галактики равна $2 \cdot 10^6$ К, тогда скорость ударной волны ~ 300 км/с. Соответствующий этим оценкам возраст пузырей Ферми составляет $\sim 15\text{--}20$ млн лет. Такое событие может быть осуществлено либо при скорости звездообразования $\sim 0.5 M_{\odot}$ в год в центре Галактики, либо при очень низкой светимости струи/аккреции ветра, возникающей благодаря центральной черной дыре.

Любопытные результаты по исследованию центральных областей нашей Галактики были получены по исследованиям переменных звезд. Ученые с помощью телескопа VISTA (*Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy*) обнаружили очень старые пульсирующие звезды типа RR Лиры в центре Млечного Пути. Обнаружение звезд, возраст которых составляет более 10 млрд лет, позволяет предположить, что галактический балдж, вероятно, образовался путем слияния очень старых звездных скоплений. Сами же звезды могут оказаться остатками одного из самых старых звездных скоплений Млечного Пути. Вместе с тем Иштван Декани и коллеги [408], анализируя данные, также полученные с помощью широкоугольного телескопа VISTA, обнаружили неизвестный ранее компонент нашей Галактики, состоящий из пульсирующих молодых звезд – цефеид. Возраст таких звезд составляет до 100 млн лет, а самые молодые могут иметь возраст около 25 млн лет и даже еще моложе. Возраст обнаруженных классических цефеид представляет веское доказательство в пользу существования прежде неизвестного постоянно действующего в течение последних 100 млн лет источника молодых звезд в центральной части Млечного Пути. Помещая найденные цефеиды на карту, обнаружили очертания совершенно нового структурного элемента Млечного Пути – тонкого диска из молодых звезд, пересекающего галактический балдж. Этот новый компонент нашей Галактики оставался незамеченным в прежних обзорах неба, так как был скрыт плотными пылевыми облаками. Используя южноафриканский телескоп JSA (*Japanese South Africa 1.4m Telescope*), Нориюки Мацунага с коллегами также проделали работу по исследованию цефеид в направлении на центр Галактики [5], часть из которых совпадает со звездами из работы [105]. Интересно, что в непосредственной близости от галактического центра (на расстоянии порядка 46 кп) такие звезды обнаружены [105], но дальнейшее распределение звезд говорит об отсутствии цефеид во внутренней 2.5 кпк области Галактического диска. Т. е. в нем нет лишь цефеид и других молодых звезд, а значит, не скапливаются большие количества газа и не проходят процессы звездообразования. Важный вопрос о звездообразовании в центре Галактики остается открытым.

3. ХИМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ГАЛАКТИКИ

3.1. Формирование Галактики

Теории формирования галактик должны учитывать большое разнообразие наблюдаемых структур галактик, от неправильных карликовых галактик до больших спиралей, от карликовых галактик низкой светимости до эллиптических галактик высокой светимости. Это обуславливает две основные составляющие таких теорий – формирование темного гало и глобальное звездообразование. Использование иерархического кластеринга и численного моделирования в настоящее время является успешным подходом в описании формирования структуры различных типов галактик [444]. Однако применение этих исследований к формированию галактик с компонентами высокой светимости затруднено по причине ограниченности наших знаний о процессах звездообразования, их взаимодействия с окружающей МЗС, в том числе механизмов обогащения МЗС химическими элементами [175]. Локальная Группа Галактик и, в частности, наша Галактика, представляет уникальную возможность для тестирования таких моделей. Хотя первые численные модели с доминирующей дисковой составляющей в полном согласии с космологическими прогнозами уже построены, например, [335], имеется, однако, ряд проблем, касающихся как темной материи, так и структуры галактик, построенных в рамках таких предположений. Исследование поведения содержания элементов в нашей Галактике может помочь в понимании комплексных процессов, обусловленных барионной диссипацией [132], и процессов формирования ее структуры.

Как уже было упомянуто, рассматриваются два основных сценария образования Галактики: 1) коллапсирующее газовое облако [111] и/или 2) слияния/слипания отдельных фрагментов [343]. Для объяснения происхождения той или иной составляющей Галактики часто используются оба сценария [297; 298]. Эгген и др. [111] первыми обратили внимание на то, что химический состав и кинематика звезд связаны между собой. В этом сценарии градиент металличности и возраст по отношению к кинематике, представленной скоростями вращения или эксцентриситетами, могут описать морфологию галактики, соотнесенную с активностью звездообразования на ранних эпохах сравнительно со временем коллапса [197]. При этом сохранение углового момента обусловлено эволюцией остаточного газа из первоначально сферического распределения в диск. Согласно этому сценарию Галактика сформировалась из протогалактики – медленно вращающегося водородно-гелиевого газового облака, началь-

ные размеры которого в десятки раз превосходили современные размеры Галактики. Это облако практически свободно сжималось под действием собственной гравитации (коллапсировало), и в процессе сжатия рождались первые звезды. Характерное время свободного сжатия – 1 млрд лет [59]. Дальнейшая эволюция определялась различием в изменении энергии у звездной и у газовой составляющей Галактики. Гравитационная энергия, выделяющаяся при сжатии, переходила в кинетическую энергию движения звезд и газа. Рост кинетической энергии звездной составляющей довольно быстро остановил ее сжатие. Поэтому старые звезды, родившиеся в начале сжатия протогалактики, в значительной степени сохранили сфероидальное распределение в пространстве, характерное для вещества протогалактики, а также начальное распределение момента вращения. Эти звезды образовали слабовращающееся гало. Этот сценарий объяснил наблюдаемую корреляцию между эксцентриситетом и металличностью звезд-карликов [111]. Газ продолжал свободно сжиматься, поскольку терял приобретаемую кинетическую энергию в столкновениях газовых облаков. Когда размеры газовой составляющей уменьшились в несколько раз, кинетическая энергия уравнивала гравитационную, это и остановило сжатие газа в плоскости вращения. Вдоль оси вращения (Z) сжатие продолжалось, что привело к формированию тонкого газового диска. Родившиеся в нем звезды и образовали быстровращающуюся дисковую подсистему.

Параллельно с формированием подсистем шло обогащение межзвездной среды тяжелыми элементами. Звезды диска образованы из вещества, обогащенного тяжелыми элементами, прошедшего через термоядерные реакции в недрах звезд. Поэтому звезды диска в целом богаче тяжелыми элементами, чем образовавшиеся ранее звезды сферической составляющей (гало). По той же причине молодое население диска содержит больше тяжелых элементов, чем старое. Обнаруженные Леонардом Сирлем и Робертом Цинном [343] две подсистемы ШС, на которые прежде были указания в работах Марсакова и Сучкова [466; 467], различающиеся кинематическими и химическими свойствами, не вписывались в гипотезу коллапсирующего облака. Ими был предложен другой сценарий, в котором ШС и звезды гало образовались из фрагментов, которые затем слиплись с базовым фрагментом на промежутке времени большем, чем 1 млрд лет. В случае быстрого коллапса можно ожидать наличие корреляции между возрастом и металличностью звезд гало и ШС, радиального градиента металличности, подобия в распределении обогащения тяжелыми элементами подструктур Галактики. Современные

наблюдательные данные поддерживают возможность осуществления второго сценария – это обнаружение «внешнего» и «внутреннего» гало с различающимися плотностью объектов, кинематикой и средним возрастом [11], а также высокоскоростных малометаллических звезд гало с признаками отличающего обогащения [117; 400]. Подкласс богатых углеродом бедных металлами звезд, так называемые СЕМР звезды, включает старые звезды, содержащие значительные количества углерода, но относительно небольшие количества тяжелых металлов (таких, как железо). Массивные звезды первого поколения, состоящие из чистого водорода и гелия, произвели и рассеяли по Вселенной тяжелые элементы, из которых формировались звезды последующих поколений. Джинми Юн и др. [269] показали, что звезды самой низкой металличности включают не только значительную долю звезд класса СЕМР, но и звезды подкласса СЕМР-по, богатые также азотом и кислородом. Они, вероятно, являются звездами, появившимися вскоре после Большого взрыва, 13.5 млрд лет назад, и сформировавшимися из МЗС, обогащенной продуктами нуклеосинтеза самых первых звезд Вселенной.

По мере накопления новых наблюдательных данных и более глубокого понимания физических процессов сценарии эволюции изменяются и более детально описывают Галактику и ее составляющие.

Современные модели формирования Галактики, которые опираются на темную холодную материю, можно рассматривать как развитие идей Сирля и Цина [343]. Формирование массивных спиральных галактик подобно нашей рассматривается как следствие иерархического ансамбля (объединения) субгалактических темных гало с последующей аккрецией барионного газа. Численные расчеты, основанные на данных предположениях, воспроизводят характерные особенности дисковых галактик – массивное гало, состоящее из темной материи, звездное гало и звездный диск. Глобальная структура современного состояния звездного гало характеризуется внутренней, высоко сплюснутой частью, на расстояниях $R < 15$ кпк, и верхней, почти сферической частью [78]. Как показано в этой работе, основанной на исследовании орбит звезд бедных металлами в солнечной окрестности, и упомянуто выше, приплюснутость внутреннего гало обусловлена анизотропией скоростей звезд гало. Этот результат подтверждает то, что разделение гало на две части есть следствием как начального двухкомпонентного распределения плотности звезд гало, так и адиабатического сплющивания (сжатия вдоль оси Z) внутренней части в результате последующего формирования диска.

3.2. Основные источники обогащения

Содержания химических элементов, которые мы наблюдаем сегодня в Солнечной системе и в звездах, обеспечивают обоснования нашего понимания эволюции звезд и источников и процессов нуклеосинтеза, формирования и химической эволюции Галактики, а также космологических наблюдений ближнего поля. Определяя химический состав звезд практически на всех возрастах Галактики и металличностях, различающихся на несколько порядков, мы можем воссоздать картину ее обогащения.

Модели химической эволюции Галактики рассматривают следующие основные источники и виды обогащения.

1) Водород, гелий, некоторая доля лития, бериллия и бора образованы в результате Большого взрыва (первичный нуклеосинтез). Однородный Большой взрыв дает следующий выход элементов по массе: 76% H, 0.0091% ^2H , 0.0034% ^3He , 24% ^4He , $8 \cdot 10^{-8}\%$ ^7Li [437].

2) Сверхновые II типа ($8 < M_{\odot} < 100$) обеспечивают производство элементов (и изотопов), начиная с лития, включая α -элементы, элементы железного пика и нейтронного захвата. Выход продуктов нуклеосинтеза является функцией массы (модели чувствительны к массе гелиевого ядра), металличности и учета конвекции [213; 450; 449]. Горение водорода в ядре и фазы слоевого горения у звезд различных масс приводят к существенным вариациям масс гелиевых ядер. Большой разброс в содержании тяжелых элементов отражает различный выход элементов для каждой сверхновой II типа с различными начальными массами. С другой стороны, при низких металличностях $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$ выход элементов C, Mg, Si, Ca от массивных звезд совпадает с содержанием элементов в остатках сверхновых. Это говорит о том, что звезды с $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$ формировались в индивидуальных событиях взрыва сверхновых. При этом отметим, что модели предсказывают возможность наличия количества звезд, свободных от металлов (население III) в локальном гало $10^3 - 10^4$ (при условии, что прото-звездные облака имеют массы $10^{6-7} M_{\odot}$). Сверхновые типа II, коллапсирующие сверхновые в ядре, в современной литературе часто обозначаются как CCSN (*core-collapse supernova*). В дальнейшем мы будем использовать это обозначение наряду со «сверхновыми II типа».

3) Сверхновые Ia типа (звезды средних и низких масс) ($1 < M_{\odot} < 8$), двойные звезды, основные поставщики Fe и элементов железного пика [411; 446; 424].

4) Сверхновые Ib типа, в случае истечения водородной оболочки, поставляют ^4He , ^{14}N , ^{17}O , ^{23}Na , в случае водородно-гелиевой – все значительно усложнено.

5) Ветер от звезд с массами меньше $8 M_{\odot}$. Основной элемент, поставляющийся в МЗС, – углерод (содержание которого изменено по сравнению с другими элементами) [304].

6) Ветер от быстро вращающихся звезд с массами больше $20 M_{\odot}$ и звезд Вольф – Райе (WR, в честь Шарля Вольфа и Жоржа Райе). У сверхгигантов массой больше $20 M_{\odot}$ наблюдается сильное истечение вещества, достигающее 10^{-5} солнечной массы в год для звезд с массами $50 M_{\odot}$ [68], при этом оно может быть столь значительно, что оголятся внутренние слои, прежде чем водород в ядре превратится в гелий. Продукты нуклеосинтеза появляются на поверхности и звезды становятся пекулярными OB-звездами с избытком N [436], а затем звездами WR, на поверхности которых доминируют He и N, произведенные в CNO цикле. В течение дальнейшей эволюции оболочки, обогащенные He, N, истекают, обогащая МЗС, а звезды становятся WR углеродными звездами, показывая продукты горения гелия.

7) Истечение оболочек планетарных туманностей ($M < 11 M_{\odot}$) (post-AGB) приводит к обогащению МЗС элементами CNO и s-процесса. В звездах асимптотической ветви гигантов (АВГ) проходит комплексное горение водорода и гелия в слое, обогащенном углеродом, и вынос на поверхность продуктов горения после 3-й стадии перемешивания. Модели звезд АВГ включают экстраперемешивание протонов в слое, обогащенном водородом, и прохождение основных реакций CNO, NeNa и MgAl циклов. При этом выход элементов обратно пропорционален металличности и зависит от массы. Исследование поведения элементов n-захвата проводится с использованием результатов расчетов выхода элементов у звезд АВГ по работам [60; 260; 22; 142; 409; 140].

8) Реакции скалывания, в результате бомбардировки высокоэнергетическими частицами (космическими лучами) ядер C, N, O и их распада рождаются на поверхности звезд легкие элементы (${}^6\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{10}\text{B}$) и в межзвездной среде.

9) Элементы нейтронных захватов образуются посредством медленного захвата нейтронов s-процесс и быстрого нейтронного захвата r-процесс [371]. В последнее время обращено внимание на возможность прохождения в ряде космических объектов промежуточного по плотности потоков и температурам i-процесса (*intermediate*), отмеченную [66], а также r-процесса в быстро вращающихся массивных сверхновых с сильным магнитным полем [252].

В первых феноменологических исследованиях были введены три различных компонента s-процесса [186]: слабый (*weak*) компонент s-процесса, производящий большинство элементов между Fe и Sr, основной (*main*) компонент s-процесса, ответственный за содержания между Sr и Pb, а также сильный (*strong*) компонент s-процесса,

ответственный за производство 50% солнечного ^{208}Pb . Полное моделирование нуклеосинтеза на основе реалистичных звездных моделей в основном подтвердило этот сценарий. Основная часть слабого компонента s-процесса производится в массивных звездах, вызванного активацией реакции $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ в конвективных ядрах горения гелия и затем в конвективном горении углерода C в слое (оболочке) [262; 410; 409]. Основной и сильный компоненты s-процесса образуются в звездах АВГ как на солнечной, так и более низкой металличности, соответственно [118; 401]. Большинство нейтронов обеспечены прохождением реакции $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ в радиационном (находящемся в лучистом равновесии) ^{13}C -кармане, образованном сразу после третьего перемешивания [210], с соответствующим вкладом от частичной активации реакции $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ в конвективных тепловых пульсациях [118]. В частности расчеты химической эволюции Галактики подтверждают, что для полной картины распределение элементов s-процесса в Солнечной системе должны быть приняты во внимание различные поколения звезд АВГ [142; 140]. Происхождение тяжелых элементов r-процесса является мультивариантным и остается не до конца определенным. По крайней мере, три источника были предложены, а именно: 1) нейтрино-индуцированные ветры от коллапсирующих ядер сверхновых [448]; 2) обогащенное избыточными нейтронами вещество от слияния нейтронных звезд [133] и/или слияния нейтронная звезда/ черная дыра [328]; 3) полярные струи от вращающейся, имеющей сильное магнитное поле, коллапсирующей в ядре сверхновой [329; 252]. Более подробное описание различных сценариев r-процесса можно посмотреть у [446]; результаты, связанные с r-процессом, – [217; 273].

Как можно выявить источники происхождения элементов? Прежде всего сравнением наблюдений с результатами расчетов нуклеосинтеза и в более обобщенном (общем) виде, с расчетами химической эволюции галактики, которая в той или мере учитывает выходы нуклеосинтеза. Т. е., с одной стороны, можно анализировать различные тренды (поведение) содержания элементов (или отношений содержаний) с металличностью, возрастом или другими элементами, а с другой, сравнивать с эволюционными расчетами (предсказаниями), учитывающими как различные источники происхождения (производства) элементов, так процессы формирования галактики. В этой связи очень важным является наблюдательный материал, который может служить тестом для эволюционных моделей и их предсказаний. Как пример рассмотрим определение содержания кислорода, величина которого и тренд с металличностью были предметом большой дискуссии [283]. Дело в том, что использование различных наборов линий кислорода

приводило к различным результатам у разных авторов. Запрещенные линии кислорода давали более низкие значения по сравнению с линиями триплета кислорода, и в области низких металличностей результаты одних авторов демонстрировали постоянный избыток кислорода (~ 0.4 dex), а других – показывали зависимость от $[\text{Fe}/\text{H}]$ и значения содержания кислорода $[\text{O}/\text{Fe}]$ до 0.7 dex. При этом эволюционные расчеты предсказывали постоянное значение, близкое к 0.4 dex [347]. Все это еще усложнялось тем, что в первом случае запрещенные линии $[\text{OI}]$ наблюдались у звезд с металличностью, близкой к солнечной, а у звезд с дефицитом металлов – линии триплета OI . Определенные НЛТР содержания кислорода, выполненные в работе [283], не показывают зависимости от атмосферных параметров (T_{eff} , $\lg g$). При этом, очевиден явный тренд содержания кислорода, увеличивающегося с уменьшением металличности (рис. 3.1).

Линейную зависимость между $[\text{O}/\text{Fe}]$ и $[\text{Fe}/\text{H}]$ можно выразить как:

$$[\text{O}/\text{H}] = -0.370[\text{Fe}/\text{H}] + 0.047.$$

Угол наклона прямой согласуется с результатами исследований Израэльяна и др. [182] и Боесгаард и др. [286], которые нашли $[\text{O}/\text{Fe}] = -0.31$ и -0.35 соответственно. Этот параметр был получен Боесгаард и др. [286] по определению содержания кислорода по линиям молекулы OH и опубликованных эквивалентных ширин ИК триплета OI . Полученный четкий тренд $[\text{O}/\text{Fe}]$ vs. $[\text{Fe}/\text{H}]$ (рис. 3.1) подтвержден рядом работ (например, [26]), на интерпретацию которого ориентируются современные расчеты химической эволюции.

Как известно, согласно современным представлениям теорий нук-

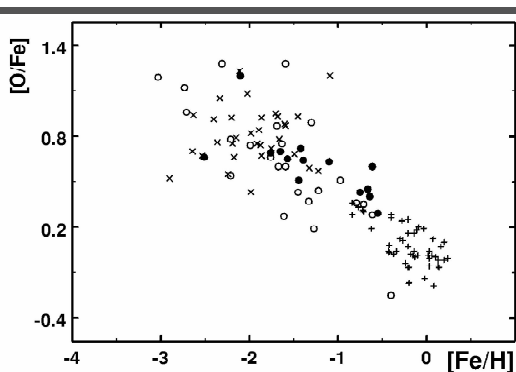


Рис. 3.1. $[\text{O}/\text{Fe}]$ как функция $[\text{Fe}/\text{H}]$. Темные кружки – данные работы [283]. Ссылки на остальные работы там же [283]

леосинтеза α -элементы образуются в реакциях захвата α -частиц, проходящих в недрах массивных звезд, впоследствии взрывающихся как сверхновые II типа (SN II). Железо же поставляется как массивными звездами (SN II), так и менее массивными звездами (SN Ia). Если в Галактике меняется пропорция таких звезд со временем, что связано с разницей времени эволюции сверхновых I и II

типов (вообще говоря, изменяется функция масс и ряд других параметров), то отношение содержания O, Mg и других α -элементов к содержанию железа будет также изменяться со временем, что мы и наблюдаем в нашей Галактике: более старые звезды (звезды с дефицитом металлов), как правило, показывают избыток $[\alpha/\text{Fe}]$ относительно солнечного отношения (см. рис. 3.1). Уменьшение $[\text{O}/\text{Fe}]$ vs $[\text{Fe}/\text{H}]$ интерпретируется как свидетельство роста вклада от SN Ia в обогащение МЗС железом, из которой впоследствии образовались звезды.

Происхождение и эволюция Sc, V, Mn, Co для однородной и статистически значимой выборки звезд (от 466 до 594 звезд) различных популяций Млечного Пути, в частности тонкого и толстого дисков, изучены в работе Кьяры Батистини и Томаса Бенсби [31] на основе спектров высокого разрешения ($42\,000 \leq R \leq 65\,000$) и высокого отношения сигнал – шум ($S/N \geq 200$). Найдено, что тренды содержаний, полученные для Sc, V, и Co, очень похожи на те, что наблюдаются для α -элементов в тонком и толстом дисках. Тренды Sc и V совместимы с выходами от сверхновых II типа (SN II). Кроме того, Sc четко показывает зависимость от металличности для $[\text{Fe}/\text{H}] < -1$. Mn производится в массивных сверхновых SN II при $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -0,4$, а затем сверхновые типа Ia начинают вносить свой вклад в производство Mn. И, наконец, Co, как представляется, производится в основном в SN II с возможным обогащением от гиперновых при низких металличностях.

Что касается элементов, образованных в процессах нейтронных захватов, исследовано поведение их содержания с металличностью и даны оценки вкладов медленного s-, быстрого r-процессов в обогащение этими элементами галактических подструктур. В целом ход содержания элементов нейтронных захватов с металличностью указывает на различающиеся вклады s-, r-процессов для звезд тонкого и толстого дисков. Как показано на основе исследования содержаний Y, Zr, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Eu, а также Fe, Ni для 300 карликов диска, что при большой неопределенности в определении возраста наблюдаемых звезд существует большой разброс металличности в тонком диске [14]. Это может быть одной из основных причин дисперсии, наблюдаемой для элементов s-процесса в тонком диске (например, Ba и La), в то время как значительно меньший разброс наблюдается для элементов r-процесса (например, Eu). Из-за существующего разброса, не наблюдается четкая тенденция к уменьшению содержаний $[\text{Ba}/\text{Fe}]$ или $[\text{La}/\text{Fe}]$ с металличностью в тонком диске или рост указанных содержаний при уменьшении возраста звезд. Батистини и Бенсби [32] представили результаты определения содержаний Sr, Zr, La, Ce, Nd, Sm и Eu для от 156 до 395 звезд. Обнаружено, что Nd, Sm, Eu показывают зависимости от

[Fe/H], похожие на наблюдаемые для α -элементов. Для [Sr/Fe] и [Zr/Fe] найдено уменьшение содержания при увеличении металличности, достигая солнечных значений при сверхсолнечных металличностях. [La/Fe] и [Ce/Fe] не показывают четкую зависимость от металличности, эти (их) значения близки к солнечным значениям при всех [Fe/H]. Получены тренды содержаний элементов [El/Fe] в зависимости от возраста звезд с различающимися наклонами до и после возраста 8 млрд лет. Отмечено хорошее согласие с результатами вышеупомянутой работы [14]. Быстрый r -процесс нейтронного захвата активен в ранней Галактике, за него ответственны в основном сверхновые II типа с массами 8–10 $M_{\odot}$. Европий почти полностью производится в r -процессе. Nd и Sm показывают похожие тренды, как Eu, при этом они имеют более значительный вклад от s -процесса. Стронций Sr и цирконий Zr, как предполагается, производятся в основном в s -процессе, но показывают значительное обогащение при низкой металличности, что требует дополнительного вклада от r -процесса, который, вероятно, отличается от классического r -процесса. И, наконец, за обогащение La и Ce в основном ответственен s -процесс от звезд АВГ в диапазоне масс 2–4 $M_{\odot}$, который подтверждается уменьшением [La/Eu] и [Ce/Eu] при [Fe/H] $\approx$ -0.5. Тренды [El/Fe] с возрастом для звезд толстого диска могут быть связаны с уменьшением вклада от сверхновых II типа с течением времени, это означает понижение обогащения r -элементами межзвездной среды. В тонком диске тренды являются плоскими, вероятно, благодаря тому, что основное производство элементов s -процесса уравнивается производством Fe от сверхновых Ia типа.

Т. о. мы рассмотрели возможности выявления источников обогащения путем анализа поведения содержаний элементов с металличностью и расчетов нуклеосинтеза. Далее рассмотрим подобное сравнение, но с расчетами моделей химической эволюции.

3.3. Базовые положения моделирования химической эволюции

Эволюция сформировавшейся Галактики описывается с помощью некоторой модели, которая, как и многие другие, ей подобные, построена на дифференциальных уравнениях, выражающих законы сохранения массы компонентов Галактики (газа, звезд), массы отдельных химических элементов и энергии. Модели учитывают многие факторы: звезды, газ и пыль в межзвездном пространстве; крупномасштабные структуры и, прежде всего, дисковую структуру; эффективность звездообразования; распределение звезд по массам, звездную эволюцию, потерю массы звездами и обогащение межзвездного вещества химическими элементами – продуктами звездной эво-

люции; фазовые переходы в межзвездной среде; тепловые и ионизационные процессы и перенос излучения в ней; динамические процессы, определяющие эволюцию крупномасштабных галактических структур. Тестирование модели проводится путем сравнения с параметрами нашей Галактики в данную эпоху.

Теории химической эволюции галактик воссоздают историю обогащения тяжелыми элементами, рассматривая при этом источники обогащения МЗС различными элементами и изменения масс компонентов системы. Первые модели и основные положения были представлены в работах Беатрис Тинсли и Ричарда Ларсона [417; 418; 419]. Важным параметром моделей является скорость обогащения тяжелыми элементами, которая зависит от нескольких факторов. Прежде всего это начальная функция масс (НФМ) и скорость звездообразования (СЗО). НФМ определяет долю звезд, которые производят металлы, и описывает начальное распределение звезд различных масс. С течением времени вид этой функции будет меняться. Можно допустить, что общая функция масс звезд в галактическом поле есть сумма видоизмененных вследствие эволюции функций звездных подсистем разного возраста. Часто используют НФМ Эдвина Салпитера [333], который, опираясь на теорию эволюции звезд с постоянной массой при отсутствии перемешивания и предположив постоянство скорости звездообразования в окрестности Солнца в течение существования Галактики, вывел уравнение, позволяющее по наблюдаемой общей функции масс в окрестностях Солнца, получить НФМ

$$\varphi \sim m^{-(1+x)},$$

где m – масса звезды; x – так называемый наклон НФМ.

В настоящее время исследования НФМ [192] говорят о заметной ее зависимости от скорости звездообразования в галактиках.

СЗО представлена в очень многих случаях функцией звездообразования, предложенной Маартеном Шмидтом [339], показатель степени n которой варьируется, ρ – плотность

$$\psi(t) = \rho^n \quad (n = 2).$$

Скорость обогащения зависит также от выхода металлов (отношение массы произведенных данным поколением звезд тяжелых элементов к массе звезд того же поколения, которые не участвуют в обогащении), притока или утечки вещества из данного объема и др. Сравнивая данные, получающиеся при различных предположениях, например, распределения звезд, с подсчетами реальных звезд разного химического состава, можно сделать выводы о свойствах НФМ, СЗО и пр. на разных стадиях эволюции Галактики, а сравнивая распространенность элемен-

тов в атмосферах звезд при различной металличности, можно определить основные источники и механизмы обогащения и пр.

Кратко остановимся на основных предположениях и положениях аналитического представления химической галактической эволюции [417 – 419; 197; 464]. Определим НФМ $\varphi(m)$ так, что количество звезд, рождающихся в данном интервале масс m , $m+dm$ в течение времени от t до $t+dt$, равно

$$\varphi(m)\psi(t)dm dt, \quad (3.1)$$

где $\psi(t)$ – скорость звездообразования (СЗО), равная массе всех звезд, родившихся за единицу времени. Т. о. СЗО можно представить как

$$\int_0^{\infty} m \varphi(m) \psi(t) dm,$$

тогда

$$\int_0^{\infty} m \varphi(m) dm = 1, \quad (3.2)$$

где подинтегральное выражение представляет собой долю массы в интервале масс m , $m+dm$.

Распределение по массе звезд со временем жизни на ГП τm больше возраста, например, диска t_1 , определяется интегралом

$$N(m) = \int_0^{t_1} \varphi(m) \psi(t) dt, \quad \tau_m > t_1. \quad (3.3)$$

Если НФМ не зависит от времени t , тогда

$$N(m) = \varphi(m) < \psi_1 > t_1, \quad (3.4)$$

где $<\psi_1>$ – средняя функция звездообразования в диске, соответствующая современному состоянию диска.

Распределение по массе молодых звезд со временем жизни на ГП $\tau_m < t_1$ имеет вид

$$N(m) = \int_{t_1 - \tau_m}^{t_1} \varphi(m) \psi(t) dt, \quad \tau_m < t_1. \quad (3.5)$$

Для звезд с малым временем жизни, $\tau_m \ll t_1$

$$N(m) = \varphi(m) \psi_1 \tau_m, \quad \tau_m \ll t_1, \quad (3.6)$$

где ψ_1 – современная функция звездообразования в диске, соответствующая более массивным звездам.

Если же СЗО не зависит от t , то такое представление распределения справедливо для всех масс. Используя наблюдаемое распределение $N(m)$, по (3.4) находится вид НФМ для звезд с $m < 1$, а для звезд с $m > 2$ – по (3.6). Именно такое определение удобно в теории химической эволюции галактик, где приходится связывать полные массы различных компонентов системы (массу газа, звезд, тяжелых элементов) с количеством маломассивных звезд и массивных звезд, поставляющих элементы.

Например [418], пусть масса M выделенного объема в Галактике состоит из массы звезд M_s , газа M_g и звездных остатков M_w

$$M = M_s + M_g + M_w. \quad (3.7)$$

Тогда результирующая скорость увеличения звездной массы равна

$$dM/dt = \Psi - E - W, \quad (3.8)$$

где скорость звездообразования (Ψ) минус скорость сброса вещества (E) проэволюционировавшими звездами в МЗС минус скорость образования белых карликов и других звездных остатков (W).

Как и в случае звезд, для распределения белых карликов и звездных остатков можно записать

$$W(t) = \int_{m_t}^{\infty} w_m \psi(t - t_m) \varphi(m) dm, \quad (3.9)$$

где w_m – масса остатка, m_t – масса звезды в точке поворота ГП, t_m – время жизни звезды с массой m .

Подобное выражение можно записать и для скорости сброса вещества E .

В приближении мгновенного круговорота, часто применяемого в моделях химической эволюции, время жизни массивных звезд с $m > m_t$, заканчивающих свою жизнь взрывом или звездным остатком, пренебрежимо мало по сравнению с характерным эволюционным временем, т. е. $\tau_m = 0$ при $m > m_t$ и $\tau_m = \infty$ при $m < m_t$.

Для современной Галактики, имеющей возраст по разным оценкам $(13-15) \cdot 10^9$ лет, этому времени соответствует точка поворота с массой звезд $m = 0.8-1.2$ в единицах солнечной массы. Поэтому можно полагать $m_t = m_1 = \text{const} = 1$, индекс 1 соответствует современному состоянию. Тогда можно записать

$$E(t) + W(t) = \psi(t) \int_{m_1}^{\infty} m \varphi(m) dm \equiv \varphi_1 \psi(t). \quad (3.10)$$

Поскольку начальная функция масс $\varphi(m)$ имеет нормировку

$\int_{m_1}^{\infty} m\varphi(m)dm = 1$, то φ_U есть доля массы, которая находится в звездах

с $m > m_1$.

Введем теперь два параметра. Первый – это доля массы R , возвращающаяся от звезд в межзвездную среду при взрывах сверхновых посредством звездного ветра и т.д. Ее можно записать как

$$R^S \equiv \int_{m_1}^{\infty} (m - w_m) \varphi(m) dm, \quad (3.11)$$

и она равна доле массы газа, возвратившейся в МЗС за время, равное времени жизни звезды с массой $m = 1$.

Скорость сброса вещества в МЗС выражается через R^S очевидным образом:

$$E(t) = \psi(t)R^S. \quad (3.12)$$

Второй параметр – это эффективный выход металлов y :

$$y = \frac{1}{1 - R^S} \int_{m_1}^{\infty} m p_{Zm} \varphi(m) dm. \quad (3.13)$$

Он представляет собой долю массы сброшенных в МЗС металлов от полной массы, заключенной в маломассивных ($m \leq 1$) звездах и звездных остатках. Величина p_{Zm} есть доля массы звезды, превратившаяся в тяжелые элементы и выброшенная в МЗС.

Используя определение R^S , из (3.11) получим

$$W(t) = (\varphi_U - R^S)\psi(t). \quad (3.14)$$

Подставляя (3.12) и (3.14) в уравнение (3.8), получаем

$$dM_g/dt = (1 - \varphi_U)\psi(t),$$

выражающий тот факт, что живущие звезды имеют массы $m < m_1$.

Изменение полной массы звезд и звездных остатков

$$dM_{s,w}/dt = (1 - R^S)\psi(t). \quad (3.15)$$

А изменение массы газа или скорость истощения газа равна

$$dM_g/dt = -(1 - R^S)\psi(t). \quad (3.16)$$

Полная масса тяжелых элементов к моменту времени t равна

$$Z_S(M_S + M_W) + ZM_g = \int_0^t \int_{m_1}^{\infty} m p_{Zm} \psi(t' - \tau_m) \varphi(m) dt' dm + Z_{S_0} M_{S_0} + Z_0 M_{g_0}, \quad (3.17)$$

где Z_s – массовая доля тяжелых элементов (металличность) в звездах и Z – металличность газа. Индекс ноль указывает на начальные значения параметров. В приближении мгновенного круговорота ($\tau_m = 0$)

$$Z_s = y - \frac{\mu}{1-\mu} Z + \frac{1-\varphi_U}{1-R^S} \left(Z_{s_0} \frac{M_{s_0}}{M_s} + Z_0 \frac{M_{g_0}}{M_0} \right), \quad (3.18)$$

где $\mu = M_g / M$ – доля массы газа.

При малой начальной металличности, $Z_{s_0} \sim Z_0 \approx 0$, величина выхода металлов совпадает со средней металличностью звезд, когда доля массы газа становится малой:

$$\text{при } \mu \rightarrow 0 \quad y \approx Z_s. \quad (3.19)$$

Это важный вывод, говорящий о том, что по наблюдаемому распределению содержания элементов можно оценить выход элемента и источник его производства.

Если учесть, что в систему может втекать газ со скоростью f , имеющий металличность Z_f , тогда полная система уравнений, описывающих изменение со временем массы звезд, газа и тяжелых элементов, будет иметь вид

$$dM_s/dt = (1 - R^S)\psi. \quad (3.20)$$

$$dM_g/dt = - (1 - R^S)\psi + f. \quad (3.21)$$

$$d(ZM_g)/dt = - Z(1 - R^S)\psi + y(1 - R^S)\psi + Z_f f. \quad (3.22)$$

Вместо массы тяжелых элементов в газе ZM_g удобнее рассматривать металличность Z , используя уравнения 3.21, 3.22, получаем

$$M_g dZ/dt = y(1 - R^S)\psi + (Z_f - Z) f. \quad (3.23)$$

Вышеприведенная система уравнений вместе с основными предположениями о мгновенном круговороте вещества ($\tau_m = 0$ при $m > m_1$), инвариантности НФМ: $d\varphi/dt = d\varphi/dZ = 0$, независимости СЗО от выхода металлов Z ($d\psi/dt = 0$), а также предположении о притоке или оттоке газа из системы представляют собой простую аналитическую модель химической эволюции.

Решение этих уравнений дает изменение химического состава $Z(t)$ галактического газа со временем. Сравнение с наблюдениями позволяет нам оценить, насколько наши предположения соответствуют реальным величинам содержаний, т. е. адекватно ли данная модель описывает эволюцию Галактики.

В рамках данного подхода как для замкнутой, так и для открытой системы (с притоком газа) следует, что металличность Z пропорциональна эффективному выходу y ; а их отношение Z/y зависит только от теку-

щего состояния галактики и не зависит от прошлой истории и слабо зависит от модельных параметров, например, μ и ν (доли массы газа или аккрецируемой массы). В рамках рассмотренной простой модели следует, что содержание элементов в газе будет не слишком сильно различаться для разных галактик или разных областей в одной галактике, если даже имеются значительные различия, как в истории звездообразования, так и в наблюдаемом содержании газа. Это позволяет нам, в частности, анализируя поведение звезд в солнечной окрестности с достаточной степенью надежности описывать Галактику в целом.

Используя такие достаточно простые предположения и уравнения, модифицированные на различные типы галактик – спиральные, эллиптические, неправильные, можно оценить космическую продукцию металлов и среднюю металличность Вселенной [64].

3.4. Модели химической эволюции Галактики

3.4.1. Модель Феррини

Модель рассматривает эволюцию гало и диска как двух не связанных, отдельных систем. Первоначально модель рассчитывала эволюцию 15 изотопов, затем был добавлен ряд тяжелых элементов [22] и разделение Галактики на три зоны – гало, толстый диск и тонкий диск. В модели рассмотрена цилиндрическая галактическая зона, центрированная на солнечную окрестность. Рассмотрены различные состояния вещества: диффузный газ и звезды гало, диффузный газ, газовые облака и звезды диска. Процесс звездообразования в диске – двухэтапный, первый этап – формирование облаков, а затем формирование звезд внутри облаков. Скорость звездообразования учитывает столкновение облаков и процессы, вызывающие эти столкновения. НФМ получена из анализа фрагментации комплекса молекулярных облаков. Кратко рассмотрим математический формализм модели. Введем обозначения:

$$g = \frac{M_{gas}}{M_{tot}}, \quad c = \frac{M_{clouds}}{M_{tot}},$$

$$s = \frac{M_{stars}}{M_{tot}}, \quad r = \frac{M_{remnants}}{M_{tot}},$$

где M_{tot} – полная масса системы.

Система парных нелинейных уравнений эволюции такова:

$$\frac{ds_{1H}}{dt} = K_1 g_{H^-}^n D_{1H}, \quad \frac{ds_{2H}}{dt} = K_2 g_{H^-}^n D_{2H}, \quad \frac{dg_H}{dt} = -(K_1 + K_2) g_{H^-}^n f g_H + W_H,$$

$$\frac{ds_{1D}}{dt} = H_1 c^2_D + a_1 c_D s_{2D} - D_{1D}, \quad \frac{ds_{2D}}{dt} = H_2 c^2_D + a_2 c_D s_{2D} - D_{2D},$$

$$\frac{dg_D}{dt} = -\mu g^n_D + a' c_D s_{2D} + H' c^2_D + f g_H + W_D,$$

$$\frac{dc_D}{dt} = \mu g^n_D - (a_1 + a_2 + a') c_D s_{2D} - (H_1 + H_2 + H') c^2_D, \quad \frac{dr_H}{dt} = D_{1H} + D_{2H} - W_H,$$

$$\frac{dr_D}{dt} = D_{1D} + D_{2D} - W_D,$$

$$\frac{dX_{iH}}{dt} = \frac{W_{iH} - X_{iH} W_H}{g_H}, \quad \frac{dX_{iD}}{dt} = \frac{W_{iD} - X_{iD} W_D + f g_H (X_{iH} - X_{iD})}{g_D + c_D}.$$

Обозначения H и D соответствуют гало и диску. Доля массы, сосредоточенная в звездах, разделена на два класса, по массам

$$s_1 : m_{min} < m \leq m^*,$$

$$s_2 : m^* < m \leq m_{max},$$

поскольку только доля s_2 (массивные звезды) взаимодействует с облаками, участвующими в звездообразовании: m_{min} , m^* , m_{max} равны 0.1, 4 и 100 $M_\odot$ соответственно.

X – содержание по массе 15 изотопов, в первой версии программы, в дальнейшем список был расширен.

В действительности эволюцию системы, состоящей из звезд и газа, определяют различные процессы. В рассматриваемой нами модели процессы, описываемые вышеприведенными уравнениями, и коэффициенты в них представляют следующее:

$K_{1,2} g^n_H$ – коэффициент звездообразования вследствие спонтанной фрагментации газа гало;

μg^n_D – коэффициент формирования облаков в диске из диффузного газа;

$H_{1,2} c^2_D$ – формирования звезд вследствие столкновений облаков в диске;

$H' c^2_D$ – возвращения диффузного газа от столкновений облаков в диске;

$a_{1,2} c_D s_{2D}$ – индуцированного звездообразования вследствие взаимодействия массивных звезд и облаков в диске;

$a' c_D s_{2D}$ – возвращения диффузного газа вследствие индуцированного звездообразования в диске;

fg_H – формирования диска посредством аккумуляции (накопления) диффузного газа из гало.

Скорость звездообразования в гало и диске представлена следующим образом

$$\psi_H(r) = (K_1 + K_2)g_H^n,$$

$$\psi_D(t) = (H_1 + H_2)c_D^2 + (a_1 + a_2)c_D s_{2D}.$$

При этом возвращение вещества в МЗС зависит от времени: $D_{1,2;H,D}(t)$ отражает долю общей массы, которую оставляют звезды на времени t и $W_{i;H,D}(t)$, доля выброшенной массы в межзвездный газ как i -й элемент от звезды, заканчивающей свою жизнь на времени t .

В работе принято, что одиночные звезды с массами от 0.1 до $8 M_\odot$ эволюционируют до состояния белых карликов с $m < 1.4 M_\odot$. Массивные одиночные звезды с $m \geq 8 M_\odot$ быстро эволюционируют, с временем $\tau_m \leq 10^7$ через все фазы центрального ядерного горения, заканчивая жизнь как SN II и оставляя после себя нейтронные звезды и черные дыры. Двойные системы в диапазоне масс $3M_\odot \leq m \leq 16M_\odot$ (SN Ia), главный компонент которых (более массивная звезда) эволюционирует до углеродно-кислородного белого карлика, а вторичный – до гиганта, взрывающегося в конце жизни, преобразовав весь материал в тяжелые элементы (железо) и не оставляя никакого остатка.

Начальная функция масс имеет вид

$$\varphi(m) = 2.01m^{-0.52} \cdot 10^{-[2.07(\log m)^2 + 1.92 \log m + 0.73]^{1/2}}.$$

Это аналитическое выражение определено из анализа ансамбля облаков с физическими условиями, наблюдаемыми в солнечной окрестности, стабильно и постоянно в ходе галактической эволюции.

SN Ia представлены распределением масс:

$$\varphi_B(m)dm - \alpha(m)\varphi(m)dm,$$

где

$$\alpha(m) = \begin{cases} \alpha_0 = 0.1, & \text{if } 3M_0 \leq m \leq 16M_0 \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases},$$

α_0 – современная скорость образования SN Ia.

Скорость образования остатков

$$D_{1;H,D}^{(t)} = \int_{m_{\min}}^{m^*} \psi_{H,D}(t - \tau_m) \phi(m) dm,$$

$$D_{2;H,D}^{(t)} = \int_{m^*}^{m_{\max}} \psi_{H,D}(t - \tau_m) \phi(m) dm,$$

где τ_m время жизни звезды с массой m на главной последовательности

$$\tau_m = \begin{cases} 8.0m^{-2.8}\text{Gyr, if } m \leq 10.0M_{\odot} \\ 0.05m^{-0.6}\text{Gyr, if } m > 10.0M_{\odot} \end{cases}.$$

Скорость возвращения вещества в МЗС

$$W_{i;H,D}(t) = \int_{m_{\min}}^{m_{\max}} \left[\sum_j Q_{ij}(m) X_j(t-\tau) \right] \psi_{H,D}(t-\tau_m) dm,$$

где $Q_{ij}(m)$ – матрица, представляющая долю массы элементов, переработанной в звездах.

Скорости появления сверхновых SN Ia, SN II выражены следующим образом:

$$\frac{dN_{\text{SNII}}}{dt} = \int_{8M_{\odot}}^{m_{\max}} \frac{\varphi'(m)}{m} \psi_{H,D}(t-\tau_m) dm,$$

$$\frac{dN_{\text{SNI}}}{dt} = \int_{m_{\min}}^{8M_{\odot}} \frac{\varphi_s(m)}{m} \psi_{H,D}(t-\tau_m) dm.$$

В уравнениях изменения химического содержания использован стандартный подход [418]:

$$\frac{d(X_{iH} g_H)}{dt} = -\psi_H X_{iH} - f g_H X_{iH} + W_{iH},$$

$$\frac{d[(X_{iD} (g_D + c_D))]}{dt} = -\psi_D X_{iD} - f g_H X_{iH} + W_{iD}.$$

Структура алгоритмов и методы вычисления [119]. Основные источники производства элементов, принятые в модели: 1) массивные звезды $8 \div 100 M_{\odot}$ (SN II), расчеты [450; 212], 2) звезды низких и умеренных масс $0.8 \div 8 M_{\odot}$, расчеты [321], (SN Ia) [256; 257].

3.4.2. Описание моделей других авторов

Кратко рассмотрим модели химической эволюции других авторов. В той или иной степени они базируются на приведенных выше положениях и предположениях, рассматривая и другие процессы, влияющие на ход эволюции содержаний элементов. Остановимся на общей характеристике используемых моделей.

Модель Пейджела и Таутвайшене [287; 289]. Аналитическая модель локального диска (включая толстый диск), используется формализм с притоком газа и приближение «отсроченной» продукции

элементов. Обогащение железом и α -элементами принято за счет SN II и SN Ia. Обогащение элементами s-процесса в два этапа, на возрасте 37 млн лет и 2.7 млрд лет, что соответствует звездам-предшественникам $8 M_{\odot}$ и $1.5 M_{\odot}$, соответственно.

Модель Тиммеса, Вусли, Вивера [416]. Учитывает вклад от сверхновых II, Ia, звезд средних и малых масс, которые становятся планетарными туманностями. Начальный химический состав – элементы, образованные в результате Большого взрыва, и солнечный химсостав [18]. $Z_{\text{gaz}} = 10^{-4} Z_{\odot}$ и последовательно $Z_{\text{gaz}} = 0.01 Z_{\odot}$, $Z_{\text{gaz}} = 0.1 Z_{\odot}$. Использовалась зонная модель. Рассмотрена эволюция 76 изотопов в 12 зонах, изменение содержания каждого изотопа было представлено нелинейным интегро-дифференциальным уравнением, их было около 1000 пар. Звездообразование – функция Шмидта [339], НФМ – функция Салпитеера [333]. Гало и диск являются частями одной и той же системы и различаются только по возрасту. Проведено сравнение стабильных изотопов от водорода до цинка в межзвездной среде на время 4.6 млрд лет тому назад и в месте образования Солнца (8.5 кпк). Модель хорошо описывает отношение возраст – металличность, при этом 2/3 произведенного железа дают сверхновые типа II, а 1/3 – сверхновые типа Ia.

Модель Самланда [334]. Модель основана на самосогласованном рассмотрении МЗС и звездных компонентов. Это саморегулирующаяся система «звезды – газ», контролируемая гравитацией и процессами охлаждения и нагрева. Модель описывает эволюцию плотностей и скоростей звезд и МЗС со временем, дисперсию скоростей звезд, температуры газа, функцию звездообразования, сверхновые звезды и планетарные туманности, детальное распределение содержания элементов. Свободные параметры – начальные условия (угловые моменты и распределение плотности), сценарии формирования (медленный коллапс протогалактического облака или последовательное слияние газовых фрагментов), НФМ и величина выхода химических элементов в процессах нуклеосинтеза.

Модель предполагает, что флуктуации плотности в ранней Вселенной вызваны протогалактическими облаками, состоящими из H, He, и небольшого количества Li. Формирование облаков начинается, когда протогалактический газ уже охлажден до $T \sim 10^4$ K. Облака внутри протогалактики теряют кинетическую энергию через столкновения друг с другом, что вызывает коллапс протогалактики. В облаках начинают формироваться звезды, которые, в свою очередь, охлаждают газ и увеличивают дисперсию скоростей облаков. Благодаря этой энергии рождаются массивные звезды и сверхновые. Коллапс протогалактики медленный ($2 \div 3 \cdot 10^9$ лет), горячий газ выталкивается из районов звездообразования в галактическое гало. Этот процесс может охлаждать

и формировать новые облака или перемешивать газ в существующих молекулярных облаках. Облака продолжают терять кинетическую энергию и падают в направлении галактического центра или, в зависимости от углового момента, на диск. Это важно для обогащения галактики, поскольку тяжелые элементы, выброшенные сверхновыми, не аккумулируются в областях звездообразования, и обогащение облаков не является одновременным со звездообразованием. Более того, звездообразование и обогащение облаков не являются пространственно связанными. Истечение газа, процессы перемешивания определяют процессы обогащения, и области с невысокой скоростью звездообразования могут иметь высокую степень обогащения химическими элементами. Модель рассматривает различные источники производства элементов: звезды $10\div 50 M_{\odot}$, взрывающиеся как SN II, звезды малых и умеренных масс, эволюционирующие в планетарные туманности и белые карлики, а также сверхновые SN Ia. При этом зависимый от металличности выход элементов, приток-отток газа, процессы перемешивания в межзвездной среде, сброс энергии сверхновыми – все сказывается на распределении химических элементов.

Модель Госвами, Прантзоса [150]. Модель химической эволюции гало и диска построена на стандартном формализме [418; 289] в приближении мгновенного круговорота. Классический сет уравнений галактической химической эволюции решен численно для каждой зоны. Функция звездообразования – функция Шмидта с показателем степени 1.5. НФМ [193] учитывает наличие двойных звезд, возраст и металличность, а также зависимости «масса – светимость» и «цвет – величина» (массы звезд от 0.1 до $100 M_{\odot}$). В модели рассмотрены гало и диск, как две независимые системы, не связанные временной последовательностью. Такой подход обусловлен различными процессами, доминирующими в их эволюции, и, соответственно, распределением металличности. Так, в случае диска наблюдения показывают меньшее число звезд, бедных металлами (при $[Fe/H] -1 \div -0.6$), чем предсказывают закрытые “closed-box” модели (проблема G-карликов). Простое объяснение этого факта – диск эволюционирует не как закрытая система, а в него поступает медленно аккрецирующий газ [289]. В случае гало наблюдаемое распределение металличности свидетельствует о недопроизводстве металлов на ранних временах, это может быть следствием оттока вещества, проявляющегося в эволюции гало [157]. Возможно, гало и диск не связаны временной последовательностью. Как показано [453] на основе сохранения углового момента, газ, покидающий гало, попадает скорее в балдж, а не диск. Диск может начать свое формирование с «первичной» металличности, однако с очень небольшой массы газа, что даст небольшое число звезд, бед-

ных металлами. Это еще одно объяснение проблемы G-карликов. В рассматриваемой модели локальный диск построен посредством медленной аккреции газа «первичного» химического состава, со временем аккреции больше 7 млрд лет. Для модели гало принято время формирования 1 млрд лет и отток вещества.

На ранних временах 2–4 млрд лет истории диска отношение SN Ia/SN II все еще мало (с принятой скоростью образования для SN Ia) и большая часть железа производится SN II. Успех модели в описании распределения металличности G-карликов есть следствие учета притока вещества, а не увеличения количества SN Ia, которые становятся основным источником железа около $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -0.5$. В модели использованы два различных набора продукции массивных звезд: 1) расчеты [449] для солнечной металличности (случай A) и 2) зависящий от металличности выход (случай B). Последний случай также рассмотрен в [449] и является основополагающим; случай A рассмотрен только для иллюстрации. В обоих случаях рассмотрен выход (производство) элементов в моделях сверхновых SN Ia с начальным содержанием тяжелых элементов Z : ($Z = Z_{\odot}$) и ($Z = 0$). Производство изотопов железа уменьшено на фактор 2, чтобы описать наблюдаемое поведение отношения $[\alpha/\text{Fe}]$ в гало.

Модели, учитывающие неоднородное обогащение галактики. Влияние вклада от звезд ABГ различных масс на химическое обогащение Галактики активно исследуется в последнее время [139; 118]. Модель [139] рассматривает металлически зависимый выход элементов s-процесса от звезд ABГ с массами порядка 2–4 $M_{\odot}$ и r-процесс, как первичный процесс, основные поставщики – SN II (8–10 $M_{\odot}$). Вклад от r-процесса в обогащение Ba обусловлен выходом бария от звезд 8–10 $M_{\odot}$ (SN II), и этот компонент доминирует при низких металличностях. s-процесс становится доминирующим над r-процессом только после 1 млрд лет галактической эволюции (при $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1$), и это связано с более длинной временной шкалой эволюции звезд малых масс по сравнению с массивными звездами и эффективностью s-продукции в звездах ABГ в зависимости от металличности. Модель неплохо описывает поведения рассматриваемых элементов до $[\text{Fe}/\text{H}] > -2.2$. Для объяснения разброса на низких металличностях, обнаруженном в ряде работ [360; 332] были привлечены неоднородные модели обогащения (Ba [349], Ba, Sr, Eu [22]), расчет проводился N-body/smooth [349] и методом Монте Карло [22].

В недавней работе Кобаяш и др. [189] показано и подчеркнуто, что в Галактике химическое обогащение происходит неоднородно, эффекты неоднородности «отпечатаны» в гало Галактики и могут быть получены из наблюдений звезд гало. Химико-динамическое мо-

делирование галактик типа Млечного Пути позволило установить, что разброс содержаний элементов происходит из-за радиальной миграции звезд, слияния/аккреции галактик-спутников, локальных различий в скоростях образования звезд и химического обогащения, а также вариаций выходов нуклеосинтеза. В моделируемых галактиках не отмечается сильная зависимость «металличность – возраст». Это означает, что звезды бедные металлами не всегда самые старые звезды, и могут быть сформированы в химически непрэволюционировавших облаках в более поздние времена. Долговременные источники химического обогащения, такие как звезды АВГ или слияние нейтронных звезд, могут также внести свой вклад при низких металличностях. Наличие разных выходов нуклеосинтеза играют важную роль в ранней Вселенной или в бедных металлами системах, таких как гало Галактики. Повышенное обогащение углеродом бедных металлами (CEMP) звезд лучше всего объясняется вкладом от массивных коллапсирующих сверхновых, низкие $[\alpha/\text{Fe}]$ отношения в некоторых бедных металлами (EMP) звездах соответствуют выходам от менее массивных сверхновых ($\sim 13\text{--}15 M_{\odot}$).

3.5. Сравнение наблюдательных данных с моделями ГХЭ

Рассмотрим определение источников обогащения элементами путем сравнения их содержаний с различными моделями химической эволюции [357; 237] на примере натрия (рис. 3.2) и марганца (рис. 18 на цветной вкладке и рис. 3.3а, б).

Натрий. Как видно из рис. 3.2, расчеты химической эволюции [416] (точечная линия) и [150] (штриховая линия) не воспроизводят наблюдаемый ход $[\text{Na}/\text{Fe}]$ с металличностью $[\text{Fe}/\text{H}]$. При этом в модели [416] рассмотрен независимый от металличности выход натрия и принято, что гало и диск являются частями одной и той же системы, отличающиеся только по возрасту, а в [150] учтен зависимый от металличности выход натрия и рассмотрены гало и диск как две независимые системы. Любопытно, что в случае принятия независимо-

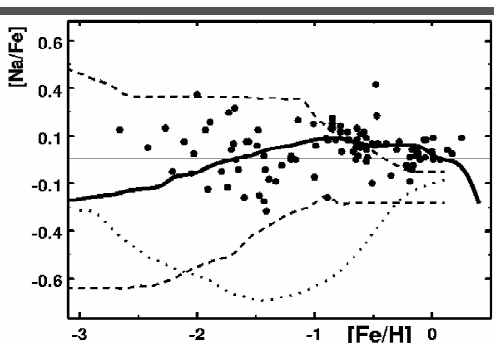


Рис. 3.2. Тренд $[\text{Na}/\text{Fe}]$ от $[\text{Fe}/\text{H}]$: черные кружки – [357]; точечная линия – [416]; сплошная линия – [334]; штриховая линия – [150]

го выхода натрия от металличности (штриховая линия), поведение натрия в модели [150] аналогично поведению α -элементов (Mg, Si), этот случай отмечен авторами как нереалистичный. Модель [334] (сплошная линия) неплохо описывает тренд натрия с металличностью, полученный [357]. При этом в модели используется зависимый от металличности выход натрия и производится учет большого числа параметров (приток-отток газа, процессы перемешивания в межзвездной среде, сброс энергии сверхновыми и др.), существенным образом меняющих распределение химических элементов и, в частности, натрия. Вероятнее всего, основным источником производства натрия являются процессы нейтронного и (или) протонного захвата, имеющие место в SN II.

Марганец. Содержания марганца Mn проанализированы для 247 F-, G-, K-карликов, расположенных в галактическом диске, с металличностями $-1 < [\text{Fe}/\text{H}] < +0.3$. Исследуемые звезды принадлежат к толстому и тонкому дискам Галактики и к потоку Геркулеса [237].

На рис. 18 на цветной вкладке приведены соотношения $[\text{Mn}/\text{Fe}]$ с металличностью $[\text{Fe}/\text{H}]$ для исследуемых звезд, а также из компиляции данных других авторов (подробно ссылки на использованные работы см.: [237]).

Рассмотрено производство марганца и железа в маломассивных SN Ia и массивных коллапсирующих сверхновых (CCSN, сверхновых II типа). В диапазоне металличности исследуемой выборки звезд отношение $[\text{Mn}/\text{Fe}]$ возрастает с увеличением металличности (рис. 3.3 а). Это обусловлено вкладом в галактическую химическую эволюцию марганца и железа от массивных сверхновых (CCSN). В пределах наблюдаемого разброса на рис. 18 (на цветной вкладке) большинство звезд гало показывают среднее содержание марганца около $[\text{Mn}/\text{Fe}] \sim -0.4$. Учитывая, что согласно современным расчетам CCSN производят около 30–50% наблюдаемого Fe в Солнечной системе; это означает, что 12–20% солнечного содержания Mn производится CCSN.

Для оценки вкладов от SN Ia и определения источников производства марганца, проведено сравнение отношений $[\text{Mn}/\text{Fe}]$ и

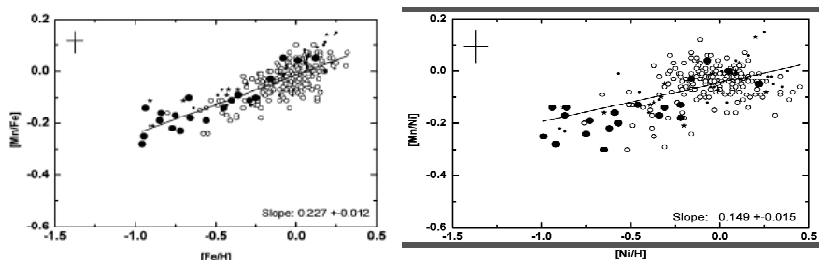


Рис. 3.3 (а, б). Зависимость $[\text{Mn}/\text{Fe}]$, $[\text{Mn}/\text{Ni}]$ от $[\text{Fe}/\text{H}]$, $[\text{Ni}/\text{H}]$ [237]

$[\text{Mn}/\text{Ni}]$ с $[\text{Fe}/\text{H}]$ и $[\text{Ni}/\text{H}]$ соответственно. Дело в том, что Mn и Fe производятся в SN Ia и их выход зависит от металличности звезды-прародителя: выход Mn увеличивается с металличностью прародителя сверхновой SN Ia, а для Fe – уменьшается. В то же время производство Ni не зависит от начальной металличности, и его можно использовать в качестве референс-элемента.

Заметим, что воспроизведение наблюдаемой зависимости $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ от металличности в Галактике является сложной задачей для моделирования ГХЭ как в гало, так и в галактическом диске [150; 190]. В то же время сделанные в модели ГХЭ допущения могут быть важным источником неопределенности. Современные проблемы воспроизведения тренда $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ в Галактике связаны с существующими ограничениями в области теоретических звездных моделей и, как следствие, звездных выходов, используемых в ГХЭ моделировании. С другой стороны, подтверждение теоретических результатов возможно для SN Ia с массами, близкими к чандрасекаровской массе ($\sim 1.44 M_{\odot}$), причем выбросы (выходы) в этих объектах дают высокое отношение Ni/Fe и низкое Mn/Ni [1]. Это означает, что отношения $[\text{Mn}/\text{Ni}]$ могут быть также использованы, чтобы различать разные популяции SN Ia вместе с соотношением $[\text{Mn}/\text{Fe}]$, но без влияния зависимости от металличности, связанной с выходами от SN Ia. Данные о содержаниях для Mn, Fe и Ni имеют важное значение для изучения производства элементов Fe-пика в SN Ia. Т. о. для исследования химической эволюции, направленной на получение надежных данных о нуклеосинтезе Mn, следует рассмотреть Fe и Ni в качестве референс-элементов. Сравним содержание Mn и Ni (см. рис. 3.3 б). Средняя погрешность для $[\text{Mn}/\text{Ni}]$ составляет около 0.15 dex [237]. Для рассматриваемой выборки звезд средний наблюдаемый наклон для $[\text{Mn}/\text{Fe}]$ относительно $[\text{Fe}/\text{H}]$ составляет 0.227 ± 0.012 , в то время как для $[\text{Mn}/\text{Ni}]$ относительно $[\text{Ni}/\text{H}]$ 0.149 ± 0.015 . Они отличаются, но находятся в пределах 2σ . Из соображений, приведенных выше, можно было ожидать, что будет наблюдаться более крутой наклон для $[\text{Mn}/\text{Fe}]$ по сравнению с $[\text{Mn}/\text{Ni}]$. Это говорит о том, что имеется зависимость выхода Fe от металличности в нуклесинтезе от SN Ia, и это может играть определенную роль в трендах $[\text{Mn}/\text{Fe}]$ и $[\text{Ni}/\text{Fe}]$. Последствия этого в отношениях вкладов от различных сверхновых SN Ia в содержание Mn, Fe и Ni еще предстоит исследовать. На данный момент наблюдательная дисперсия для звезд тонкого диска и небольшой выборки звезд толстого диска не позволяет сделать количественные выводы.

Отметим, что основные источники вклада в содержание марганца при металличностях, близких к солнечным, вносят массивные коллапсирующие сверхновые и сверхновые SN Ia с разными

массами, в большей степени субчандрасекаровских масс ($\sim 1.4 M_{\odot}$, маломассивных) и в меньшей степени более массивные.

Ряд работ представляет химическое обогащение отдельных подструктур Галактики, не только диска и гало. Так, например, [201] исследования лучевых скоростей и содержаний элементов O, Na, Mg, Al, Si, Ca, Cr, Fe, Co, Ni и Cu для выборки 156 красных гигантов (КГ) в двух галактических областях балджа показали, что балдж содержит звезды с заметно различающимся химическим составом, который отличается от значений локального толстого диска, особенно при $[Fe/H] > \sim -0.5$. В частности у таких звезд отношения $[\alpha/Fe]$ могут быть более высокими, чем у звезд толстого диска, а также элементы Fe-пика, Co, Ni, Cu показывают более высокие содержания по сравнению с диском. Существует также некоторые свидетельства тому, что $[Na/Fe]$ (но не $[Al/Fe]$) тренды с металличностью для балджа и локального диска могут отличаться при низкой и высокой металличности. Получено, что дисперсия скоростей убывает с увеличением $[Fe/H]$ для обеих рассмотренных областей, и не обнаруживает какой-либо значительной холодной высокоскоростной популяции. Сравнение с моделями химического обогащения указывает на то, что может потребоваться значительная часть гиперновых, чтобы объяснить ход содержаний элементов в балдже, где на данный момент не включены вклады от звезд с массами $M > 40 M_{\odot}$, в частности из-за несоответствия с данными содержаний элементов Fe-пика. Сравнение со звездами ШС (NGC 6553), для большинства элементов показывает содержания подобные звездам балджа со сравнимой металличностью. Однако разброс от звезды к звезде и средние значения отношения $[Na/Fe]$ выше в скоплении, что может свидетельствовать о самообогащении скопления.

3.6. Химическая эволюция меди и цинка

На примере меди и цинка сделаем детальный анализ обогащения этими элементами, зависимости их содержаний от металличности и источников их производства [12]. Эти два элемента занимают промежуточное положение между элементами Fe-пика и элементами, образующимися в процессах нейтронного захвата. Госвами и Прантзос [150], например, относят их к элементам Fe-пика. Однако вклад в содержание этих элементов вносят различные источники – нейтронный захват в массивных звездах, s-процесс в звездах низких и средних масс, взрывной нуклесинтез в сверхновых различных типов.

С наблюдательной точки зрения содержания Cu и Zn исследовались Снеденом и Крокер [355] и Снеденом и др. [356]. Их данные поддерживали производство Zn как первичного элемента (т. е. с постоянным выходом относительно железа) и Cu как вторичного (т. е. с

пропорциональным выходом относительно железа, произведенного в предыдущих поколениях звезд). Позже в работе [92] изучались содержания этих двух элементов в отдельных звездах гало и диска, а также в звездах шарового скопления ω Центавра [386] и в ультрабедных металлами звездах UMP [400]. Измерение Zn в Ly_α системах [234; 430] пополняет этот список на эпоху формирования Галактики. В Ly_α системах наблюдается многократное повторение линии водорода Ly_α в спектрах далеких астрономических объектов. Эффект обусловлен прохождением света через облака HI, которые находятся на разных красных смещениях. Однако во всех этих работах повторялись первые попытки анализа вклада от тех или иных источников. Первое схематическое описание эволюции этих элементов было сделано Снеденом и др. [356], которые предположили, что слабый s-процесс является основным источником производства данных элементов. Этот вывод был пересмотрен в работе [314], в которой был обнаружен заметный вклад от относительно долгоживущих звезд, идентифицированных авторами как сверхновые SN Ia. В противовес этому предположению Тиммес и др. [416], опираясь на расчеты Вусли и Вивера [449], предположили, что массивные сверхновые SN II являются основными поставщиками меди и цинка.

3.6.1. Нуклеосинтез и химическая эволюция меди и цинка

Сравнение с расчетами моделей химической эволюции Тиммеса и др. [416] и Матьюччи и др. [90] показывает неудовлетворительное описание поведения рассматриваемых элементов. При этом Тиммес и др. [416] рассматривают в качестве основного источника вклада в производство меди горение Ne в массивных звездах, взрывающихся как сверхновые SN II, а цинк формируется в процессах взрывного горения Si. Модель Матьюччи и др. [90] включает заметный вклад от сверхновых SN Ia, однако все же не описывает в достаточной степени поведение содержания Cu при низких металличностях. Работы последних лет показали, что эта неудача в описании может быть связана с некоторыми фундаментальными трудностями в вычислениях предсверхновой и взрывного нуклеосинтеза для ядер после Fe-пика, в которых, действительно, получено заметное перепроизводство таких ядер. Пересмотр входных данных и сечений ядерных реакций несколько облегчил трудности по сравнению с расчетами Вусли и Вивера [449], но все же проблема до конца не решена [161], и надо с осторожностью относиться к расчетам SN II. Подобная картина наблюдается и в случае SN Ia [370; 398], и только вклад от главного компонента s-процесса, выходящий от долгоживущих звезд ABГ [118; 260], относительно хорошо установлен, однако он невелик.

3.6.2. Производство меди и цинка

Рассматривая поведение содержания Cu, мы видим, что тренд на рис. 3.4 можно интерпретировать, принимая, что вклад в содержание Cu от долгоживущих звезд выше, чем в случае железа. Более детальное рассмотрение говорит о том, что эти два элемента не связаны простым отношением. Рис. 3.5 демонстрирует нам, что действительно их относительный тренд требует, по крайней мере, полиномиальной квадратичной функции для его описания. Линия на рис. 3.5 соответствует минимальному разбросу подгонки и свидетельствует о том, что соотношение между рассматриваемыми элементами сложнее, чем чистый первичный или чистый вторичный процесс.

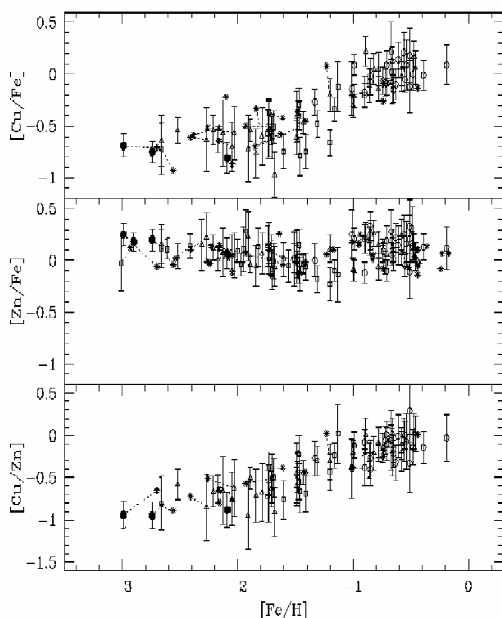


Рис. 3.4. Тренд $[Cu/Fe]$, $[Zn/Fe]$ и $[Cu/Zn]$ от $[Fe/H]$. Символы: звезды гало (открытые треугольники), звезды диска (кружки), и звезды, перекрывающейся области толстого диска и гало (открытые квадраты); остальные обозначения см. [12]. Точечная линия соединяет точки, представляющие наблюдения тех же самых звезд различными авторами. Бары – ошибки определения содержаний элементов для отдельных звезд согласно приведенным в оригинальных статьях

Если время жизни звезды настолько короткое, что этим можно пренебречь в вычислениях галактической химической эволюции, вторичный элемент S достигает содержания:

$$X^S = 1/2 y^S y^{Fe} [f(t)]^2, \quad (3.24)$$

где y^S – так называемый объединенный эффективный выход элемента S, произведенный целым поколением звезд. Если μ – остаточная галактическая масса в форме газа, то:

$f(t) = [\ln \mu^{-1}]$ для моделей закрытых (галактическое гало) и $f(t) = [\ln \mu^{-1-1}]$ для моделей с притоком газа (галактический диск: см. выше).

Первичный элемент, подобно Fe (или, лучше сказать, его вклад от короткоживущих объектов, чьей продолжительностью жизни можно пре-

небольшую), описывается следующим образом

$$X^P = y^P [f(t)], \quad (3.25)$$

так, чтобы отношение X^S/X^{Fe} было пропорционально $f(t)$ и, следовательно, отношению X^{Fe}/y^{Fe} .

Вычислив логарифмы, получаем, что $[S/Fe] = [Fe/H] + \text{const}$, следовательно, на рис. 3.5 чистый вторичный элемент имел бы линейный тренд с наклоном +1. Напротив, в области $-2 < [Fe/H] < -0.5$, где существует почти линейный тренд, наблюдае-

мый наклон приблизительно 0.6 (рис. 3.6). Следовательно, уже на ранних временах галактической эволюции (стадии гало) Cu не может рассматриваться как чистый вторичный элемент. Такое поведение меди можно объяснить суперпозицией, по крайней мере, двух независимых процессов: один – первичного происхождения и другой – вторичного происхождения. Действительно, суммируя два компонента, определенных уравнениями (3.24) и (3.25), получаем:

$$[Cu/Fe] = +B (X(Fe)/X(H)) + C (X(Fe)/X(H))^2, \quad (3.26)$$

где A, B, C известные функции солнечного содержания Cu и Fe, и эффективного интегрального выхода Fe и Cu от первичных и вторичных процессов.

Отношение $[Cu/Fe]$ описывается параболой для данных содержаний Cu при рассматриваемых металлическихностях, как можно видеть на рис. 3.7. Следовательно, Cu может иметь вклады и от первичных, и от вторичных процессов в короткоживущих, то есть массивных звездах.

Вклад от вторичных механизмов может быть ко-

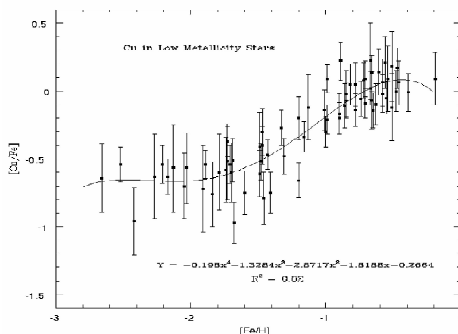


Рис. 3.5. $[Cu/Fe]$ от $[Fe/H]$: заполненные квадраты – наблюдения (см. рис. 3.4). Сплошная линия – показывает, что зависимость $[Cu/Fe]$ от $[Fe/H]$ более сложная, чем подразумеваемый первичный или вторичный механизмы

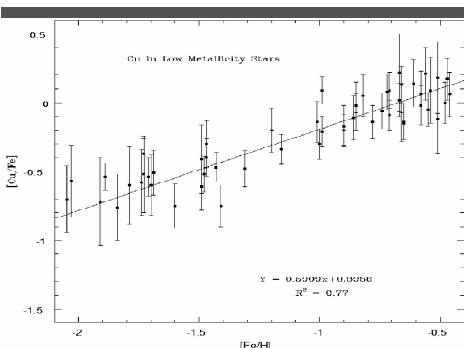


Рис. 3.6. $[Cu/Fe]$ в области $-2 < [Fe/H] < -0.5$. Наклон – около 0.6

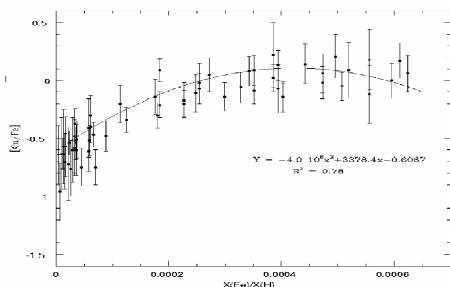


Рис. 3.7. $[\text{Cu}/\text{Fe}]$ в функции отношения $X(\text{Fe})/X(\text{H})$. Тренд параболический

Хофмана и др. [165], в которых описано производство в массивных звездах изотопов до $A = 100$. Добавив выход от звезд с массами 15, 20 и 25 $M_{\odot}$ из указанной работы и приняв начальную функцию масс в виде $\psi(M) = M^{-2}$, можно легко убедиться, что эти модели должны произвести около 78% солнечного содержания ^{80}Kr .

В таком случае, переходя к изотопам Cu, можно констатировать, что массивные звезды дают приблизительно 23% вклада от вторичных процессов (считая, что нет никакого первичного вклада от тех же самых массивных звезд). Отметим, что прогнозы [90; 314], находятся в хорошем согласии с полученным результатом (они предсказывают около 26%). Ниже металличности $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.5$ отношение $[\text{Cu}/\text{Fe}]$ достигает плато около -0.6 dex. Так как 70% железа про-

изводится сверхновыми Ia типа, это подразумевает, что первичный вклад от массивных звезд населения II равен $10^{-0.6 \pm 0.3}$, т.е. полный вклад всего 7.5%. В работе [161] было показано, что очень массивные звезды населения III не могут давать заметный вклад в Cu от первичных процессов. Можно также исключить первичный вклад от массивных звезд обусловленный г-процессом.

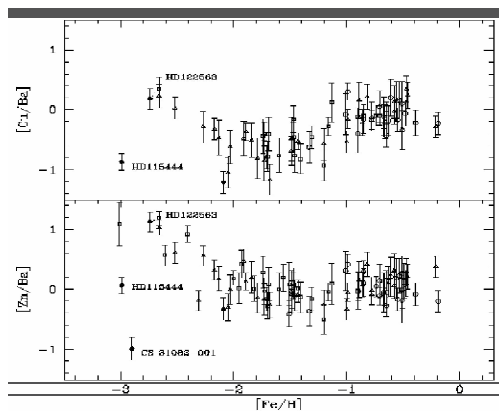


Рис. 3.8. $[\text{Cu}/\text{Ba}]$ и $[\text{Zn}/\text{Ba}]$ vs $[\text{Fe}/\text{H}]$. (Символы – как на рис. 3.4)

изводится сверхновыми Ia типа, это подразумевает, что первичный вклад от массивных звезд населения II равен $10^{-0.6 \pm 0.3}$, т.е. полный вклад всего 7.5%. В работе [161] было показано, что очень массивные звезды населения III не могут давать заметный вклад в Cu от первичных процессов. Можно также исключить первичный вклад от массивных звезд обусловленный г-процессом. Рис. 3.8, где приведены тренды Cu и

Zn относительно Ba, действительно показывает, что при низких металличностях содержания Cu и Zn остаются высокими, возможно даже возрастающими по отношению к Ba.

На ранних стадиях галактической эволюции содержание Ba обусловлено г-процессом, вклад которого резко уменьшается после $[Fe/H] = -2.5$ [139]. Cu и Zn ведут себя по-другому, и их первично-подобный вклад от массивных звезд не может контролироваться теми же самыми механизмами (и, вероятно, имеет, по крайней мере, частично вклад от других взрывных явлений). Конечно, нельзя исключить из этой оценки некоторый вклад от г-процесса, однако он не является доминирующим.

Подытожим результаты анализа наблюдаемых данных и сравнения с другими элементами и изотопами известного происхождения, основанные на достаточно схематичном описании химического обогащения галактического гало. Найдено, что первичный вклад в обогащение Cu от массивных звезд равняется $\sim 7.5\%$ его содержания, в то время как около 25% поступает от вторичных процессов, имеющих место в тех же самых звездах (слабый s-процесс). Еще 5% поступают от уже упомянутого главного s-компонента – от долгоживущих звезд АВГ. При этом часть (формально 62.5%) поступает от менее изученных процессов, таких как взрывной нуклеосинтез в сверхновых типа Ia. Вклад от SN Ia изменил бы содержание Cu на более поздних временах из-за большей продолжительности жизни звезд-предшественников, и таким образом мог бы сделать функциональное отношение между $[Cu/Fe]$ и $[Fe/H]$ довольно сложным, что и видно на рис. 3.5. Т. о. независимо мы приходим к заключениям, качественно подобным (хотя и различающимся количественно), предложенным Маттьюччи и др. [90].

Подобное рассуждение может быть повторено для Zn, который, однако, показывает тренд, очень близкий к Fe. Приписываем 3% его производства главному компоненту s-процесса в звездах АВГ, остальное должно поступить также от первичного нуклеосинтеза в массивных звездах (около 30%) и от сверхновых типа Ia (около 67%, как и в случае Fe). Вклад от выхода г-процесса в массивных звездах не может быть значительным, но все же некоторый вклад остается возможным.

3.6.3. Галактическое обогащение Cu и Zn: тестирование и некоторые заключения

С предположениями, полученными в предыдущем параграфе, построим модель химического обогащения Галактики медью и цинком. Для этой цели взята уже имеющаяся галактическая модель, которая основана на общих представлениях о звездообразовании, нуклеосинтезе, репродуцирующая большой набор галактических и внегалактических особенностей и проверенная ранее для других элементов (мо-

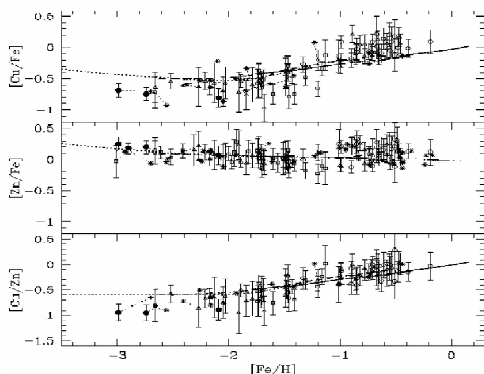


Рис. 3.9. Галактическая эволюция $[Cu/Fe]$, $[Zn/Fe]$, $[Cu/Zn]$ согласно теории химической эволюции, описанной в тексте (включая первичные процессы от массивных звезд, вторичные процессы от SN II, от AGB звезд, и SN IA вкладов). Символы – как на рис. 3.4

зовались первичными и вторичными вкладами от массивных звезд (SN II), сверхновых типа Ia и от звезд AGB, представленными выше.

На рис. 3.9 и 3.10 показано результирующее химическое обогащение, посредством $[Cu/Fe]$, $[Zn/Fe]$, $[Cu/Zn]$ и $[Cu/Ba]$, $[Zn/Ba]$ vs $[Fe/H]$. Предсказания химической эволюции Ba взяты из [22].

Как видно из рис. 3.9, расчеты неплохо согласуются с наблюдениями и подтверждают, что принятые предположения о величинах вкладов

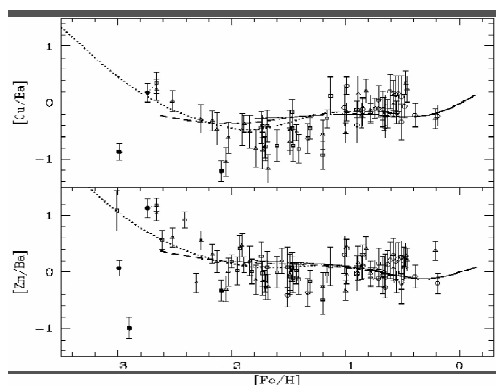


Рис. 3.10. Зависимости $[Cu/Ba]$ и $[Zn/Ba]$ от $[Fe/H]$. Символы – как на рис. 3.4

дель Феррини и др.) [119]. Более подробное описание модели (см. раздел 3.4.1). Для расчета химической эволюции Cu и Zn первоначальная программа расчета [119] была модифицирована. Были использованы распределения металличности и функции звездообразования, полученные в работе [139], и описания обогащения тяжелыми элементами из [22]. Модель рассматривает Галактику, разделенную на три зоны, гало, толстый диск и тонкий диск. Для входных данных по содержанию Cu и Zn мы воспользовались

первичными и вторичными вкладами от массивных звезд (SN II), сверхновых типа Ia и от звезд AGB, представленными выше. На рис. 3.9 и 3.10 показано результирующее химическое обогащение, посредством $[Cu/Fe]$, $[Zn/Fe]$, $[Cu/Zn]$ и $[Cu/Ba]$, $[Zn/Ba]$ vs $[Fe/H]$. Предсказания химической эволюции Ba взяты из [22]. Как видно из рис. 3.9, расчеты неплохо согласуются с наблюдениями и подтверждают, что принятые предположения о величинах вкладов в обогащение в целом должны быть правильными. Однако они правильно интерпретируют общий ход зависимости, но не могут объяснить распределение содержания при очень низких металличностях. Это отчасти связано с упрощенным выходом Cu и Zn от массивных звезд, обусловленным отсутствием критериев для выявления различных процессов нуклеосинтеза в звездах различных масс.

В расчетах галактической эволюции [139] за r -процесс ответственны умеренно массивные ($8\text{--}10 M_{\odot}$) звезды, выбрасывающие продукты нуклеосинтеза после некоторой задержки по сравнению с выбросом продуктов нуклеосинтеза очень массивными объектами; это и было принято как возможное объяснение задержки появления Eu и Ba по отношению к кислороду O и железу Fe [139]. Используя то же самое разделение массивных звезд на две группы с различными временными масштабами обогащения, можно уточнить предположения о происхождении Cu и Zn, пытаясь отделить вклад r -процесса от других источников. Действительно, если продукты r -процесса становятся хорошо перемешанными в Галактике только после $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.5$, мы можем попытаться интерпретировать разброс содержания Cu и Zn для очень бедных металлами звезд, как признак того, что они были рождены из облаков, выборочно «загрязненных» продуктами различных типов сверхновых звезд, иногда несущих знак r -процесса, иногда – NSE (ядерный статистический равновесный процесс) или иного явления взрывного нуклеосинтеза, в плохо перемешанной ранней Галактике.

Более глубокое понимание вкладов от массивных звезд в обогащение Cu и Zn при $[\text{Fe}/\text{H}] < -2$ может быть получено путем анализа нескольких очень бедных металлами (UMP) звезд подобно HD 115444 [400], HD 122563 [400; 12], BD+173248 [377] и CS 31082-001 [127], используя содержания Cu и/или Zn и их отношения к содержанию Ba или Eu. Как пример возьмем чрезвычайно обогащенную r -процессом (в 40 раз превышающую солнечный) UMP звезду CS 31082-001 и рассмотрим его содержание как фактически «чистый» r -процесс (то есть его вклад доминирует над любым другим механизмом нуклеосинтеза). Поскольку мы знаем, что r -процесс вносит 20% в содержание Ba в Солнечной системе [18], то можем получить непосредственно вклад r -процесса в содержание Zn (содержание Cu не определено для этой звезды). Из этого сопоставления получаем 2% вклада r -процесса в содержание Zn. Применение этой же самой идеи для Cu (например, для HD 115444) позволяет получить долю r -процесса в содержании Cu в 2%, которые в этом случае есть верхний предел, поскольку эта звезда не настолько обогащена продуктами r -процесса, чтобы исключить другие вклады.

К сожалению, простая схема, которая работает прекрасно для тяжелых r -элементов, должна быть принята с большой осторожностью для более легких элементов ($A < 140$). Действительно, наблюдаемые содержания в звездах населения II, особенно UMP класса, постепенно привели к мысли, что единого механизма r -процесса, обеспечивающего обогащение и тяжелыми, и легкими r -элементами, не существует [117; 400]. Связь изотопных аномалий с радиоактивными ядрами в Солнечной системе, изложенная в [440], позволила предложить

галактическую модель обогащения, в который r -процесс, по крайней мере, бимодальный, с участием различных типов сверхновых звезд, ответственных за производство тяжелых ($A > 140$) и легких ($A < 140$) ядер. Можно только предполагать, что разнообразие компонентов r -процесса может увеличить разброс при низких металличностях.

Напротив, первичный выход от массивных звезд может получить некоторое независимое подтверждение при внимательном рассмотрении распределения индивидуального содержания UMP звезды. Исследование галактической химической эволюции Sr, Y, и Zr [423] показало, что содержание этих элементов в UMP звездах предполагает существование первичного процесса нейтронного захвата в массивных звездах (не классический r -процесс). Как обсуждено в [423], это должно также дать вклад около 20–25% в их содержание в Солнечной системе. Воспользуемся простой процедурой, подобной описанной ранее, чтобы получить r -долю в содержании Cu и Zn. Рассмотрим HD 122563 как типичную звезду, обогащенную элементами нейтронного захвата, встречающегося на продвинутых стадиях эволюции массивных звезд (n -процесс). Это подразумевает отношение $[(\text{Sr}, \text{Y}, \text{Zr})/(\text{Ba}, \text{Eu})]$ намного выше, чем среднее значение их содержаний при этих же металличностях [423]. Отсюда мы можем получить первичный вклад в Cu и Zn от n -процесса около 7% и 30% соответственно.

Т. о. общий вклад от массивных звезд может быть установлен, исходя непосредственно из рассмотренной базы данных, несмотря на отсутствие надежных расчетов нуклеосинтеза. Он может быть обусловлен взрывным горением Si, NSE условиями, или относительно быстрым нейтронным захватом. Из-за сложности r -процесса невозможно определить его вклад точно. Однако есть основание предположить, что разброс на низких металличностях может быть увеличен за счет различных примесей от вкладов различающихся r -процессов или других взрывных явлений в сверхновых и/или слияния/слипания нейтронных звезд и черных дыр.

При отсутствии точных расчетов теорий нуклеосинтеза была сделана попытка определить подходящие механизмы на основе анализа наблюдений и эволюционных трендов, ожидаемых для выходов различных ядерных процессов. Оказалось, что несколько механизмов нуклеосинтеза ответственны за производство Cu и Zn. Этот подход был, однако, слишком схематичен для интерпретации деталей рассмотренной базы данных, включая разброс при очень низких металличностях. Этот разброс может быть следствием плохо перемешанных различных вкладов от массивных звезд в неомогенной ранней стадии Галактики (возможно также усложненный разнообразием r -процесса). При этом можно заключить, что простое разделение выходов для Cu и Zn от пер-

вичных и вторичных процессов и в долгоживущих, и в короткоживущих предшественниках является возможным, и дает предварительные рекомендации для будущих моделей нуклеосинтеза. Однако не был найден надежный механизм для разделения вкладов от двух γ -процессов, или от остальных механизмов. Для понимания основных физических процессов, происходящих в проэволюционировавших звездах, необходимы более детальные расчеты нуклеосинтеза.

3.7. Сравнение различных моделей ГХЭ

В этом разделе рассмотрим возможности различных современных моделей и кодов с учетом самых последних расчетов нуклеосинтеза в описании наблюдательных галактических трендов элементов. Так, наблюдения C и N содержаний в старых звездах ранней Галактики может рассказать об их выходах в коллапсирующих в ядре сверхновых (CCSN), в массивных быстро вращающихся звездах-предшественниках; или о производстве этих элементов в звездах ABГ (AGB), которые являются наиболее важным источником C и N в галактическом диске и на Солнце [126; 10; 420; 296; 365; 269]. Легкие α -элементы O и Mg свидетельствуют об эволюции массивных звезд-предшественников [411], в то время как более тяжелые α -элементы (Si, Ca, Ti) и элементы группы Fe при низких металличностях в основном были произведены во взрывном нуклеосинтезе, в массивных сверхновых CCSN [449; 448; 258], а затем и в менее массивных SN Ia, которые начинают вносить свой вклад в галактический реестр химических элементов на более поздних временах [421]. Химическая эволюция тяжелых элементов позволяет наложить ограничения на теоретическое моделирование s-процесса [402] и γ -процесса [446], а также на широкий круг менее известных процессов нуклеосинтеза, таких как i-процесс [96; 91; 40; 98; 251; 82; 381; 392] и/или компоненты нейтриноиндуцированного ветра от взрывов сверхновых [88; 309; 265; 177; 19; 155; 439; 211]. Заметим, что результаты моделирования ГХЭ зависят также от допущений и упрощений, сделанных в моделях ГХЭ [137], а также от принятых выходов элементов в соответствующих расчетах нуклеосинтеза.

На рис. 19 (на цветной вкладке) приведено сравнение результатов, полученных для выборки 10 детально исследованных звезд и для звезд, исследованных другими авторами с расчетами (треки) моделей ГХЭ, выполненными с использованием различных кодов, различных предположений и звездных выходов [270]. В пределах погрешностей наблюдений в целом 10 изученных звезд показывают закономерности в содержании элементов, согласующиеся со средним ходом химического обогащения, полученного в работах других авторов.

Черные линии отражают **расчеты по коду OMEGA** (для однозонных моделей). Этот простой код предназначен для рассмотрения глобальных тенденций (трендов), порожденных (обусловленных) набором звездных выходов, и обеспечивает простую в использовании платформу для тестирования и сравнения звездных моделей. Код учитывает приток первичного газа и галактические оттоки, вызванные звездообразованием [429]. История формирования звезд, темная материя и масса газа являются входными параметрами, чтобы описать (воспроизвести) эволюцию отдельной галактики, в данном случае Млечного Пути. Код OMEGA (<https://github.com/NuGrid/NUPYCEE>) предполагает однородное перемешивание, но учитывает задержку между образованием звезд и звездными выбросами, т. е. выходами элементов. Формирование каждой звездной популяции моделировалось, используя код SYGMA (С. Риттер и др., частное сообщение), следуя во времени и рассматривая для каждой популяции возраст, массу и металличность. В расчетах по коду OMEGA были использованы NuGrid AGB выходы элементов звезд малых и промежуточных масс [267]. Сверхновые типа Ia включены с распределением учета задержки (запаздывания) времени в виде t^{-1} [216] и выходами из [412]. Черные сплошные и прерывистые линии на рис. 19 (на цветной вкладке) отражают выходы от массивных звезд (Вест и Хегер, частное сообщение) и для масс звездных остатков [227] соответственно. Черные пунктирные линии представляют расчеты по NuGrid Set 1 с добавлением выходов от массивных звезд, используя массы звездных остатков согласно [86], наряду с выходами для нулевой металличности (Вест и Хегера, частное сообщение). Выходы от массивных звезд учитываются только от звезд с начальной массой от 8 до 30 $M_{\odot}$ (для звезд более массивных, чем 30 $M_{\odot}$ выходы не были рассмотрены). Для выходов вещества r-процесса был рассмотрен только вклад от слияний нейтронных звезд. Для распределения выходов, в зависимости от времени для каждого звездного населения, использовалось распределение времени задержки согласно стандартным моделям [109]. Предполагалось, что каждое слияние нейтронных звезд «выталкивает» общую массу, равную 0.01 $M_{\odot}$ с химическим составом r-процесса, соответствующим приведенному в [20].

Модели ГХЭ Бистерзо и др. [138] показаны на рис. 19 (на цветной вкладке) красными линиями. Этот код [22; 142] основан на коде Феррини и др. [119] и учитывает состав звезд, звездных остатков, межзвездного вещества (атомная и молекулярная составляющие газа), а также их взаимодействия друг с другом, в трех основных зонах Галактики – гало, толстом и тонком дисках. Химическая эволюция рассчитывается внутри солнечного кольцевого пространства, расположенного на 8.5 кпк от

центра Галактики. Тонкий диск делится на ряд независимых концентрических колец. Химическая эволюция регулируется СЗО, НФМ и выходами нуклеосинтеза от звезд различных масс и населений (популяций). СЗО определена самосогласованно как результат агрегации (объединения в одну систему), взаимодействия и обменных процессов межзвездного газа, которое может происходить спонтанно или стимулироваться присутствием других звезд. Матрица элементов и выходы элементов были обновлены [138]. Что касается тяжелых элементов, выходы элементов г-процесса взяты из [139]. Для элементов тяжелее Ba, вклад г-процесса в солнечное содержание получен путем вычитания s-фракции из солнечных содержаний элементов (так называемый г-процесс остаточный метод $N_r = N_\odot - N_s$). Вслед за наблюдаемой тенденцией к уменьшению тяжелых элементов нейтронного захвата в ранней Галактике определен г-вклад в первичный (основной) процесс, происходящий в коллапсирующих в ядре сверхновых в ограниченном диапазоне масс звезд-предшественников (сверхновые 8–10 $M_\odot$). Как обсуждалось ранее [142], был включен дополнительный первичный вклад (LEPP, *lighter element primary process*), чтобы интерпретировать наблюдаемый ход для легких элементов нейтронного захвата (как Sr-Y-Zr). Что касается массивных звезд, для этой работы были взяты выходы: 1) для массивных звезд от 13 до 30 $M_\odot$ (Вест и Хегера, частное сообщение); 2) для звезд более массивных, чем 30 $M_\odot$ [202; 80] (до молибдена); 3) для менее массивных сверхновых типа Ia из [424].

Зеленая сплошная линия соответствует расчетам, связанным с **моделью химической эволюции солнечной окрестности**, описанной [385], реализованной с пакетом **программного обеспечения GEtool** [124]. Выходы нуклеосинтеза были взяты из [449; 187; 264] для CCSN, звезд ABГ и CN Ia соответственно. Линейная экстраполяция выходов в результате взрывного синтеза в CCSN для звезд с массами от 40 до 60 $M_\odot$ выполнена по Гибсону [137], распределение масс звезд (НФМ) взято по [193]. Использовался двойной приток газа, с быстрым начальным притоком (выпадением) газа в свободной шкале времени (50 млн лет), соотносящийся с фазой гало. За ней следует более затяжная фаза «выпадения» на экспоненциальном масштабе времени 10.5 млрд (после задержки 500 млн лет по отношению к фазе гало). Закон звездообразования – закон Шмидта, принимающий скорость образования звезд пропорциональной квадрату локальной поверхностной плотности газа с фактором эффективности 0.06 на млрд лет. Полная модель ограничена локальной суммарной поверхностной плотностью масс 55 $M_\odot/\text{пс}^2$ в окрестности Солнца. Выходы г-процесса были оценены с использованием остаточного метода, то есть соответствовали разнице между солнечными содержани-

ями и предсказаниями s-процесса.

И, наконец, результаты **модели “ICE” для неоднородной химической эволюции** показаны поперечными пурпурными символами для O, Mg, Si, Ca и Eu. Модель ICE (*inhomogeneous chemical evolution*) может отслеживать неоднородности в межзвездной среде по сравнению с другими моделями ГХЭ, которые используют приближение мгновенного перемешивания. Неоднородности в этой модели приводят к разбросу наблюдаемых содержаний элементов, особенно при низких металличностях, до того, как достаточное количество событий (взрывов и перемешивания) приводят к средним значениям. Основная процедура итерации – один шаг (10^6 лет).

Первичный газ падает в объем моделирования. СЗО рассчитывается с помощью закона Шмидта – Кенникатта со степенью 1.5. Чтобы вызвать образование звезд, ячейки выбраны случайным образом, однако ячейки более высокой плотности являются предпочтительными. Масса молодых (новорожденных) звезд выбирается случайным образом из НФМ Солпитера (с наклоном -1.35). Вновь рожденные звезды имеют химический состав локальной МЗС. Время жизни звезды вычисляется через отношение «возраст – продолжительность жизни», полученное Женевской группой звездной эволюции и нуклеосинтеза [250]. Оно зависит от начальной массы звезд, которые достигли конца своего срока жизни и будут или проходят фазу взрыва коллапсирующих в ядре сверхновых CCSN (со звездными выходами, заданными [411]), или «сбросили» преобразованное вещество в МЗС, эволюционируя как планетарные туманности. Фракция, равная $9 \cdot 10^{-4}$ от всех двойных систем звезд промежуточных масс, приводит к взрыву сверхновой типа Ia, с химическим составом выброшенного вещества, взятого из [261] (модель выходов CDD2). Фракция, равная $3.8 \cdot 10^{-4}$ от двойных систем звезд высоких масс, заканчивается слиянием нейтронных звезд после того, как обе звезды независимо друг от друга взорвалась как CCSN, и прошло время задержки (или время слияния) 10 млн лет. Выбросы в этом случае взяты из [273], следуя солнечному распределению r-процесса. Звезды в окружающей МЗС обогащены выбросами соответствующего события нуклеосинтеза (от взрывов сверхновых).

Основным отличием от других моделей, представленных выше, в том числе выходов элементов r-процесса (например, для Eu), есть то, что ICE предполагает, что дополнительная доля звезд от всех CCSN (0.1%), имеющих сильное магнитное поле и быстровращающихся, в результате взрыва приведет к образованию магнитаров, то есть нейтронных звезд с магнитным полем выше 10^{15} Гс [217; 252], а элементы r-процесса производятся в полярных джетах (струях), выброшенных во

время взрыва. Таким образом, основное отличие состоит в том, что источник г-процесса связан также с массивными одиночными звездами, которые не требуют задержки эволюции двойных после отдельных взрывов сверхновых, производящих Fe, и слияния для производства элементов г-процесса. Подробное описание модели химической эволюции можно найти в [443]. В то время как GEtool, OMEGA и трехзонные модели (см. рис. 19 на цветной вкладке – зеленые, черные и красные линии соответственно) представляют усредненные значения разброса наблюдаемых содержаний элементов при низких металличностях. Подход, принятый в ICE модели (розовые крестики), обеспечивает более реалистичное представление о локальных химических неоднородностях, обнаруженных в МЗС на ранних галактических временах. ICE прогнозы позволяют изучать не только среднюю тенденцию (тренды) с металличностью, но и дисперсию в любой данный момент времени, обусловленную локальными неоднородностями, до того как вещество будет полностью перемешаным. Преимущество неоднородных моделей ГХЭ очевидно: когда редкий подкласс сверхновых (быстровращающиеся сверхновые с сильным магнитным полем), с частотой встречаемости, вероятно, менее чем на 1% по отношению к обычным CCSN) «загрязняет» окружающую среду, содержание элементов г-процесса чрезвычайно высоко по сравнению с местами, где такое загрязнение не имело места. Эта неоднородность эффективна особенно при низких металличностях и может таким образом объяснить наблюдаемый большой разброс содержания элементов г-процесса. Одним из ключевых элементов для тестирования неоднородности гало является Eu. В частности модель ICE предполагает, что различные источники нуклеосинтеза (слияние нейтронных звезд или быстровращающихся CCSN, с высокими магнитными полями) необходимы для воспроизведения большого разброса Eu, наблюдаемого в галактическом гало [443].

Спектроскопические наблюдения для одной и той же звезды могут отличаться от одного определения к другому по нескольким причинам. Также различные результаты могут быть получены и для теоретических предсказаний ГХЭ. В то время как для некоторых элементов (например, Mn) теоретические результаты ГХЭ достаточно близки друг к другу, для многих элементов получены большие вариации. В частности прогнозы OMEGA с использованием выходов NuGrid (черные пунктирные линии) показывают наибольшие отклонения от других моделей, а во многих случаях (например, Ni и Zn) и от наблюдений. Высокие значения [Co/Fe], [Ni/Fe], [Cu/Fe], [Zn/Fe] и [Zr/Fe] обусловлены вкладом от α -богатого (*alpha-rich freeze-out*) компонента [451; 267], в моделях CCSN от звездных прародителей с начальной массой 12 и 15 $M_{\odot}$. [Cr/Fe] «бамп, выпуклость» при солнечных металличностях связан с выходами от модели с 20 $M_{\odot}$, которые под-

верглись воздействию от слияния оболочек С и О.

Учитывая существенные различия между различными предсказаниями, в данном случае ни одна из моделей не может воспроизвести наблюдаемые тренды для трех элементов [Sc/Fe], [Ti/Fe] и [V/Fe]. Эти проблемы были хорошо известны и ранее, однако все еще нет ясного решения [190; 181].

Для этих элементов (Sc, Ti, V) имеющиеся в настоящее время предсказания нуклеосинтеза взрывных коллапсирующих сверхновых CCSN страдают недостатками из-за того, что ни одно из них не основано на самосогласованных моделях взрыва. Это приводит к трем типам нерешенных задач:

1) Методы одномерного поршня, а также тепловой бомбы используют энергию взрыва предположительно порядка $1\div 1.2\cdot 10^{51}$ эрг. Это не отражает различия в звездных моделях до взрыва, например, изменения компактности и соответствующего изменения в ожидаемом диапазоне энергий взрыва и масс, тесно связанных с выбросом ^{56}Ni и других элементов железного пика. Остается надеяться, что будущие подходы, такие как PUSH (*method to artificially trigger the explosion*, метод искусственного запуска взрыва) смогут решить эту проблему [94; 93].

2) Используемые в настоящее время модели не учитывают влияние взаимодействия нейтрино с веществом глубоко во взрывных слоях. Поглощение нейтрино и антинейтрино на протонах и нейтронах приводит к обогащению протонами, основанному на различии массы нейтрон/протона для подобных нейтрино и антинейтрино спектров и светимостей. Это может улучшить предсказания для Sc, Cu и Zn [245; 263].

3) Кроме того, ограничения из-за одномерных моделей CCSN, пренебрегающих ролью конвекции (как ключевым фактором в реалистичных трехмерных взрывах), влияют на устойчивость результатов нуклеосинтеза, в частности для промежуточной массы и элементов железного пика. Скорее всего, эти ограничения актуальны на заключительных этапах моделей звезд-предшественников, а также связаны с трудностями в получении надежных моделей взрывов последнего поколения CCSN многомерного моделирования ([243] и ссылки в ней).

Для Cr, Mn и Ni предсказания трехзонного кода (красные линии) близки к предсказаниям OMEGA (черные сплошные и пунктирные линии) – рис. 19 (на цветной вкладке). Это лучшее согласие по сравнению с легкими α -элементами, такими как Mg, означает, что содержания Cr, Mn, Ni несущественно зависят от выбросов звезд более массивных, чем $30 M_{\odot}$, поскольку OMEGA не учитывает их. Большой наблюдаемый разброс между моделями ГХЭ для элементов тяжелее Zn при низких [Fe/H] обусловлен различными предположениями, используемыми для s-процесса и r-процесса. Что касается элементов r-про-

цесса (например, Eu), в трехзонной (красные линии), GEtool (зеленые линии) и ICE (розовые кресты) кодах (моделях) несколько сверхновых CCSN внесли свой вклад в эволюцию и обеспечили обогащение на коротковременной шкале, что обусловило появление предсказаний при низких металличностях. С другой стороны, код OMEGA (черные линии) рассматривает только вклад от слияний нейтронных звезд, которые требуют определенной задержки, прежде чем внести вклад в химическую эволюцию тяжелых элементов. Модель ICE также учитывает вклад от слияний нейтронных звезд, но и дополнительный источник раннего r-процесса входит в моделирование [443].

Вариации между предсказаниями, отмеченными черными линиями, обусловлены только различными выходами Fe, связанными с различными вариантами моделей массивных звезд, поскольку были использованы одинаковое число слияний нейтронных звезд и те же самые выходы r-процесса. Выбор звездных выходов может оказать влияние на понимание, сколько событий r-процесса необходимо для того, чтобы объяснить наблюдения, по крайней мере, когда Fe является референс-элементом в отношениях содержаний элементов. Отметим, что различные реализации сверхновых Ia типа также можно рассматривать как аналогичный источник неопределенности при $[Fe/H]$ выше ~ -1 . Что касается предсказания для типичных элементов s-процесса (например, Ba), прогнозы OMEGA проходят ниже данных наблюдений. Это связано с принятыми выходами s-процесса от моделей АВГ. Симуляции (расчеты), в которых конвективная граница перемешивания играет важную роль для механизма формирования ^{13}C кармана, дают более низкий выход элементов s-процесса по сравнению с более богатыми выходами s-процесса у звезд АВГ, наблюдаемых в галактическом диске, и по сравнению с измерениями в досолнечных превалирующих зернах карбида кремния (*presolar mainstream SiC grains*) [296]. Полученные результаты ГХЭ подтверждают выводы для галактических металличностей, а также обеспечивают дополнительные сведения о физике процессов, имеющих значение для звездной физики.

Модель ICE (розовые кресты), по крайней мере для O, Mg, Si, Ca и Eu, позволяет предположить, что неоднородное перемешивание в межзвездной среде может генерировать разброс в предсказаниях, больший, чем разброс в различных компонентах трехзонного (гало, диска толстый, тонкий) кода. Это означает, что данные могут быть воспроизведены без учета галактической структуры. С другой стороны, трехзонный код может быть применен для исследования истории формирования различных компонентов нашей Галактики, которые не могут быть воспроизведены моделью ICE. Во-вторых, использование различных звездных выходов может привести к разным выводам [141;

310]. Например, до сих пор спорной есть роль гиперновых для объяснения наблюдаемых трендов элементов группы железа [258], а роль различных типов SN Ia в ГХЭ также можно рассматривать как аналогичный источник неопределенности при $[\text{Fe}/\text{H}]$ выше ~ -1 [358; 237]. Для тяжелых элементов существуют еще большие неопределенности, которые необходимо учитывать. Наличие большого разнообразия механизмов нуклеосинтеза, определенных из наблюдений в ранней Галактике [406; 348; 381; 365], все же не является основанием для их эффективного применения для уточнения химического состава Солнца [142; 138; 108; 277]. Тем не менее, теперь существуют убедительные наблюдательные свидетельства того, что парадигма нуклеосинтеза, где содержания элементов за Fe-пиком есть сумма s-процесса и r-процесса, должны быть пересмотрены [251].

Сравнение наблюдений с большой выборкой предсказаний моделирования ГХЭ показало, что все рассмотренные теоретические расчеты не согласуются с наблюдаемыми трендами отношений элементов $[\text{Sc}/\text{Fe}]$, $[\text{Ti}/\text{Fe}]$ и $[\text{V}/\text{Fe}]$. Это подтверждается результатами расчетов по четырем кодам ГХЭ и рассмотрением шести моделей ГХЭ, в том числе с различными теоретическими звездными выходами, опирающимися на большое разнообразие физических предположений. Существующие на сегодняшний день теоретические звездные выходы от массивных коллапсирующих сверхновых CCSN являются основным источником расхождения между теорией и наблюдениями. Это является одной из наиболее важных головоломок, которые современному многомерному моделированию CCSN необходимо будет решить. Подчеркиваем, требуется улучшение предсказаний CCSN нуклеосинтеза от реалистичных моделей. Среди прочего это требует детального изучения структуры звезды-предшественницы за несколько дней до и непосредственно перед самым взрывом, учет роли вращения и магнитных полей, а также влияния нейтринного взаимодействия на выбрасываемые слои и более существенной роли многомерного характера взрыва. По-прежнему открыт вопрос о роли гиперновых как более массивных звезд, являющихся необходимыми условиями для более полного представления о химической эволюции Галактики.

В недавней работе Бенуа Коте и коллег [429] была использована простая однозонная модель галактической химической эволюции для количественной оценки неопределенностей, порожденных входными параметрами в численных предсказаниях для галактик со свойствами, аналогичными свойствам Млечного Пути. Авторы выделили семь основных параметров, которыми являются: нижний и верхний пределы массы НФМ звезд, наклон НФМ в области массивных звезд, на-

клон функции распределения задержки времени сверхновых типа Ia (SN Ia), количество SN Ia на одну сформированную солнечную массу $M_{\odot}$, общая масса родившихся звезд и окончательная масса газа. Опираясь на функцию распределения вероятностей, определен диапазон вероятных значений для каждого параметра, которые были включены в код Монте-Карло для расчета нескольких сотен симуляций с произвольно выбранными входными параметрами. Такой подход позволяет проанализировать расчетную химическую эволюцию 16 элементов статистическим образом, путем выявления наиболее вероятных решений с 68% и 95% уровнями достоверности. Общая неопределенность обусловлена несколькими входными параметрами, которые по-разному вносят вклад при различных металличностях и соответственно на разных галактических возрастах. Уровень неопределенности зависит от металличности и отличается от одного химического элемента к другому. Среди семи входных параметров, рассматриваемых в данной работе, наклон НФМ и число SN Ia в настоящее время являются двумя основными источниками неопределенности.

В другой работе [95] авторы используют также код галактической химической эволюции OMEGA для исследования влияния притоков и оттоков вещества в расчетах галактических моделей. Получено, что параметры, регулирующие количество сверхновых типа Ia и мощность галактических оттоков, от одной модели к другой существенно отличаются и являются фактически взаимоисключающими. Дополнительные параметры, такие как эффективность звездообразования и величина фракции газа в галактике необходимы для того, чтобы устранить несоответствие между различными допущениями моделирования.

Современная наблюдательная база обладает огромным потенциалом для установления ограничений на те или иные модели галактической эволюции. Еще большие надежды ученые связывают с космической миссией «Гая», с помощью которой будет составлена подробная трехмерная карта нашей Галактики с указанием координат, направления движения и спектрального класса около миллиарда звезд, а научной задачей, которой является исследование образования и эволюции нашей Галактики.

Беспрецедентное количество данных получено Гайя. Как отметил Франсуа Меньяр, один из основателей и разработчиков научной программы, за один рабочий день Гайя детектирует 70 млн источников, проводит 600 млн астрометрических, 155 млн фотометрических и 13 млн спектральных измерений.

В сентябре 2016 года опубликованы первые результаты [136] и приведена предварительная карта Галактики (рис. 3.11). Яркие пят-

на внизу, справа – галактики-спутники.

Работа [136] была опубликована спустя 1000 дней после запуска «Гайя», в ней представлен первый релиз данных «Гайя», каталог Гайя DR1, состоящий из астрометрических и фотометрических данных для более 1 млрд объектов ярче 20.7 звездной величины. Каталог Gaia DR1 состоит из трех частей: 1) набора первичных астрометрических данных, который содержит положения, параллаксы и собственные движения для около 2 млн самых ярких звезд, а также вторичных астрометрических данных, содержащий положения дополнительно для 1.1 млрд объектов; 2) фотометрического набора данных, состоящего из средних величин G-полосы для всех объектов; 3) кривых блеска в G-полосе и характеристики 3000 цефеид и звезд типа RR Лиры.

Эти данные беспрецедентного качества уже использованы многими исследователями, и небольшая часть результатов представле-

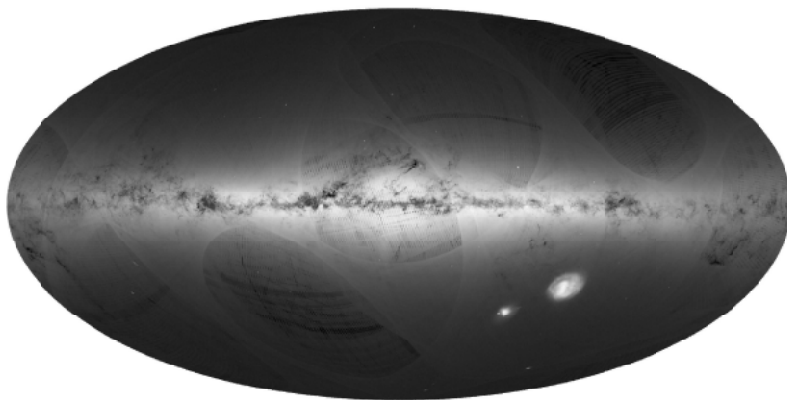


Рис. 3.11. Карта Галактики, построенная по данным «Гайя» (сентябрь, 2016), представляет плотность распределения звезд, которые измерял спутник. Чем светлее полоса, тем чаще наблюдал телескоп этот участок неба. Яркие пятна справа внизу – галактики-спутники (<http://gea.esac.esa.int/archive/>)

на в данной работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

*Всем ручейкам молочным Ханаана
О Млечный Путь ты светозарный брат,
Ты курс нам указуешь постоянно...*

Гийом Аполлинер

Во все времена человечество завораживала картина звездного неба. Еще в далеком прошлом, в Вавилоне и Египте, первые мудрецы перенесли на небо изображения своих богов, а уже затем в эпоху античности звездные очертания преобрили вид созвездий, которые мы рассматриваем и сегодня. Их названия связаны с легендами Древней Греции. С одной из этих легенд связано и название характерной и захватывающей взор и перехватывающей дыхание особенности, называемой Млечный Путь. Теперь мы знаем, что это диск нашей Галактики, а все видимые нами звезды, туманности, все это – барионная составляющая Вселенной. По данным космической миссии «Планк», наш мир состоит на 4.9% из обычного барионного вещества (предыдущая оценка по данным космической миссии WMAP была 4.6%), на 26.8% из темной материи (против 22.4%) и на 68.3% (против 73%) из темной энергии. Но как устроен наш близкий мир, наша Галактика? Ученые по-прежнему с большой целеустремленностью, рвением и восторгом пытаются разгадать эту загадку.

Наша Галактика имеет сложную многокомпонентную структуру. Яркий диск, состоящий из звезд, газа и пыли, погружен в слабосветящуюся сферическую подсистему – гало. В самом центре Галактики находится компактный объект Стрелец А (Sgr A*), наверное, представляющий собой черную дыру, а вокруг него – плотное, напоминающее ядро ореха арахиса, сгущение звезд, называемое балджем. Диск высвечивается Большим спиральным узором, происхождение которого и структура все еще являются предметом исследований. Поражающие великолепием эмиссионные, отражательные, газо-пылевые туманности – места звездообразования, планетарные туманности, свидетельствующие о том, как красиво и порой причудливо заканчивают свою жизнь звезды, перед тем как медленно угасать, остывая. Конечно, рассеянные и шаровые скопления различаются по возрасту и по содержанию химических элементов. К этому можно добавить особые образования – Пояс Гулда, Кольцо Единорога, высокоскоростные облака, два «мешка» Ферми. И все это «сшито» нитями, называемыми «кости», пронизывающими всю Галактику. Однако это многообразие живет, тем не менее, согласованной жизнью. Движение звезд и самой Галактики подчинено динамическим

законам. А динамика Галактики вместе с законами звездной эволюции обеспечивает продолжительность ее жизни.

В исследовании Галактики наблюдается значительный прогресс в ряде областей, поддерживаемый впечатляющими данными текущих исследований (обзоров), таких как SDSS, VVV, APOGEE и RAVE. Измерения основных параметров и характеристик доминирующих компонентов Галактики является важным шагом в этом процессе. Мы обладаем количественным описанием балджа, его звездного состава и формы, знаем, что тонкий и толстый диски разделяются на различающиеся последовательности по содержанию элементов и возрасту. Исследовано поле скоростей звезд в диске вблизи Солнца, построены динамические модели, связывающие эти данные самосогласованно с гравитационным потенциалом. В гало Галактики были обнаружены несколько спутников и подструктур и измерены плотности и скорости до > 50 кпк. С другой стороны, нам по-прежнему не хватает достаточного понимания, например, радиального расширения масштабов длины крупномасштабного галактического диска, переходной области между Галактическим баром и окружающим диском, свойствами ядерного диска, массы звездного гало, внешней кривой вращения Млечного Пути. Построение полной структурной модели Млечного Пути является одной из главных задач исследований на ближайшие годы. Большие надежды возлагаются на новые данные, полученные космической миссией «Гайя» ЕКА, а также на готовящуюся Американским космическим агентством НАСА космическую инфракрасную обсерваторию «Джеймс Уэбб», названную в честь первого директора НАСА, которая предположительно заменит космический телескоп «Хаббл».

Химический состав от первых самых старых звезд Галактики до молодых звезд рассеянных скоплений и ассоциаций представляет собой бесценный источник информации о формировании Галактики, ее эволюции – как звезды живут, развиваются и функционируют. Последовательная трактовка эволюции относительных содержаний элементов при различных металличностях является одной из главных задач галактической химической эволюции. Эволюция сформировавшейся Галактики описывается некоторой моделью, построенной на дифференциальных уравнениях, выражающих законы сохранения массы компонентов (газ, звезды), массы отдельных химических элементов и энергии. Модель учитывает ряд факторов – звезды, газ и пыль в межзвездном пространстве, крупномасштабную галактическую структуру, эффективность звездообразования, распределение звезд по массам, звездную эволюцию, потерю массы звездами и обогащение межзвездного вещества химическими элементами. Модели ГХЭ учитывают также теоретические звездные выходы элементов в рамках фундаментальных физических подходов. Это позволяет тестировать

теоретические модели, их химические продукты и физические предпосылки соответствующими наблюдательными данными. Однако на данный момент современные модели ГХЭ сталкиваются с проблемами объяснения обогащения рядом элементов. Основным источником этого расхождения между теорией и наблюдениями являются нынешние теоретические звездные выходы от массивных коллапсирующих сверхновых (CCSN, CN II) – одна из наиболее важных задач современного многомерного моделирования CCSN.

Галактика еще долгое время будет сохранять настоящий вид и кругооборот вещества по схеме звезды – газ – звезды будет длиться еще много циклов. Если рассматривать верхний предел времени жизни Галактики, когда фундаментальные физические процессы (например, распад протонов и электронов) существенно изменят саму структуру материи, эта шкала равна порядка 10^{33} лет. Для самой Галактики ее параметры изменятся гораздо раньше. Наиболее важные шкалы – шкала глобальных структурных изменений и шкала энерговыделения существенно превышают возраст Галактики, который по современным оценкам равен 13 ± 13.5 млрд лет.

«Спокойная эволюция» длится 10^{11} лет. После этого объем газа, а, следовательно, и скорость звездообразования начнут быстро уменьшаться. Это связано с тем, что маломассивные звезды ($\sim 0.4 M_{\odot}$), большинство которых образовалось еще на ранних галактических временах, входят в финальную стадию звездной эволюции. Именно они и более массивные звезды являются поставщиками газа. Маломассивные звезды продолжают светить, их много, и это не сказывается на общей светимости. Но газа они поставляют значительно меньше, и с завершением их эволюции заканчивается звездная эпоха эволюции Галактики через 10^{13} лет. На этом этапе Галактика тускнеет, краснеет и стареет, только редкие вспышки сверхновых и вспышки при столкновениях звезд в центре Галактики озаряют этот процесс затухания. Любопытно, что межзвездный газ на этой стадии очень разрежен, его плотность в десятки тысяч раз меньше, чем нынешнего, и состоит он в основном из ядер железа, самых устойчивых ядер.

А пока Галактика «дышит», выталкивая газ и втягивая его обратно. Свойства быстрых облаков говорят о существовании гигантской сферы горячей разреженной плазмы (корональный газ), окружающей нашу Галактику, а сами они состоят из первичного газа, поступающего издалека. Облака с промежуточными скоростями представляют возвратный поток обширного цикла газообмена внутреннего газа Галактики. Взрывы сверхновых образуют каверны с горячим газом, который прорывается сквозь окружающий холодный газ и питает горячую корону Галактики. Затем он охлаждается и в виде облаков падает обратно на диск. Таким образом, облака, окружающие Млечный

Путь, напоминают нам, что мы живем в звездной системе, которая продолжает формироваться и эволюционировать.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A Chandrasekhar Mass Progenitor for the Type Ia Supernova Remnant 3C 397 from the Enhanced Abundances of Nickel and Manganese / [H. Yamaguchi, C. Badenes, A. Foster et al.]. // *Astrophys. J. Letters*. – 2015. – Vol. 801. – Id. L31.
2. A fully cosmological model of a Monoceros-like ring / [A. Gmez, S. White, F. Marinacci et al.]. // *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* – 2016. – Vol. 456. – P. 2779–2793.
3. A gas cloud on its way towards the supermassive black hole at the Galactic Centre / [S. Gillessen, R. Genzel, T. Fritz et al.]. // *Nature*. – 2012. – Vol. 481. – P. 51–54.
4. A grid of model atmospheres for metal-deficient giant stars. II. / R. Bell, K. Eriksson, B. Gustafsson, A. Nordlund. // *Astron. Astrophys. Suppl.* – 1976. – Vol. 23. – P. 37–95.
5. A lack of classical Cepheids in the inner part of the Galactic disc / [N. Matsunaga, M. Feast, G. Bono et al.]. // *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* – 2016. – Vol. 462. – P. 414–420.
6. A lower limit on the age of the universe / [B. Chaboyer, P. Demarque, P. Kernan et al.]. // *Science*. – 1996. – Vol. 271. – P. 957–961.
7. A New Distant Milky Way Globular Cluster in the Pan-STARRS1 3p Survey [Laevens, B. M., Martin, N.F., Sesar, B. et al.] // *Astrophys. J.* – 2014. – Vol. 786. – Id. L3.
8. A single model for the variety of multiple-population formation(s) in globular clusters: a temporal sequence [F. D'Antona, E. Vesperini, A. D'Ercole et al.]. // *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* – 2016. – Vol. 458. – P. 2122–2139.
9. A stellar relic from the early Milky Way / [N. Christlieb, M. Bessell, T. Beers et al.]. // *Nature*. – 2002. – Vol. 419. – P. 904–906.
10. A strong case for fast stellar rotation at very low metallicities / [C. Chiappini, R. Hirschi, G. Meynet et al.]. // *Astron. Astrophys.* – 2006. – Vol. 449. – L27–L30.
11. A Survey of Proper Motion Stars. XIII. The Halo Population / [B. Carney, J. Laird, D. Latham et al.] // *Astron. J.* – 1996. – Vol. 112. – P. 668–692.
12. Abundances of Cu and Zn in metal-poor stars: Clues for Galaxy evolution / [T.V. Mishenina, V.V. Kovtyukh, C. Soubiran et al.]. // *Astron. Astrophys.* – 2002 – Vol. 396. – P. 189–201.
13. Abundances of light elements in metal-poor stars. IV. [Fe/O] and [Fe/Mg] ratios and the history of star formation in the solar neighborhood / R. Gratton, E. Carretta, F. Matteucci, C. Sneden. // *Astron. Astrophys.* – 2000. – Vol. 358. – P. 671–681.
14. Abundances of neutron-capture elements in stars of the Galactic disk substructures / [T. V. Mishenina, M. Pignatari, S. A. Korotin et al.]. // *Astron. Astrophys.* – 2013. – Vol. 552. – Id. A128.
15. Allen C. An improved model of the galactic mass distribution for orbit computations / C. Allen, A. Santillan. // *Rev.Mex.Astron.Astrofis.* – 1991. – Vol. 22. – P. 255–263.
16. Alonso A. Determination of effective temperatures for an extended sample of dwarfs and subdwarfs (F0-K5) / A. Alonso, S. Arribas, C. Martinez-Roger. // *Astrophys. J. Suppl.* – 1996. – Vol. 117. – P. 227–254.
17. An extremely primitive star in the Galactic halo / [E. Caffau, P. Bonifacio, P. Francois et al.]. // *Nature*. – 2011. – Vol. 477 Is. 7362. – P. 67–69.
18. Anders E., Grevesse N. Abundances of the elements - Meteoritic and solar / E. Anders, N. Grevesse. // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 1989. – Vol. 53. – P. 197–214.
19. Arcones A. Production of Light-element Primary Process Nuclei in Neutrino-driven Winds / A. Arcones, F. Montes. // *Astrophys. J.* – 2011. – Vol. 731. – Id. 5A.
20. Arnould M. The r-process of stellar nucleosynthesis: Astrophysics and nuclear physics achievements and mysteries / M. Arnould, S. Goriely, K. Takahashi / *Phys. Rep.* – Vol. 450. – P. 97–213.

21. Ashman K. M. The formation of globular clusters in merging and interacting galaxies / K. M. Ashman, S. E. Zepf. // *Astrophys. J.* – 1992. – Vol. 384. – P. 50–61.
22. Asymptotic Giant Branch Production and Galactic Chemical Evolution / C. Travaglio, R. Gallino, M. Busso, R. Gratton // *Astrophys. J.* – 2001. – Vol. 549. – P. 346–352.
23. Athanassoula E. On the nature of bulges in general and of box/peanut bulges in particular: input from N-body simulations / E. Athanassoula. // *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* – 2005. – Vol. 358. – P. 1477–1488.
24. ATLAS lifts the Cup: discovery of a new Milky Way satellite in Crater / [Belokurov, V., Irwin, M. J., Koposov, S. E. et al.] // *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* – 2014. – Vol. 441. – P. 2124–2133
25. Atmospheric Chemical Composition of the Halo Star HD 221170 from a Synthetic-Spectrum Analysis / [V. F. Gopka, A. V. Yushchenko, T. V. Mishenina, et al.]. // *Astron. Rep.* – 2004. – Vol. 48. – P. 577–587.
26. δ -, r -, and s -process element trends in the Galactic thin and thick disks / Bensby T., Feltzing S., Lundström I., Ilyin I. // *Astron. Astrophys.* – 2005. – Vol. 433. – P. 185–203.
27. Baade W. The Resolution of Messier 32, NGC 205, and the Central Region of the Andromeda Nebula / W. Baade. // *Astrophys. J.* – 1944. – Vol. 100. – P. 137.
28. Barium abundance in red giants of NGC 6752. Non-local thermodynamic equilibrium and three-dimensional effects / [V. Dobrovolskas, A. Kuiniškas, S. Andrievsky et al.]. // *Astron. Astrophys.* – 2012. – Vol. 540. – Id. A128.
29. Barium and yttrium abundance in intermediate-age and old open clusters / [T.V. Mishenina, S. Korotin, G. Carraro et al.]. // *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* – 2013. – Vol. 433. – P. 1436–1443.
30. Barnard E. E. Some abnormal stars in the cluster M13 in Hercules / E. E. Barnard. // *Astrophys. J.* – 1900. – Vol. 12. – P. 176–181.
31. Battistini C. The origin and evolution of the odd-Z iron-peak elements Sc, V, Mn, and Co in the Milky Way stellar disk / C. Battistini, T. Bensby. – 2015. – *Astron. Astrophys.* – Vol. 577. – Id. A9.
32. Battistini C. The origin and evolution of r - and s -process elements in the Milky Way stellar disk / C. Battistini, T. Bensby // *Astron. Astrophys.* – 2016. – Vol. 586. – Id. A49.
33. Baum W. Globular clusters. 1. Photoelectric spectroscopic observations in M3 and M92 / W. A. Baum. // *Astron. J.* – 1952. – Vol. 57. – P. 222–227.
34. Becklin E. E. Observations of the Galactic Center / E. E. Becklin, G. Neugebauer. // *Astrophys. J.* – 1968. – Vol. 151. – P. 145.
35. Beers T. The Discovery and Analysis of Very Metal-Poor Stars in the Galaxy / T. Beers, N. Christlieb. // *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* – 2005. – Vol. 43. – P. 531–580.
36. Bell R. The abundance scale of the galactic globular clusters / R. Bell, B. Gustafsson. // *Mon.Notic.Roy.Astron.Soc.* – 1983. – Vol. 204. – P. 249–271.
37. Bell R. The Colours of G and K Type Giant Stars, II. / R. Bell, B. Gustafsson. // *Astron. Astrophys. Suppl.* – 1978. – Vol. 34. – P. 229–240.
38. Bensby T. Elemental abundance trends in the Galactic thin and thick disks as traced by nearby F and G dwarf stars / T. Bensby, S. Feltzing, I. Lundström. // *Astron. Astrophys.* – 2003. – Vol. 410. – P. 527–551.
39. Bensby T. Exploring the Milky Way stellar disk. A detailed elemental abundance study of 714 F and G dwarf stars in the solar neighbourhood / T. Bensby, S. Feltzing, M. S. Oey // *Astron. Astrophys.* – 2014. – Vol. 562. – Id. A71.
40. Bertolli M. G. Systematic and correlated nuclear uncertainties in the i -process at the neutron shell closure N 82 / M. G. Bertolli, F. Herwig, M. Pignatari, T. Kawano, [Electronic resource] // . – Last access: 2013, eprint arXiv:1310.4578.
41. Bethe H. Energy Production in Stars / H. Bethe // *Phys. Rev.* – 1939. – Vol. 55. – P. 434–456.
42. Big bang nucleosynthesis: Present status / [R. H. Cyburt, B. D. Fields, K. A. Olive, T.-H. Yeh.] // *Rev. Modern Physics.* – 2016. – Vol. 88, Id. 015004.

43. Binney J. The distribution function of the Galaxy's dark halo / J. Binney, T. Piffl. // *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* – 2015. – Vol. 454. – P. 3653–36631.
44. Binney J. The photometric structure of the inner Galaxy / J. Binney, O. Gerhard, D. Spergel. // *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* – 1997. – Vol. 288. – P. 365–374.
45. Black hole starvation and bulge evolution in a Milky Way-like galaxy / [S. Bonoli, L. Mayer, S. Kazantzidis et al.]. // *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* – 2016. – Vol. 459. – P. 2603–2617.
46. Bland-Hawthorn J. The Galaxy in Context: Structural, Kinematic and Integrated Properties / J. Bland-Hawthorn, O. Gerhard. // *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* – 2016. – V. 54. – P. 1–69.
47. Blitz L. Remnants of the Formation of the Milky Way / L. Blitz. // *Bull. Americ. Astron. Soc.* – 1999. – Vol. 31. – P. 1521.
48. Bobylev V. V. Galactic Kinematics from Data on Open Star Clusters from the MWSC catalogue / V. V. Bobylev, A. T. Bajkova, K. S. Shirokova. // *Astron. Letters.* – 2016. – Vol. 42. – P. 721–733.
49. Bobylev V. V. The Gould Belt, the de Vaucouleurs-Dolidze belt, and the Orion arm 2014 / V. V. Bobylev, A. T. Bajkova. // *Astron. Letters.* – 2014. – Vol. 40. – P. 783–792.
50. Borkova T. V. Distant globular clusters with anomalously small masses. / T. Borkova, V. Marsakov. // *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* – 2002. – № 54. – C. 61-65.
51. Borkova T.V. Globular Cluster Subsystems in the Galaxy/ T.V. Borkova, V.A. Marsakov. // *Astron. Rep.* – 2000. – Vol. 44. – P. 665–684.
52. Borkova T. V. Stars of Extragalactic Origin in the Solar Neighborhood / T. V. Borkova, V. A. . Marsakov. // *Astron. Letters.* – 2004. – Vol. 30. – P. 148-158.
53. Bournaud F. The Thick Disks of Spiral Galaxies as Relics from Gas-rich, Turbulent, Clumpy Disks at High Redshift / F. Bournaud, G. B. Elmegreen, M. Martig. // *Astrophys. J.* – 2009. – Vol. 707. – P. L1–L5.
54. Bouwens R. A Look At Three Different Scenarios for Bulge Formation / R. Bouwens, L. Cayn, J. Silk. // *Astrophys. J.* – 1999. – Vol. 516. – P. 77–84.
55. Brewer M. A Comparison of the Chemical Evolutionary Histories of the Galactic Thin Disk and Thick Disk Stellar Populations / M. Brewer, B. Carney. // *Astron. J.* – 2006. – Vol. 131. – P. 431–454.
56. Bromm V. The First Stars / V. Bromm, R. Larson. // *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* – 2004. – Vol. 42. – P. 79–118.
57. Bromm V. The formation of the first low-mass stars from gas with low carbon and oxygen abundances / V. Bromm, A. Loeb. // *Nature.* – 2003. – Vol. 425. – P. 812–814.
58. Burbidge E. The Chemical Compositions of Five Stars which Show Some of the Characteristics of Population II / E. Burbidge, G. Burbidge. // *Astrophys. J.* – 1956. – Vol. 124. – P. 116–129.
59. Burkert A. The collapse of our Galaxy and the formation of the galactic disk / A. Burkert, J.W. Truran, G. Hensler // *Astrophys. J.* – 1992. – Vol. 392. – P. 651 – 658.
60. Busso M. Nucleosynthesis in Asymptotic Giant Branch Stars: Relevance for Galactic Enrichment and Solar System Formation / M. Busso, R. Gallino, G. Wasserburg. // *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* – 1999. – Vol. 37. – P. 239–309.
61. Butcher, H. R. Thorium in G-dwarf stars as a chronometer for the Galaxy / Butcher, H. R. // *Nature.* – 1987. – Vol. 328– P. 127–131.
62. Butler D. Metal abundances of RR Lyrae stars in galactic globular clusters / D. Butler. // *Astrophys. J.* – 1975. – Vol. 200. – P. 68–81.
63. Calcium H&K and sodium D absorption induced by the interstellar and circumgalactic media of the Milky Way / M. Murga, G. Zhu, B. M̃nard, T. Lan. // *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* – 2015. – Vol. 452. – P. 511–519.
64. Calura F. Cosmic metal production and mean metallicity of the Universe / F. Calura, F. Matteucci. // *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* – 2004. – Vol. 350. – P. 351–364.
65. Camargo D. Towards a census of the Galactic anticentre star clusters - III:

tracing the spiral structure in the Outer Disk / D. Camargo, E. Bica, C. Bonatto. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2013. – Vol. 432. – P. 3349–3360.

66. Cameron A. G. W. The heavy element yields of neutron capture nucleosynthesis / A. G. W. Cameron. // *Astrophys. Space Science.* – 1982. – Vol. 82. – P. 123–131.

67. Carraro G. Photometric distances to young stars in the inner Galactic disk. I. The $L = 314^\circ$ direction / G. Carraro. // *Astron. Astrophys.* – 2011. – Vol. 536. – Id. A101.

68. Cassinelli J. Stellar winds / J. Cassinelli. // *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* – 1979. – Vol. 17. – P. 275–308.

69. Celeux G. Statistique Appliquee / G. Celeux, J. Diebolt. // *Rev. Statistique Appliquee.* – 1986. – Vol. 35. – P. 36.

70. Chamberlain J. The Atmospheres of A-Type Subdwarfs and 95 Leonis / J. Chamberlain, L. Aller. // *Astrophys. J.* – 1951. – Vol. 114. – P. 52–72.

71. Characteristics of thick disks formed through minor mergers: stellar excesses and scale lengths / Y. Qu, P. Di Matteo, M. D. Lehnert, W. van Driel. // *Astron. Astrophys.* – 2011. – V. 530. – Id. A10.

72. Chemical abundances of 1111 FGK stars from the HARPS GTO planet search program. Galactic stellar populations and planets / [V. Zh. Adibekyan, S. G. Sousa, N. C. Santos et al.]. // *Astron. Astrophys.* – 2012. – Vol. 545. – Id. A32.

73. Chemical composition of 90 F and G disk dwarfs / [Y. Chen, P. Nissen, G. Zhao et al.]. // *Astron. Astrophys. Suppl.* – 2000. – Vol. 141. – P. 491–506.

74. Chemical composition of high proper-motion stars based on short-wavelength optical spectra / [V. G. Klochkova, T. V. Mishenina, V. E. Panchuk et al.]. // *Astrophys. Bull.* – 2011. – Vol. 66. – P. 28–46.

75. Chemical enrichment and star formation in the Milky Way disk. II. Star formation history / H. Rocha-Pinto, J. Scalo, W. Maciel, C. Flynn. // *Astron. Astrophys.* – 2000. – Vol. 358. – P. 869–885.

76. Chemical separation of disc components using RAVE / [J. Wojno, G. Kordopatis, M. Steinmetz et al.]. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2016. – Vol. 461. – P. 4246–4255.

77. Chemistry of the Galactic Bulge: New Results. / [M. Zoccali, V. Hill, B. Barbuy et al.]. // *Messenger.* – 2009. – Vol. 136. – P. 48–53.

78. Chiba M. Kinematics of Metal-poor Stars in the Galaxy. III. Formation of the Stellar Halo and Thick Disk as Revealed from a Large Sample of Nonkinematically Selected Stars / M. Chiba, T. Beers. // *Astron. J.* – 2000. – Vol. 119. – P. 2843–2865.

79. Chiba M. Structura of the galactic stellar halo prior to disk formation / M. Chiba, T. Beers. // *Astrophys. J.* – 2001. – Vol. 549. – P. 325–336.

80. Chieffi A. Pre-supernova Evolution of Rotating Solar Metallicity Stars in the Mass Range $13\text{--}120 M_{\odot}$ and their Explosive Yields / A. Chieffi, M. Limongi. // *Astrophys. J.* – 2013. – Vol. 764. – Id. 21.

81. Clayton D. Galactic Chemical Evolution and Nucleocosmochronology: A Standard Model / D. Clayton. // *Nucleosynthesis: Challenges and New Developments.* / Eds. W. D. Arnett and J. W. Truran. – Chicago: University of Chicago Press. – 1985. – P. 65.

82. Code dependencies of pre-supernova evolution and nucleosynthesis in massive stars: evolution to the end of core helium burning / [S. Jones, R. Hirschi, M. Pignatari et al.]. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2015. – Vol. 447. – P. 3115–3129.

83. Cold Dark Matter Substructure and Galactic Disks. I. Morphological Signatures of Hierarchical Satellite Accretion / [S. Kazantzidis, J. Bullock, A. Zentner et al.]. // *Astrophys. J. Letters.* – 2008. – Vol. 688. – Id. 254–276.

84. Cold, clumpy accretion onto an active supermassive black hole / [G. Tremblay, J. Oonk, F. Combes et al.]. // *Nature.* – 2016. – Vol. 534. – P. 218–221.

85. Comerón F. The origin of the Gould Belt by the impact of a high velocity cloud on the galactic disc / F. Comerón, J. Torra. // *Astron. Astrophys.* – 1994. –

Vol. 281. – P. 35–45.

86. Compact Remnant Mass Function: Dependence on the Explosion Mechanism and Metallicity / [C. L. Fryer, K. Belczynski, G. Wiktorowicz et al.] // *Astrophys. J.* – 2012. – Vol. 749. – Id. 91.

87. Comparative Analysis of Chemical Abundances in the Atmospheres of Red Giants of Different Age Groups / A. A. Boyarchuk, L. I. Antipova, M. E. Boyarchuk, I. S. Savanov // *Astron. Rep.* – 2001. – Vol. 45. – P. 301–308.

88. Composition of the Innermost Core-Collapse Supernova Ejecta / [C. Fröhlich, P. Hauser, M. Liebendörfer et al.] // *Astrophys. J.* – 2006. – Vol. 637. – P. 415–426.

89. Constraining the Galaxy's dark halo with RAVE stars / [T. Piffl, J. Binney, P.J. McMillan et al.] // *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* – 2014. – Vol. 445. – P. 3133–3151.

90. Constraints on the nucleosynthesis of Cu and Zn from models of chemical evolution of the Galaxy / [F. Matteucci, C. M. Raiteri, M. Busson et al.] // *Astron. Astrophys.* – 1993. – Vol. 272. – P. 421.

91. Convective-reactive Proton-12C Combustion in Sakurai's Object (V4334 Sagittarii) and Implications for the Evolution and Yields from the First Generations of Stars / [F. Herwig, M. Pignatari, P. R. Woodward et al.] // *Astrophys. J.* – 2011. – Vol. 727. – Id. 89.

92. Copper and Zinc Abundances in Metal-Poor Stars / [F. Primas, E. Brugamy, C. Sneden et al.] // *The Galactic Halo: From Globular Cluster to Field Stars, Proceedings of the 35th Liege International Astrophysics Colloquium, held 5-8 July, 1999*. A. Noels, P. Magain, D. Caro, E. Jehin, G. Parmentier, and A. A. Thoul (eds). Liege, Belgium. – 2000. – P. 119.

93. Core-collapse Supernovae from 9 to 120 Solar Masses Based on Neutrino-powered Explosions / [T. Sukhbold, T. Ertl, S. Woosley et al.] // *Astrophys. J.* – 2016. – Vol. 821. – Id. 38.

94. Core-collapse Supernovae to Explosions in Spherical Symmetry I: the Model and the Case of SN 1987A / [A. Perego, M. Hempel, C. Fröhlich et al.] // *Astrophys. J.* – 2015. – 806. – Id. 275.

95. Côté B. The Impact of Modeling Assumptions in Galactic Chemical Evolution Models [Electronic resource] / B. Côté, B. W. O'Shea, C. Ritter, F. Herwig, K.M.Venn. // Last access: eprint arXiv:1604.07824.

96. Cowan J. Production of C-14 and neutrons in red giants / J. Cowan, W. Rose. // *Astrophys. J.* – 1977. – Vol. 212. – P. 149–158.

97. Dame T. The Milky Way in Molecular Clouds: A New Complete CO Survey / T. Dame, D. Hartmann, P. Thaddeus. // *Astrophys. J.* – 2001. – Vol. 547. – P. 792–813.

98. Dardelet L. The i-process and CEMP-r/s stars [Electronic resource] / L. Dardelet, C. Ritter, P. Prado et al. // Last access 2015. – eprint arXiv. 1604.07824.

99. De Lucia, G. Milky Way simulations: The Galaxy, its stellar halo and its satellites - insights from a hybrid cosmological approach / G. De Lucia // 2012. – *Astron. Nach.* – Vol. 333. – P. 460.

100. Dearborn D. Diagnostics of stellar evolution: The oxygen isotopes / D. Dearborn. // *Phys. Rep.* – 1992. – Vol. 210. – P. 367–382.

101. Delhaye J. Solar Motion and Velocity Distribution of Common Stars / J. Delhaye // *Galactic structure*. Edited by Adriaan Blaauw and Maarten Schmidt. Published by the University of Chicago Press. – Chicago, ILL USA, 1965. – P. 61.

102. Detailed Abundances for 28 Metal-poor Stars: Stellar Relics in the Milky Way / [D. Lai, M. Bolte, J. Johnson et al.] // *Astrophys. J.* – 2008. – Vol. 681. – P. 1524–1556.

103. Dierickx M. Extension of the Sagittarius Stream to the Milky Way Virial Radius [Electronic resource] / M. Dierickx, A. Loeb // 2016. – Access to resources: eprint arXiv:1611.00089.

104. Diplas A. Neutral hydrogen in the outer Galaxy / A. Diplas, B. Savage. //

Astrophys. J. – 1991. – Vol.377. – P. 126–140.

105. Discovery of a Pair of Classical Cepheids in an Invisible Cluster Beyond the Galactic Bulge / [I. Dékány, D. Minniti, G. Hajdu, et al.] // *Astrophys. J.* – 2015. – Letters, Vol. 799. – Id. L11.

106. Discovery of HE 1523-0901, a Strongly r-Process-enhanced Metal-poor Star with Detected Uranium / [A. Frebel, N. Christlieb, J. Norris et al.]. // *Astrophys. J.* – 2007. – Vol. 660. – P. L117–L120.

107. Dobbs C. The myth of the molecular ring / C. Dobbs, A. Burkert. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2012. – Vol. 421. – P. 2940–2946.

108. Does the Main Component Constrain the Neutron Source in the 13C Pocket? / [O. Trippella, M. Busso, E. Maiorca et al.]. // *Astrophys. J.* – 2014. – Vol. 787. – Id. 41.

109. Double Compact Objects. I. The Significance of the Common Envelope on Merger Rates / [M. Dominik, K. Belczynski, C. Fryer et al.]. // *Astrophys. J.* – 2012. – Vol. 759. – Id. 52.

110. Dusting off the diffuse interstellar bands: DIBs and dust in extragalactic Sloan Digital Sky Survey spectra / [D. Baron, D. Poznanski, D. Watson et al.]. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2015. – Vol. 447. – P. 545–558.

111. Eggen O. Evidence from the motions of old stars that the Galaxy collapsed / O. Eggen, D. Lynden-Bell, A. Sandage. // *Astrophys. J.* – 1962. – Vol. 136. – P. 748–766.

112. Einasto J. Dynamic evidence on massive coronas of galaxies / J. Einasto, A. Kaasik, E. Saar. // *Nature*. – 1974. – Vol. 250. – P. 309–310.

113. El Eid M. Sodium enrichment in A-F type supergiants / M. El Eid, A. Champagne. // *Astrophys. J.* – 1995. – V.451. – P. 298–307.

114. Enhanced Production of Barium in Low-Mass Stars: Evidence from Open Clusters / [V. D'Orazi, L. Magrini, S. Randich et al.]. // *Astrophys. J.* – 2009. – Vol. 693. – P. L31–L34.

115. Evidence for a signature of the galactic bar in the solar neighbourhood / [D. Raboud, M. Grenon, L. Martinet et al.]. // *Astron. Astrophys.* – 1998. – Vol. 335. – P. L61–L64.

116. Evidence of AGB Pollution in Galactic Globular Clusters from the Mg–Al Anticorrelations Observed by the APOGEE Survey / [P. Ventura, D. García Hernández, F. Dell'Agli et al.]. // *Astrophys. J. Letters*. – 2016. – Vol. 831. – Id. L17.

117. Evidence of Multiple r-Process Sites in the Early Galaxy: New Observations of CS 22892-052. / [C. Sneden, J. Cowan, I. Ivans et al.]. // *Astrophys. J.* – 2000. – Vol. 533. – P. L139–L142

118. Evolution and Nucleosynthesis in Low-Mass Asymptotic Giant Branch Stars. II. Neutron Capture and the s-Process / [R. Gallino, C. Arlandini, M. Busso et al.]. // *Astrophys. J.* – 1998. – Vol. 497. – P. 388.

119. Evolution of spiral galaxies. I - Halo-disk connection for the evolution of the solar neighborhood / F. Ferrini, F. Matteucci, C. Pardi, U. Penco. // *Astrophys. J.* – 1992. – Vol. 387. – P. 138–151.

120. Explorations of the r-Processes: Comparisons between Calculations and Observations of Low-Metallicity Stars / [K. Kratz, K. Farouqi, B. Pfeiffer et al.]. // *Astrophys. J.* – 2007. – Vol. 662. – P. 39–52.

121. Fath E. A. The spectra of spiral nebulae and globular star clusters / E. A. Fath. // *Lick Observ. Bull.* – 1909. – Vol. 5. – P. 71–77.

122. Fath E.A. The spectra of spiral nebulae and globular star clusters. Third paper // *Astrophys. J.* – 1913. – Vol. 37. – P. 198–203.

123. Feltzing S. Signatures of SN Ia in the galactic thick disk. Observational evidence from alpha -elements in 67 dwarf stars in the solar neighbourhood / S. Feltzing, T. Bensby, I. Lundström. // *Astron. Astrophys.* - 2003. - Vol. 397. - P. L1–L4.

124. Fenner Y. Deriving the Metallicity Distribution Function of Galactic Systems / Y. Fenner, B. Gibson. // *Publ. Astron. Soc. Australia*. – 2003. – Vol. 20. – P. 189–195.
125. First GLIMPSE Results on the Stellar Structure of the Galaxy / [R. A. Benjamin, E. Churchwell, B. L. Babler et al.] // *Astrophys. J.* – 2005. – Vol. 630. – P. L149–L152.
126. First stars VI - Abundances of C, N, O, Li, and mixing in extremely metal-poor giants. Galactic evolution of the light elements / [M. Spite, R. Cayrel, B. Plez et al.] // *Astron. Astrophys.* – 2005. – Vol. 430. – P. 655–668.
127. First stars. I. The extreme r-element rich, iron-poor halo giant CS 31082-001. Implications for the r-process site(s) and radioactive cosmochronology / [V. Hill, B. Plez, R. Cayrel et al.] // *Astron. Astrophys.* – 2002. – Vol. 387. – P. 560–579.
128. Fowler W. Nuclear Cosmochronology / W. Fowler, F. Hoyle. // *Astron. J.* – 1960. – Vol. 70. – P. 345.
129. Fragione G. Hypervelocity stars from young stellar clusters in the Galactic Centre [Electronic resource] / G. Fragione, R. Capuzzo-Dolcetta, P. Kroupa. // Last access 2016. – eprint arXiv: 1609.05305.
130. Francois P. On the Galactic Age Problem - Determination of the Th/eu Ratio in Halo Stars / P. Francois, M. Spite, F. Spite. // *Astron. Astrophys.* – 1993. – Vol. 274. – P. 821–824.
131. Frebel A. Stellar archaeology: Exploring the Universe with metal-poor stars / A. Frebel. // *Astron. Nachr.* – 2010. – Vol. 331. – P. 474–488.
132. Freeman K. C. The New Galaxy: Signatures of Its Formation / K. Freeman, J. Bland-Hawthorn. // *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* – 2002. – V. 40. – P. 487–537.
133. Freiburghaus C. r-Process in Neutron Star Mergers / C. Freiburghaus, S. Rosswog, F.-K. Thielemann. // *Astrophys. J.* – 1999. – Vol. 525. – P. L121–L124.
134. Fuhrmann K. Nearby stars of the Galactic disk and halo / K. Fuhrmann. // *Astron. Astrophys.* – 1998. – Vol. 338. – P. 161–185.
135. Further Evidence of a Merger Origin for the Thick Disk: Galactic Stars along Lines of Sight to Dwarf Spheroidal Galaxies / [R. Wyse, G. Gilmore, J. Norris et al.] // *Astrophys. J.* – 2006. – Vol. 639. – P. L13–L16.
136. Gaia Data Release 1. Summary of the astrometric, photometric, and survey properties / Gaia Collaboration: A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti et al.] // *Astron. Astrophys.* – 2016. – Vol. 595. – Id. A2.
137. Galactic Chemical Evolution / [B. Gibson, Y. Fenner, A. Renda et al.] // *Publ. Astron. Soc. Australia*. – 2003. – Vol. 20. – P. 401–415.
138. Galactic Chemical Evolution and Solar s-process Abundances: Dependence on the ¹³C-pocket Structure / [S. Bisterzo, C. Travaglio, R. Gallino et al.] // *Astrophys. J.* – 2014. – Vol. 787. – Id. 10.
139. Galactic Chemical Evolution of Heavy Elements: From Barium to Europium / [C. Travaglio, D. Galli, R. Gallino et al.] // *Astrophys. J.* – 1999. – Vol. 521. – P. 691–702.
140. Galactic Chemical Evolution of the s Process from AGB Stars / [A. Serminato, R. Gallino, C. Travaglio et al.] // *Publ. Astron. Soc. Austr.* – 2009. – Vol. 26. – P. 153–160.
141. Galactic chemical evolution: stellar yields and the initial mass function / M. Molla, O. Cavichia, M. Gaviar'n, B. K. Gibson // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2015. – Vol. 451. – P. 3693–3708.
142. Galactic Evolution of Sr, Y, And Zr: A Multiplicity of Nucleosynthetic Processes / [C. Travaglio, R. Gallino, E. Amone et al.] // *Astrophys. J.* – 2004. – Vol. 601. – P. 864–884.
143. Gilmore G. A determination of the thick disk chemical abundance distribution: Implications for galaxy evolution / G. Gilmore, R. Wyse, J. Jones. // *Astron. J.* – 1995. – Vol. 109. – P. 1095–1111.
144. Gilmore G. Deciphering the Last Major Invasion of the Milky Way / G. Gilmore, R. Wyse, J. Norris. // *Astrophys. J.* – 2002. – Vol. 574. – P. L39–L42.
145. Gilmore G. New light on faint stars. III - Galactic structure towards the

South Pole and the Galactic thick disc / G. Gilmore, N. Reid. // *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* – 1983. – Vol. 202. – P. 1025–1047.

146. Global survey of star clusters in the Milky Way. II. The catalogue of basic parameters / [N. V. Kharchenko, A. E. Piskunov, S. Ruser et al.]. // *Astron. Astrophys.* – 2013. Vol. 558. – Id. A53.

147. Global survey of star clusters in the Milky Way: The open cluster distance scale / [Kharchenko N. V., Piskunov A. E., Ruser, S. et al. // *Advancing the Physics of Cosmic Distances, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symp.* – 2013. – Vol. 289. – P. 394–397.

148. Globular Cluster Streams as Galactic High-Precision Scales—the Poster Child Palomar 5. / [A. Kypfer, E. Balbinot, A. Bonaca et al.]. // *Astrophys. J.* – 2015. – Vol. 803. – Id. 80.

149. Globular cluster system and Milky Way properties revisited / E. Bica, C. Bonatto, B. Barbuy, S. Ortolani. // *Astron. Astrophys.* – 2006. – Vol. 450. – P. 105–115.

150. Goswami A. Abundance evolution of intermediate mass elements (C to Zn) in the Milky Way halo and disk / A. Goswami, N. Prantzos. // *Astron. Astrophys.* – 2000. – Vol. 359. – P. 191–212.

151. Gozha M. L. Two populations of open star clusters in the Galaxy / M. L. Gozha, V. V. Koval', V. A. Marsakov. // *Astron. Letters.* – 2012. – Vol. 38. – P. 519–530.

152. Grand R. J. The Auriga Project: the properties and formation mechanisms of disc galaxies across cosmic time [Electronic resource] / R.J.J. Grand, F.A. Gímez, F. Marinacci // Last access 2000. – eprint arXiv:1610.01159.

153. Gratton R. G. Abundances of neutron-capture elements in metal-poor stars / R. G. Gratton, C. Sneden. // *Astron. Astrophys.* – 1994. – Vol. 287. – P. 927–946.

154. Greenstein J. B-type Star of Population II / J. Greenstein, J. Cuffey. // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* – 1954. – Vol. 391. – P.187–190.

155. Hansen C. The origin of palladium and silver / C. Hansen, F. Primas. // *Astron. Astrophys.* – 2011. – Vol. 525. – Id. L5.

156. Hartmann J. Investigations on the spectrum and orbit of delta Orionis / J. Hartmann // *Astrophys. J.* – 1904. – Vol. 19. – P. 268–286.

157. Haywood M. A revision of the solar neighbourhood metallicity distribution / M. Haywood. // *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* – 2001. – Vol. 325. – P. 1365–1382.

158. HE 0557-4840: Ultra-Metal-Poor and Carbon-Rich / [J. Norris, N. Christlieb, A. Korn et al.]. // *Astrophys. J.* – 2007. – Vol. 670. – P. 774–778.

159. HE 1327-2326, an Unevolved Star with [Fe/H]<-5.0. I. A Comprehensive Abundance Analysis. / [W. Aoki, W., A. Frebel, N. Christlieb et al.]. // *Astrophys. J.* – 2006. – Vol. 639. – P. 897–917.

160. HEAO 3 discovery of ^{26}Al in the interstellar medium / [W. Mahoney, J. Ling, W. Wheaton et al.]. // *Astrophys. J.* – 1984. – Vol. 286. – P. 578–585

161. Heger A. The Nucleosynthetic Signature of Population III / A. Heger, S. E. Woosley // *Astrophys. J.* – 2002. – Vol. 567. – P. 532–543.

162. Helfer H. Abundances in Some Population II K Giants / H. Helfer, G. Wallerstein, J. Greenstein. // *Astrophys. J.* – 1959. – Vol. 129. – P. 700–719.

163. Helmi A. A box full of chocolates: The rich structure of the nearby stellar halo revealed by Gaia and RAVE [Electronic resource] / A. Helmi, J. Veljanoski, M. A. Breddels, H. Tian, L.V. Sales. // Last access 2016. – eprint arXiv:1611.00222.

164. Hertzprung E. Über die Verteilung galaktischer Objekte / E. Hertzprung. // *Astron. Nachr.* – 1912. – Vol. 192. – P. 261.

165. Hoffman R.D. Nucleosynthesis below $A=100$ in Massive Stars / R.D. Hoffman, S.E. Woosley, T.A. Weaver // *Astrophys. J.* - 2001. - Vol. 549. - P. 1085–1092.

166. Holmberg E. On the Clustering Tendencies among the Nebulae / E. Holmberg. // *Astrophys. J.* – 1940. – Vol. 92. – P. 200.

167. Holmberg E. On the Clustering Tendencies among the Nebulae. II. a Study of Encounters Between Laboratory Models of Stellar Systems by a New Integration Procedure / E. Holmberg. // *Astrophys. J.* – 1941. – Vol. 94. – P. 385.
168. Hubble E. Cepheids in spiral nebulae / E. P. Hubble. // *Observatory.* – 1925. – Vol. 48 – P. 139–142.
169. Hubble E. Non-Galactic Nebulae I. Classification and apparent dimensions. / Edwin Hubble. // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* – 1926. – Vol. 38. – P. 258–260.
170. Huggins W. An Atlas of Representative Stellar Spectra from n 4870 to λ 8400 / W. Huggins, L. Huggins. // *Science.* – 1901. – Vol. 13. – P. 222–224.
171. Huggins W. On the Spectra of Some of the Nebulae. / W. Huggins, W. Miller. // *Philosoph. Trans. Roy. Soc. London.* – 1864. – Vol. 154. – P. 437–444.
172. Hunt, J. A. S. Fast rotating group of stars observed in Gaia TGAS: a signature driven by the Perseus arm? [Electronic resource] / J. A. S. Hunt, D. Kawata, G. Monari, R. t J. Grand, J. B. Famaey, A. Siebert // Last access 2016, eprint arXiv:1611.00761.
173. Iben I. Jr. Single and binary star evolution / I. Jr. Iben // *Astrophys. J. Suppl.* – 1991. – Vol. 76. – P. 55–114.
174. Ibukiyama A. HIPPARCOS age-metallicity relation of the solar neighbourhood disc stars / A. Ibukiyama, N. Arimoto. // *Astron. Astrophys.* – 2002. – Vol. 394. – P. 927–941.
175. Including star formation and supernova feedback within cosmological simulations of galaxy formation / S. Kay, F. Pearce, C. Frenk, A. Jenkins. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2002. – Vol. 330. – P. 113–128.
176. Insight into the Formation of the Milky Way Through Cold Halo Substructure. I. The ECHOS of Milky Way Formation / [K. C. Schlaufman, C. M. Rockosi, C. Allende Prieto et al. // *Astrophys. J.* – 2009. – Vol. 703. – P. 2177–2204.
177. Integrated Nucleosynthesis in Neutrino-driven Winds / L. Roberts, S. Woosley, R. Hoffman. // *Astrophys. J.* – 2010. – Vol. 722. – P. 954–967.
178. Interaction between collisionless galactic discs and non-axisymmetric dark matter haloes / [A. V. Khoperskov, S. A. Khoperskov, A. V. Zasov et al.]. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2013. – Vol. 431. – P. 1230–1239.
179. Interpretation of CEMP(s) and CEMP (s + r) Stars with AGB Models / S. Bisterzo, R. Gallino, O. Straniero, W. Aoki. // *Publ. Astron. Soc. Australia.* – 2009. – Vol. 26. – P. 314–321.
180. Ireland T. Large heterogeneous Mg-26 excesses in a hibonite from the Murchison meteorite / T. Ireland., W. Compston. // *Nature*– 1987. – Vol. 327. – P. 689–692.
181. Iron-group Abundances in the Metal-poor Main-Sequence Turnoff Star HD~84937 / [C. Sneden, J. Cowan, C. Kobayashi et al.]. // *Astrophys. J.* – 2016. – Vol. 817. – Id. 53.
182. Israelian G. Oxygen Abundances in Unevolved Metal-poor Stars from Near-Ultraviolet OH Lines / G. Israelian, R. G. Garcia Lopez, R. Rebolo. // *Astrophys. J.* – 1998. – Vol. 507. – P. 805–817.
183. Jeans, J. H. *Astronomy and cosmogony* / Cambridge. The University press. – 1928.
184. Johnson D. Calculating galactic space velocities and their uncertainties, with an application to the Ursa Major group. / D. Johnson, H. Soderblom, R. David. // *Astron. J.* – 1987. – Vol. 93. – P. 864–867.
185. Johnson J. Ages for Metal-poor Stars / J. Johnson, M. Bolte. // *Astrophys. J.* – 2001. – Vol. 554. – P. 888–902.
186. Kappeler F. s-process nucleosynthesis-nuclear physics and the classical model / F. Kappeler, H. Beer, K. Wisshak. // *Rep. Prog. Physics.* – 1989. – Vol. 52. – P. 945–1013.
187. Karakas A. Stellar Models and Yields of Asymptotic Giant Branch Stars / A. Karakas, J. Lattanzio. // *Publ. Astron. Soc. Australia.* – 2007. – Vol. 24. – P. 103–117.

188. Khoperskov S. A. Interaction of the dark-matter cusp with the baryonic component in disk galaxies / S. A. Khoperskov, B. Shustov, A. Khoperskov. // *Astron. Rep.* – 2012. – Vol. 56. – P.664–671.
189. Kobayashi C. Inhomogeneous chemical enrichment in the Galactic Halo / C. Kobayashi // *The General Assembly of Galaxy Halos: Structure, Origin and Evolution*, 2016. / *Proceedings of the IAU Symposium.* – 2016. – Vol. 317. – P. 57–63.
190. Kobayashi C. The evolution of isotope ratios in the Milky Way Galaxy / C. Kobayashi, A. Karakas, H. Umeda. // *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* – 2011. – Vol. 414. – P. 3231–3250.
191. Komiya Y. Population III Stars Around the Milky Way / Y. Komiya, T.Suda, M. Fujimoto. // *Astrophys. J.* – 2016. – Vol. 820. – Id. 59.
192. Kroupa P. Recent Advances on IMF Research The Labyrinth of Star Formation, Astrophysics and Space Science Proceedings, / P. Kroupa. // Springer International Publishing Switzerland. – 2014. – Vol. 36. – P. 335.
193. Kroupa P. The distribution of low-mass stars in the Galactic disc / P. Kroupa, C. Tout, G. Gilmore. // *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* – 1993. – Vol. 262. – P. 545–587.
194. Kroupa P. Thickening of galactic discs through clustered star formation / P. Kroupa. // *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* – 2002. – Vol. 330. – P. 707–718.
195. Kuhn M. A. The Spatial Structure of Young Stellar Clusters. II. Total Young Stellar Populations / M. A. Kuhn, K. V. Getman, E. D. Feigelson // *Astrophys. J.* – 2015. – Vol. 802. – Id. 60.
196. Lambert D. Prospecting for Chemical Tags among Open Clusters / D. Lambert, A. B. S. Reddy. // *Astrophys. J.* – 2016. – Vol. 831. – Id. 202.
197. Larson R. Models for the formation and evolution of disc galaxies / R.B. Larson. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 1976. – Vol. 176. – P. 31–37.
198. Leavitt H. Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic Cloud / H. Leavitt, E. Pickering. // *Harvard College Observatory Circular.* – 1912. – Vol. 173. – P. 1–3.
199. Lepine J. R. D. Star formation by infall of high velocity clouds on the galactic disk / J. R. D Lepine, G. Duvert. // *Astron. Astrophys.* – 1994. – Vol. 286. – P. 60– 71.
200. Li H. The alignment of molecular cloud magnetic fields with the spiral arms in M33 / H. Li, T. Henning. // *Nature.* – 2011. – Vol. 479. – P. 499–501.
201. Light, Alpha, and Fe-peak Element Abundances in the Galactic Bulge / [C. Johnson, R. Rich, C. Kobayashi et al.]. // *Astron. J.* – 2014. – Vol.148. – Id. 67.
202. Limongi M. Presupernova Evolution and Explosive Nucleosynthesis of Zero Metal Massive Stars / M. Limongi, A. Chieffi. // *Astrophys. J. Suppl.* – 2012. – Vol. 199. – Id. 38.
203. Lin C.C. On the Spiral Structure of Disk Galaxies / C.C. Lin, F. H. Shu. // *Astrophys. J.* – 1964. – Vol. 140. – P. 646.
204. Lindblad B. On the Cause of Star-Streaming / B. Lindblad. // *Astrophys. J.* – 1925. – Vol. 62. – P. 191.
205. Lindblad B. On the nature of the spiral nebulae / B. Lindblad. // *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* – 1927. – Vol. 87. – P. 420.
206. Lindblad B. Spectrophotometric methods for determining stellar luminosity / B. Lindblad. // *Astrophys. J.* – 1922. – Vol. 55. – P. 85–118.
207. Local kinematics of K and M giants from CORAVEL / Hipparcos Tycho-2 data. Revisiting the concept of superclusters [B. Famaey, A. Jorissen, X. Luri et al.] / *A&A.* – 2005. – Vol. 430. – P. 165–186.
208. Lockmann F. Gas Currently Accreting Onto the Milky Way: The Smith Cloud [Electronic resource] / F. Lockmann // Last access 2015. – IAUGA 29, Id.2257086.
209. Lypez-Corredoira M. Generation of galactic disc warps due to intergalactic accretion flows onto the disc / M. Lypez-Corredoira, J. Betancort-Rijo, J. Beckman. / *Astron. Astrophys.* – 2002. – Vol. 386. – P. 169–186.

210. Low-Mass AGB Stellar Models for $0.003 \leq Z \leq 0.02$: Basic Formulae for Nucleosynthesis Calculations / O. Straniero, I. Domínguez, S. Cristallo, R. Gallino. / *Publ. Astron. Soc. Australia*. – 2003. – Vol. 20. – P. 389–392.

211. LTE or non-LTE, that is the question. The NLTE chemical evolution of strontium in extremely metal-poor stars / [C. Hansen, M. Bergemann, G. Cescutti et al.]. // *Astron. Astrophys.* – 2013. – Vol. 551. – Id. A57.

212. Maeder A. Evolution of chemical abundances in massive stars. I - OB stars, Hubble-Sandage variables and Wolf-Rayet stars - Changes at stellar surfaces and galactic enrichment by stellar winds. II - Abundance anomalies in Wolf-Rayet stars in relation with cosmic ray / A. Maeder. // *Astron. Astrophys.* – 1983. – Vol. 120. – P. 113–135.

213. Maeder A. Stellar yields as a function of initial metallicity and mass limit for black hole formation / A. Maeder. // *Astron. Astrophys.* – 1992. – Vol. 264. – P. 105–120.

214. Magellanic stream and the dynamics of our Hypergalaxy / J. Einasto, M. Jeeveer, A. Kaasik, U. Haud, U. // *Astron. Tsir.* – 1975. – Vol. 895. – P. 1–2.

215. Magnetic fields near the peripheries of galactic discs / [E. Mikhailov, A. Kasparova, D. Moss et al.]. // *Astron. Astrophys.* – 2014. – Vol. 568. – Id. A66.

216. Maoz D. Observational Clues to the Progenitors of Type Ia Supernovae / D. Maoz, F. Mannucci, G. Nelemans // *AR Astron. Astrophys.* – 2014. – Vol. 52. – P. 107–170.

217. Magnetorotationally Driven Supernovae as the Origin of Early Galaxy r-process Elements? / [C. Winteler, R. Kauppi, A. Perego et al.]. // *Astrophys. J.* – 2012. – Vol. 750. – Id. L22.

218. Majaess D. Characteristics of the Galaxy according to Cepheids / D. Majaess, D. Turner, D. Lane. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2009. – Vol. 398. – P. 263–270.

219. Malkan M. Near Infrared Photometry of Globular Clusters Near the Galactic Center / M. A. Malkan. // *Astrophysical Parameters for Globular Clusters / Proceedings of IAU Colloquium No. 68.* – 1981. – P. 533.

220. Mapping atomic and diffuse interstellar band absorption across the Magellanic Clouds and the Milky Way / M. Bailey, Van Loon J., P. Sarre, J. Beckman. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2015. – Vol. 454. – P. 4013–4026.

221. Mapping the Monoceros Ring in 3D with Pan-STARRS1 / [E. Morganson, B. Conn, H.-W. Rix et al.]. // *Astrophys. J.* – 2016. – Vol. 825. – Id. 140.

222. Marsakov V. A. Formation of Galactic Subsystems in Light of the Magnesium Abundance in Field Stars: The Thick Disk / V. A. Marsakov, T. V. Borkova // *Astron. Letters.* – 2005. – Vol. 31. – P. 515–527.

223. Marsakov V. A. Properties of stellar streams in the Galactic disk / V. A. Marsakov, V. V. Koval, M. L. Gozha // *Baltic Astron.* – 2016. – Vol. 25. – P. 377 – 383.

224. Marsakov V. The history of star formation in a dwarf galaxy: the parent of the ω Centauri globular cluster and the Centaurus stellar stream. // V. Marsakov, T. Borkova, V. Koval. / In: Variable stars, the Galactic halo and Galaxy formation, B. V. Kurarkin Centenary Conference, Held in Zvenigorod, Russia, 12-16 October, 2009. Edited by Sterken C.; Samus N.; Szabados L. // *Moscow University Press.* – 2010. – P. 133–135.

225. Mashonkina L. Barium and europium abundances in cool dwarf stars and nucleosynthesis of heavy elements / L. Mashonkina, T. Gehren. // *Astron. Astrophys.* – 2000. – Vol. 364. – P. 249–264.

226. Mashonkina L. Heavy element abundances in cool dwarf stars: An implication for the evolution of the Galaxy / L. Mashonkina, T. Gehren. // *Astron. Astrophys.* – 2001. – Vol. 376. – P. 232–247.

227. Mass and metallicity requirement in stellar models for galactic chemical evolution applications / [B. Côté, C. West, A. Heger et al.] // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2016c. – Vol. 463. – P. 3755–3767.

228. Mathewson D. S. The Magellanic Stream 1974 Galactic Radio Astronomy: Proceedings from IAU Symposium no. 60 held at Maroochydore Queensland, Australia,

- 3-7 September, 1973. / D. S. Mathewson, M. N. Cleary, J. D. Murray // Edited by Frank J. Kerr and Simon Christian Simonson. International Astronomical Union. Symposium no. 60, Dordrecht-Holland; Boston: D. Reidel Pub. Co., 1973. – P. 617.
229. Mayall N. The Radial Velocities of Fifty Globular Star Clusters / N.U. Mayall. // *Astrophys. J.* – 1946. – Vol. 104. – P. 290–323.
230. McClure R. Five-color intermediate-band photometry of stars, clusters, and galaxies / R. McClure, S. Van den Bergh. // *Astron. J.* – 1968. – Vol. 73. – P. 313–337.
231. Measurement of stellar age from uranium decay / [R. Cayrel, V. Hill, T. Beers et al.]. // *Nature*. – 2001. – Vol. 409. – P. 691–692.
232. Messier C. Catalogue des nebuleuses et des amas d'étoiles / C. Messier. // *Connaissance des Temps*. – 1784 – 1850. – P. 227–269.
233. Mestel L. Star formation in magnetic dust clouds / L. Mestel, L. Jr. Spitzer / // *MNRAS*. – Vol. 116. – P. 503.
234. Metal Abundances at $z < 1.5$: Fresh Clues to the Chemical Enrichment 'History of Damped Ly α Systems' / [M. Pettini, S. Ellison, C. Steidel et al.]. // *Astrophys. J.* – 1999. – Vol. 510. – P. 576–589.
235. Meynet G. The early star generations: the dominant effect of rotation on the CNO yields / G. Meynet, S. Ekström, A. Maeder. // *Astron. Astrophys.* – 2006. – Vol. 447. – P. 623–639.
236. Miller M. J. The Interaction of the Fermi Bubbles with the Milky Way's Hot Gas Halo / M. J. Miller, J. N. Bregman. // *Astrophys. J.* – 2016. – Vol. 829. – Id. 9.
237. Mn abundances in the stars of the Galactic disc with metallicities $-1.0 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.3$ / [Mishenina T., Gorbaneva T., Pignatari M. et al.]. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2015. – Vol. 454. – P. 1585–1594.
238. Modelling accretion disc and stellar wind interactions: the case of Sgr A* / I. Christie, M. Petropoulou, P. Mimica, D. Giannios. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2016. – Vol. 459. – P. 2420–2431.
239. Models for Metal-poor Stars with Enhanced Abundances of C, N, O, Ne, Na, Mg, Si, S, Ca, and Ti, in Turn, at Constant Helium and Iron Abundances / [D. A. Vandenberg, P. A. Bergbusch, A. Dotter et al.]. // *Astrophys. J.* – 2012. – Vol. 755. – Id. 1.
240. Morrison H. Where does the disk stop and the halo begin? Kinematics in a rotation field / H. Morrison, C. Flynn, K. Freeman. // *Astron. J.* – 1990. – Vol. 100. – P. 1191–1222.
241. Mould J. TiO band strengths in metal-rich globular clusters. II / J. Mould, D. Stutzman, D. McElroy. // *Astrophys. J.* – 1979. – Vol. 228. – P. 423–429.
242. Münch G. Interstellar Matter at Large Distances from the Galactic Plane / G. Münch, H. Zirin. // *Astrophys. J.* – 1961. – Vol. 133. – P. 11.
243. Müller B. The Status of Multi-Dimensional Core-Collapse Supernova Models / B. Müller. // *Publ. Astron. Soc. Australia*. – 2016. – Vol. 33. – Id. e048.
244. Near-Ultraviolet Observations of HD 221170: New Insights into the Nature of r-Process-rich Stars / [I. Ivans, J. Simmerer, C. Sneden et al.]. // *Astrophys. J.* – 2006. – Vol. 645. – P. 613–633.
245. Neutrino-Induced Nucleosynthesis of A>64 Nuclei: The μp Process / [C. Fröhlich, G. Martínez-Pinedo, M. Liebendörfer et al.]. // *Phys. Rev. Letters*. – 2006. Vol. 96. – Id. 142502.
246. Neutron Capture Elements in s-Process-Rich, Very Metal-Poor Stars / [W. Aoki, S. Ryan, J. Norris et al.]. // *Astrophys. J.* – 2001. – Vol. 561. – P. 346–363.
247. Neutron Capture in Low-Mass Asymptotic Giant Branch Stars: Cross Sections and Abundance Signatures / [C. Arlandini, F. Käppeler, K. Wisshak et al.]. // *Astrophys. J.* – 1999. – Vol. 525. – P. 886–900.
248. Neutron-Capture Elements in the Early Galaxy: Insights from a Large Sample of Metal-poor Giants / [D. Burris, C. Pilachowski, T. Armandroff et al.]. // *Astrophys. J.*

– 2000. – Vol. 544. – P. 302–319.

249. New analysis of the two carbon-rich stars CS 22948-27 and CS 29497-34: Binariness and neutron capture elements / [B. Barbuy, M. Spite, F. Spite et al.]. // *Astron. Astrophys.* – 2005. – Vol. 429. – P. 1031–1042.

250. New grids of stellar models from 0.8 to 120 solar masses at $Z = 0.020$ and $Z = 0.001$ / G. Schaller, D. Schaerer, G. Meynet, A. Maeder. // *Astron. Astrophys. Suppl.* – 1992. – Vol. 96. – P. 269–331.

251. New insights on Ba overabundance in open clusters. Evidence for the intermediate neutron-capture process at play? / [T. V. Mishenina, M. Pignatari, G. Carraro et al.]. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2015. – Vol. 446. – P. 3651–3668.

252. Nishimura N. The r-process Nucleosynthesis in the Various Jet-like Explosions of Magnetorotational Core-collapse Supernovae / N. Nishimura, T. Takiwaki, F.-K. Thielemann. // *Astrophys. J.* – 2015. – Vol. 810. – Id. 109.

253. Nissen P. E. Two distinct halo populations in the solar neighborhood. Evidence from stellar abundance ratios and kinematics / P. E. Nissen, W. J. Schuster // *Astron. Astrophys.* – 2010. – Vol. 511. – Id. L10.

254. Nissen P. E. Two distinct halo populations in the solar neighborhood. Evidence from stellar abundances of Mn, Cu, Zn, Y, and Ba / P. E. Nissen, W. J. Schuster // *Astron. Astrophys.* – 2011. – Vol. 530. – Id. A15.

255. NLTE Abundances of Sodium, Magnesium and Barium in the Globular Clusters M10 and M71 / [T. V. Mishenina, A. Kuzin'skas, S. M. Andrievsky et al.]. // *Baltic Astron.* – 2009. – Vol. 18. – P. 193–203.

256. Nomoto K. Accreting white dwarf models of Type I supernovae. III - Carbon deflagration supernovae / K. Nomoto, F.-K. Thielemann, K. Yokoi. // *Astrophys. J.* – 1984. – Vol. 286. – P. 644–658.

257. Nomoto K. Explosive nucleosynthesis and Type I supernovae / K. Nomoto, F.-K. Thielemann, J. C. Wheeler et al.]. // *Astrophys. J. Letters.* – 1984. – Vol. 279. – P. L23–L26.

258. Nomoto K. Nucleosynthesis in Stars and the Chemical Enrichment of Galaxies / K. Nomoto, C. Kobayashi, N. Tominaga. // *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* – 2013. – Vol. 51. – P. 457–509.

259. Norris J. Extremely Metal-poor Stars. IV. The Carbon-rich Objects / J. Norris, S. Ryan, T. Beers. // *Astrophys. J.* – 1997. – Vol. 488. – P. 350–363.

260. Nucleosynthesis and Mixing on the Asymptotic Giant Branch. III. Predicted and Observed s-Process Abundances / [M. Busso, R. Gallino, D. Lambert et al.]. // *Astrophys. J.* – 2001. – Vol. 557. – P. 802–821.

261. Nucleosynthesis in Chandrasekhar Mass Models for Type IA Supernovae and Constraints on Progenitor Systems and Burning-Front Propagation / [K. Iwamoto, F. Brachwitz, K. Nomoto et al.]. // *Astrophys. J. Suppl.* – 1999. – Vol. 125. – P. 439–462.

262. Nucleosynthesis in Massive Stars with Improved Nuclear and Stellar Physics / T. Rauscher, A. Heger, R. Hoffman, S. Woosley. // *Astrophys. J.* – 2002. – Vol. 576. – P. 323–348.

263. Nucleosynthesis in neutrino-driven supernovae / [C. Fröhlich, W. Hix, G. Martínez-Pinedo et al.]. // *New Astr. Rev.* – 2006. – Vol. 50. – P. 496–499.

264. Nucleosynthesis in type Ia supernovae / [K. Nomoto, K. Iwamoto, N. Nakasato et al.]. // *Nuclear Physics A.* – 1997. – Vol. 621. – P. 467–476.

265. Nucleosynthesis Modes in The High-Entropy Wind of Type II Supernovae: Comparison of Calculations With Halo-Star Observations / [K. Farouqi, K. Kratz, L. I. Mashonkina et al.]. // *Astrophys. J.* – 2009. – Vol. 694. – P. L49–L53.

266. Nucleosynthetic signatures of the first stars / [A. Frebel, W. Aoki, N. Christlieb et al.]. // *Nature.* – 2005. – Vol. 434. – P. 871–873.

267. NuGrid Stellar Data Set. I. Stellar Yields from H to Bi for Stars with Metallicities

Z = 0.02 and Z = 0.01 / [M. Pignatari, F. Herwig., R. Hirschi et al.]. // *Astrophys. J. Suppl.* – 2016. – Vol. 225. – Id. 24.

268. Nyktyuk T. V. The Galactic thick and thin disks: differences in evolution / T. V. Nyktyuk, T. V. Mishenina. // *Astron. Astrophys.* – 2006. – Vol. 456. – P. 969–976.

269. Observational Constraints on First-star Nucleosynthesis. I. Evidence for Multiple Progenitors of CEMP-No Stars / [J. Yoon, T. C. Beers, V. M. Placco et al.]. // *Astrophys. J.* – 2016. – Vol. 833. – Id. 20.

270. Observing the metal-poor Solar neighbourhood: A comparison of galactic chemical evolution predictions / T. Mishenina, M. Pignatari, B. Côté et al. // [Electronic resource]. – Last access: 2017, eprint arXiv:1705.03642.

271. Oh S. H. Physical Properties of Tidal Features of Interacting Disk Galaxies: Three-dimensional Self-consistent Models / S. H. Oh, W.-T. Kim, H. M. Lee. // *Astrophys. J.* – 2015. – Vol. 807. – Id. 73.

272. Olano C. The hypothesis of the local supercloud and the nearby moving groups of stars / C. A. Olano. // *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* – 2016. – Vol. 458. – P. 4354–4367.

273. On the astrophysical robustness of the neutron star merger r-process / O. Korobkin, S. Rosswog, A. Arcones, C. Winteler. // *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* – 2012. – Vol. 426. – P. 1940–1949.

274. On the correlation of elemental abundances with kinematics among galactic disk stars / T. V. Mishenina, C. Soubiran, V. V. Kovtyukh, S. A. Korotin. // *Astron. Astrophys.* – 2004. – Vol. 418. – P.551–562.

275. On the Metallicity and Origin of the Smith High-velocity Cloud / [A. Fox, N. Lehner, F. Lockman, B. Wakker et al.]. // *Astrophys. J. Letters.* – 2016. – Vol. 816. – Id. L11.

276. On the Nature of the Local Spiral Arm of the Milky Way / [Y. Xu, J. Li, M. Reid et al.]. // *Astrophys. J.* – 2013. – Vol. 769. – Id. 15.

277. On the Need for the Light Elements Primary Process (LEPP) / S. Cristallo, C. Abia, O. Straniero, L. Piersanti. // *Astrophys. J.* – 2015. – Vol. 801. – Id. 53.

278. Oort J. Observational evidence confirming Lindblad's hypothesis of a rotation of the galactic system / J. H. Oort. // *Bull. Astron. Inst. Netherlands.* – 1927. – Vol. 3. – P. 275.

279. Oort J. Possible Interpretations of the High-Velocity Clouds / J. H. Oort. // *Bull. Astron. Inst. Netherlands.* – 1966. – Vol. 18. – P. 421–438.

280. Optical and infrared emission of H II complexes as a clue to the PAH life cycle / M. S. Khramtsova, D. S. Wiebe, T. A. Lozinskaya, O. V. Egorov. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2014. – Vol. 444. – P. 757–775.

281. Origin of the metallicity distribution in the thick disc / [M. Miranda, K. Pilkington, B. Gibson et al.]. // *Astron. Astrophys.* – 2016. – Vol. 587. – Id. A10.

282. Oxygen abundances in Halo giants. IV - The oxygen-sodium anticorrelation in a sample of 22 bright giants in M13 / R. Kraft, C. Sneden, G. Langer, M. Shetrone. // *Astron. J.* – 1993. – Vol. 106. – P. 1490–1507.

283. Oxygen abundance in halo stars from O I triplet / T. Mishenina, S. Korotin, V. Klochkova, V. Panchuk. // *Astron. Astrophys.* – 2000. – Vol. 353. – P. 978–986.

284. Oxygen, Sodium, Magnesium, and Aluminum Abundances in M13 Giants Brighter Than the Horizontal Branch / R. Kraft, C. Sneden, G. Langer, C. Prosser. // *Astron. J.* – 1997. – Vol. 113. – P. 279–295.

285. Oxygen abundances in halo giants. V. The oxygen -sodium anticorrelation in a sample of 22 bright giants in M13 / [R. Kraft, C. Sneden, G. Langer et al.]. // *Astron. J.* – 1993. – Vol. 106. – P. 1490–1507.

286. Oxygen in Unevolved Metal-Poor Stars from Keck Ultraviolet HIRES Spectra / A. M. Boesgaard, J. K King, C. P. Deliyannis, S. S. Vogt. // *Astron. J.* – 1999. – Vol. 117. – P. 492–507.

287. Pagel B. An analytical model for the evolution of primary elements in the

- Galaxy / B. Pagel. // *Rev. Mex. Astron. Astrofis.* – 1989. – Vol. 18. – P. 161–172.
288. Pagel B. The G-dwarf problem and radio-active cosmochronology / Evolutionary phenomena in galaxies (A90-31743 13-90) // Cambridge and New York, Cambridge University Press. – 1989. – P. 201–223.
289. Pagel B. E. J. Chemical evolution of primary elements in the Galactic disc: an analytical model / B. E. J. Pagel, G. Tautvaisiene. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 1995. – Vol. 276. – P. 505–514.
290. Pakhomov Yu. V. Chemical abundance analysis for the atmospheres of red giants in the Hercules stream / Yu. V. Pakhomov, L.L. Antipova, A.A. Boyarchuk / *Kinem. Fiz. Neb. Tel.* – 2009. – Vol. 26. – P. 194–197.
291. Parker P. Hydrogen burning in the pp chain and CN cycle / P. Parker. // *Rev. of mod. Phys.* – 1997. – Vol. 69. – P.1013–1016.
292. Pease F. Spectra of Stars in the Hercules Cluster, M. 13 / F.G. Pease. // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* – 1914. – Vol. 26. – P. 204.
293. Peculiarities of neutron-capture-element abundances in Galactic open clusters / V. A. Marsakov, M. L. Gozha, V. V. Koval', L. V. Shpigel'. // *Astron. Rep.* – 2016. – Vol. 60. – P. 61–72.
294. Peculiarities of α -element abundances in Galactic open clusters / V. A. Marsakov, M. L. Gozha, V. V. Koval', L. V. Shpigel'. // *Astron. Rep.* – 2016. – Vol. 60. – P.43–60.
295. Pickering E. Harvard College Observatory, circular no. 18. Variable star clusters / E. Pickering, S. Bailey. // *Astrophys. J.* – 1897. – Vol. 6. – P. 258–259.
296. Pignatari, M. Carbon-rich presolar grains from massive stars. Subsolar $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ and $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ ratios and the mystery of ^{15}N . [Electronic resource] / [M. Pignatari, et al.]. // Last access 2015: ArXiv e-prints1506.09056.
297. Pilyugin L. Chemical evolution of the Milky Way Galaxy. 1. On the infall model of galactic chemical evolution / L.S. Pilyugin. // *Astron. Astrophys.* – 1996. – Vol. 313. – P. 783–791.
298. Pilyugin L. Chemical evolution of the Milky Way Galaxy. 3. Is the disk formed through mergers of fragments / L.S. Pilyugin. // *Astron. Astrophys.* – 1996. – Vol. 313. – P. 803–809.
299. Planck intermediate results. XLIV. Structure of the Galactic magnetic field from dust polarization maps of the southern Galactic cap Planck Collaboration / [N. Aghanim, M. I. R. Alves, D. Arzoumanian et al.] // *Astron. Astrophys.* – 2016. – Vol. 596. – Id. A105.
300. Planck 2015 results. I. Overview of products and scientific results Planck Collaboration / [R. Adam, P. A. R. Ade, N. Aghanim et al.] // *Astron. Astrophys.* – 2016. – Vol. 594. – Id. A1.
301. Poggio E. Exploring the nature of the Galactic warp / E. Poggio, R. Drimmel, R. L. Smart, A. Spagna, M. G. Lattanzi // *Galactic Surveys: New Results on Formation, Evolution, Structure and Chemical Evolution of the Milky Way, Proceedings of the conference held 25-29 January, 2016 in Sesto (BZ) Italy.* / 2016. – Id. 9.
302. Polyachenko E. V. On the bar formation mechanism in galaxies with cuspy bulges / E. V. Polyachenko, P. Berczik, A. Just. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2016. – Vol. 462. – P. 3727–3738.
303. Popping star clusters as building blocks of the Milky Way's thick disc / [P. Assmann, M. Fellhauer, P. Kroupa et al.]. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2011. – Vol. 415. – P. 1280–1289.
304. Portinari L. Galactic chemical enrichment with new metallicity dependent stellar yields / L. Portinari, C. Chiosi, A. Bressan. // *Astron. Astrophys.* – 1998. – Vol. 334. – P. 505–539.
305. Preston G. W. A Spectroscopic Study of the RR Lyrae Stars / G. W. Preston // *Astrophys. J.* – 1959. – Vol. 130. – P. 507 – 538.
306. Proper motions of the optically visible open clusters based on the UCAC4

catalog / [W. Dias, H. Monteiro, T. Caetano et al.]. // *Astron. Astrophys.* – 2014. – Vol. 564. – Id. A79.

307. Proton Capture Chains in Globular Cluster Stars. II. Oxygen, Sodium, Magnesium, and Aluminum Abundances in M13 Giants Brighter Than the Horizontal Branch / [R. Kraft, C. Sneden, G. Smith et al.]. // *Astron. J.* – 1997. – Vol. 113. – P. 279–295.

308. Proton Capture Chains in Globular Cluster Stars. I. Evidence for Deep Mixing Based on Sodium and Magnesium Abundances in M13 Giants / [C. Pilachowski, C. Sneden, R. Kraft et al.]. // *Astron. J.* – 1996. – Vol. 112. – P. 545.

309. Qian Y.-Z. Abundances of Sr, Y, and Zr in Metal-Poor Stars and Implications for Chemical Evolution in the Early Galaxy / Y.-Z. Qian, G. J. Wasserburg // *Astrophys. J.* – 2008. Vol. 687. – Id. 272–286.

310. Quantifying the uncertainties of chemical evolution studies. II. Stellar yields / D. Romano, A. Karakas, M. Tosi, F. Matteucci. // *Astron. Astrophys.* – 2010. – Vol. 522. – Id. A32.

311. Quinn P. Heating of galactic disks by mergers / P. Quinn, L. Hernquist, D. Fullagar. // *Astrophys. J.* – 1993. – Vol. 403. – P. 74–93.

312. Radial Age Gradient in the Geometrically Thick Disk of the Milky Way / [M. Martig, I. Minchev, M. Ness et al.]. // *Astrophys. J.* – 2016. – Vol. 831. – Id. 139.

313. Radial migration does little for Galactic disc thickening / [I. Minchev, B. Famaey, A. Quillen et al.]. // *Astron. Astrophys.* – 2012. – Vol. 548. – Id. A127.

314. Raiteri C. M. s-processing in massive stars as a function of metallicity and interpretation of observational trends / C. M. Raiteri, R. Gallino, M. Busso // *Astrophys. J.* – 1992. – Vol. 387. – P. 263–275.

315. Reconstructing the star formation history of the Milky Way disc(s) from chemical abundances / [O. Snaith, M. Haywood, P. Di Matteo et al.] // *Astron. Astrophys.* – 2015. – Vol. 578. – Id. A87.

316. Reddy A. B. S. The evolution of the Milky Way: new insights from open clusters / A. B. S. Reddy, D. L. Lambert, S. Giridhar. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2016. – Vol. 463. – P. 4366–4382.

317. Reddy B. E. Elemental abundance survey of the Galactic thick disc / B. E. Reddy, D. L. Lambert, C. Allende Prieto. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2006. – Vol. 367. – P. 1329–1366.

318. Reid M. J. On the Rotation Speed of the Milky Way Determined from HI Emission / M. J. Reid, T. M. Dame. // *Astrophys. J.* – 2016. – Vol. 832. – Id. 159.

319. Reid N. Star counts redivivus. I - A new look at the galaxy at faint magnitudes / N. Reid, S. Majewski. // *Astrophys. J.* – 1993. – Vol. 409. – P. 635–662.

320. Renaud F. The origin of the Milky Way globular clusters / F. Renaud, O. Agertz, M. Gieles // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2017. – Vol. 465. – P. 3622–3636.

321. Renzini A. Advanced evolutionary stages of intermediate-mass stars. I - Evolution of surface compositions / A. Renzini, M. Voli. // *Astron. Astrophys.* – 1981. – Vol. 94. – P. 175–193.

322. Reshetnikov V. P. The Milky Way as a galaxy / V. P. Reshetnikov. // *Astrophysics.* – 2000. – Vol. 43. – P. 145–155.

323. Rey   C. Early galaxy evolution from deep wide field star counts. II. First estimate of the thick disc mass function / C. Rey  , A. Robin. // *Astron. Astrophys.* – 2001. – Vol. 373. – P. 886–894.

324. Robin A. Stellar populations in the Milky Way - A synthetic model / A. Robin, M. Creze. // *Astron. Astrophys. Suppl.* – 1986. – Vol. 64. – P. 71–90.

325. Rolfs C. Hydrogen burning of ¹⁷O in the CNO cycle / C. Rolfs, W. Rodney. // *Nucl. Phys. A.* – 1975. – Vol. 250. – P. 295.

326. Roman N. A group of high velocity F-type stars / N.G. Roman. // *Astron. J.* – 1954. – Vol. 59. – P. 307–312.

327. r-process chronometers / K. Kratz, B. Pfeiffer, J. Cowan, C. Sneden. // *New Astron. Rev.* – 2004. – Vol. 48. – P. 105–108.
328. r-Process Nucleosynthesis in Hot Accretion Disk Flows from Black Hole-Neutron Star Mergers / [R. Surman, G. McLaughlin, M. Ruffert et al.]. // *Astrophys. J. Letters.* – 2008. – Vol. 679. – P. L117.
329. r-Process Nucleosynthesis in Magnetohydrodynamic Jet Explosions of Core-Collapse Supernovae / [S. Nishimura, K. Kotake, M. Hashimoto et al.]. // *Astrophys. J.* – 2006. – Vol. 642. – P. 410–419.
330. Russeil D. Star-forming complexes and the spiral structure of our Galaxy / D. Russeil. // *Astron. Astrophys.* – 2003. – Vol. 397. – P. 133–146.
331. Russell H. N. Relations Between the Spectra and other Characteristics of the Stars. II. Brightness and Spectral Class / H. N. Russell. // *Nature.* – 1914. – Vol. 93. – P. 252–258.
332. Ryan S. Extremely Metal-poor Stars. II. Elemental Abundances and the Early Chemical Enrichment of the Galaxy / S. Ryan, J. Norris, T. Beers. // *Astrophys. J.* – 1996. – Vol. 471. – P. 254–278.
333. Salpeter E. The Luminosity Function and Stellar Evolution / E. Salpeter. // *Astrophys. J.* – 1955. – Vol. 121. – P. 161–167.
334. Samland M. Modeling the Evolution of Disk Galaxies. I. The Chemodynamical Method and the Galaxy Model / M. Samland, G. Hensler, C. Theis. // *Astrophys. J.* – 1997. – Vol. 476. – P. 544–559.
335. Samland M. The formation of a disk galaxy within a growing dark halo / M. Samland, O. Gerhard. // *Astron. Astrophys.* – 2003. – Vol. 399. – P. 961–982.
336. Sandage A. Color-Magnitude Diagram for Disk Globular Cluster NGC 6356 Compared with Halo Clusters / A. Sandage, G. Wallerstein. // *Astrophys. J.* – 1960. – Vol. 131. – P. 598–609.
337. Sandage A. Results of a Pilot Program to Discover New Subdwarfs in the Solar Neighborhood / A. Sandage. // *Astrophys. J.* – 1964. – Vol. 139. – P. 442–450.
338. Sarkar K. C. Supernovae vs. AGN: Clues to the origin of Fermi Bubbles from OVIII/OVII line ratio / K. C. Sarkar, B. B. Nath, P. Sharma. // Last access: 2016, eprint arXiv:1610.00719.
339. Schmidt M. Rate of Star Formation. II. The Rate of Formation of Stars of Different Mass / M. Schmidt. // *Astrophys. J.* – 1963. – Vol. 137. – P. 758–769.
340. Schonrich R. Chemical evolution with radial mixing / R. Schonrich, J. Binney. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2009. – Vol. 396. – P. 203–222.
341. Schwarzschild K. Zur Stellarstatistik / K. Schwarzschild // *Astron. Nachr.* – 1912. – Vol. 190. – P. 361.
342. Schwarzschild M. A Spectroscopic Comparison Between- and Low-Velocity F Dwarfs / M. Schwarzschild, B. Schwarzschild. // *Astrophys. J.* – 1950. – Vol. 112. – P. 248–265.
343. Searle L. Compositions of halo clusters and the formation of the galactic halo / L. Searle, R. Zinn. // *Astrophys. J.* – 1978. – Vol. 225. – P. 357–379.
344. Semczuk M. Tidal origin of spiral arms in galaxies orbiting a cluster [Electronic resource] / M. Semczuk, E. L. Lokas, A. del Pino. // Last access: 2016, eprint arXiv:1608.03441.
345. Shane W. Neutral Hydrogen in an Interior Region of the Galaxy; the Longitude Interval 220 to 42g. III. The Scutum Arm / W. W. Shane. // *Astron. Astrophys.* – 1972. – Vol. 16. – P. 118.
346. Shapley H. Studies based on the colors and magnitudes in stellar clusters. VII. The distances, distribution in space, and dimensions of 69 globular clusters / H. Shapley. // *Astrophys. J.* – 1918. – Vol. 48. – P. 154–181.
347. Shustov B. Evolution of disk galaxies and loss of heavy elements into the

- intracluster medium / B. Shustov, D. Wiebe, A. Tutukov // *Astron. Astrophys.* – 1997. – Vol. 317. – P. 397–404.
348. Silver and palladium help unveil the nature of a second r-process / [Hansen C. J., Primas F., Hartman, H. et al.]. // *Astron. Astrophys.* – 2012. – Vol. 545. – Id. A31.
349. Simulations of Galactic Chemical Evolution: Ba Enrichment [C.M Raitery, M. Villata, R. Gallino et al.] // *Astrophys. J.* – 1999. – Vol. 518. – P. L91–L94.
350. Simulations of Galaxy Formation in a Λ Cold Dark Matter Universe. II. The Fine Structure of Simulated Galactic Disks. / M. Abadi, J. Navarro, M. Steinmetz, V. Eke. // *Astrophys. J.* – 2003. – Vol. 597. – P. 21–34.
351. Simulations of stellar convection with CO5BOLD / [Freytag B., Steffen M., Ludwig H. G. et al.]. // *J. Comp. Phys.* – 2012. – Vol. 231. – P. 919 – 959.
352. Slipher V. Spectrographic observations of star clusters (abstract) / V.M. Slipher. // *Popular Astronomy.* – 1918. – Vol. 26. – P. 8.
353. Smith G. A peculiar feature at $l = 40^\circ.5$, $b = -15^\circ.0$ / G. P. Smith. // *Bull. Astron. Inst. Netherlands.* – 1963. – Vol. 17. – P. 203.
354. Smith R. On the nature of star-forming filaments - I. Filament morphologies / R. Smith, C. Simon, R. Klessen. // *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* – 2014. – Vol. 445. – P. 2900–2917.
355. Sneden C. Copper and zinc in very metal-poor stars / C. Sneden, D. Crocker. // *Astrophys. J.* – 1988. – Vol. 335. – P. 406–414.
356. Sneden C. Trends in copper and zinc abundances for disk and halo stars / C. Sneden, R. G. Gratton, D. A. Crocker. // *Astron. Astrophys.* – 1991. – Vol. 246. – P. 354–367.
357. Sodium Abundances in Stellar Atmospheres with Differing Metallicities / T.Mishenina, V. Kovtyukh, S. Korotin, C. Soubiran // *Astron. Rep.* – 2003. – Vol. 47. – P.422-429.
358. Solar abundance of manganese: a case for near Chandrasekhar-mass Type Ia supernova progenitors / [I. Seitenzahl, G. Cescutti, F. Roupke et al.]. // *Astron. Astrophys.* – 2013. – Vol. 559. – Id. L5.
359. Soubiran C. Vertical distribution of Galactic disk stars. I. Kinematics and metallicity / C. Soubiran, O. Bienaymǎ, A. Siebert. // *Astron. Astrophys.* – 2003. – Vol. 398. – P. 141–151.
360. Spectroscopic Analysis of 33 of the Most Metal Poor Stars. II / A. McWilliam, G.Preston, C.Sneden, S.Shectman // *Astron. J.* – 1995. – Vol. 109. – P. 2757–2799.
361. Spectroscopic Studies of Extremely Metal-Poor Stars with the Subaru High Dispersion Spectrograph. II. The r-Process Elements, Including Thorium / [S. Honda, W. Aoki, T. Kajino et al.]. // *Astrophys. J.* – 2004. – Vol. 607. – P. 474–498.
362. Spiral Structure in the Outer Galactic Disk. I. The Third Galactic Quadrant / [R.V6zquez, J. May, G. Carraro et al.]. // *Astrophys. J.* – 2008. – Vol. 672. – Id. 930–939.
363. Spiral-induced velocity and metallicity patterns in a cosmological zoom simulation of a Milky Way-sized galaxy / [R.J.J. Grand, V. Springel, D. Kawata et al.]. // *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* – 2016. – Vol. 460. – P. L94–L98.
364. Spitzer, L. Jr. On a Possible Interstellar Galactic Corona / L. Jr. Spitzer // *Astrophys. J.* – 1956. – Vol. 124. – P. 20.
365. s-process production in rotating massive stars at solar and low metallicities / [U. Frischknecht, R. Hirschi, M. Pignatari et al.]. // *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* – 2016. – Vol. 456. – P. 1803–1825.
366. Steigman G. Primordial Nucleosynthesis in the Precision Cosmology Era / G. Steigman // *Annual Review of Nuclear and Particle Science.* – 2007. – Vol. 57. – P. 463–491.
367. Stellar condensates in meteorites - Isotopic evidence from noble gases / [R. Lewis, L. Alaerts, J. Matsuda et al.] // *Astrophys. J. Letters.* – 1979. – Vol. 234. –

L165–L168.

368. Strand K. Charts of the Orion Nebula cluster / K. Strand, T. Teska. // *Annals of the Dearborn Observatory of Northwestern University*. – 1958. – Vol. 7. – P. 67–89.

369. Struve F. G. W. Sur la voie lactee et sur la distance des etoiles fixes. / F. G. W. Struve. // *Etudes d'Astronomie Stellaire* St. Petersburg: Tip. Acad. Imper., – 1847; IV, 165 p.; in 8.; DCCC.4.211

370. Supernovae and Constraints on Progenitor Systems and Burning-Front Propagation / [K. Iwamoto, F. Brachwitz, K. Nomoto et al.]. // *Astrophys. J. Suppl.* – 1999. – Vol. 125. – P. 439–462.

371. Synthesis of the Elements in Stars / G. Burbidge, E. Burbidge, W. Fowler, F. Hoyle. // *Rev. Modern Phys.* – 1957. – Vol. 29. – P. 957–961.

372. Takeda Y. On the abundance of sodium in A-F supergiants / Y. Takeda, M. Takada-Hidai. // *Publ. Astron. Soc. Japan*. – 1994. – Vol. 46. – P. 395–413.

373. The "Nessie" Nebula: Cluster Formation in a Filamentary Infrared Dark Cloud / [J. Jackson, C. Susanna, E. Chambers et al.]. // *Astrophys. J. Letters*. – 2010. – Vol. 719. – P. L185–L189.

374. The age structure of stellar populations in the solar vicinity. Clues of a two-phase formation history of the Milky Way disk. / [M. Haywood, P. Di Matteo, M. Lehnert et al.]. // *Astron. Astrophys.* – 2013. – Vol. 560. – Id. A109.

375. The age-metallicity relation in the thin disk of the galaxy / Marsakov, V. A., Koval', V. V., Borkova, T. V., Shapovalov, M. V. // *Astron. Rep.* – 2011. – Vol. 55. – P. 667–682.

376. The Bones of the Milky Way / [A. Goodman, J. Alves, C. Beaumont et al.]. // *Astrophys. J.* – 2014. – Vol. 797. – Id. 53.

377. The Chemical Composition and Age of the Metal-poor Halo Star BD +17°3248 / [J. J. Cowan, C. Sneden, S. Burles et al.]. // *Astrophys. J.* – 2002. – Vol. 572. – P. 861–879.

378. The chemical composition of nearby young associations: s-process element abundances in AB Doradus, Carina-Near and Ursa Major / [V. D' Orazi, K. Biazzo, S. Desidera et al.]. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2012. – Vol. 423. – P. 2789–2799.

379. The chemical evolution of the galactic disk. I. Analysis and results / [B. Edvardsson, J. Andersen, B. Gustafsson et al.]. // *Astron. Astrophys.* – 1993. – Vol. 275. – P. 101–152.

380. The Chemical Evolution of the Globular Cluster ω Centauri (NGC 5139) / [V. Smith, B. Suntzeff, K. Cunha et al.]. // *Astron. J.* – 2000. – Vol. 119. – P. 1239–1258.

381. The Diverse Origins of Neutron-capture Elements in the Metal-poor Star HD 94028: Possible Detection of Products of i-Process Nucleosynthesis / A. Karakas, I. Roederer, M. Pignatari, F. Herwig. // *Astrophys. J.* – 2016. – Vol. 821. – Id. 37.

382. The Effect of Radial Migration on Galactic Disks / C. Vera-Ciro, E. D'Onghia, J. Navarro, M. Abadi. // *Astrophys. J.* – 2014. – 794. – Id. 173.

383. The Emergence of the Thick Disk in a Cold Dark Matter Universe / Brook C., Kawata D., Gibson B., Freeman K. // *Astrophys. J.* – 2004. – Vol. 612. – P. 894–899.

384. The End of Nucleosynthesis: Production of Lead and Thorium in the Early Galaxy / [I. Roederer, K. Kratz, A. Frebel et al.]. // *Astrophys. J.* – 2009. – Vol. 698. – P. 1963–1980.

385. The evolution of carbon, sulphur and titanium isotopes from high redshift to the local Universe / [G. Hughes, B. Gibson, L. Carigi et al.]. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2008. – Vol. 390. – P. 1710–1718.

386. The Evolution of Copper in the Globular Cluster ω Centauri / [K. Cunha, V. V. Smith, N. B. Suntzeff et al.]. // *Astron. J.* – 2002. – Vol. 124. – P. 379–388.

387. The Genesis of the Milky Way's Thick Disk Via Stellar Migration / [S. Loebman, R. Rojkar, V. Debattista et al.]. // *Astrophys. J.* – 2011. – Vol. 737. – Id. 8.

388. The Hamburg / ESO r-process enhanced star survey (HERES). III. HE

0338-3945 and the formation of the r + s stars / [K. Jonsell, P. Barklem, B. Gustafsson et al.]. // *Astron. Astrophys.* – 2006. – Vol. 451. – P. 651–670.

389. The Hamburg/ESO R-process enhanced star survey (HERES). II. Spectroscopic analysis of the survey sample. / [P. S. Barklem, N. Christlieb, T. C. Beers et al.]. // *Astron. Astrophys.* – 2005. – Vol. 439. – P. 129–151.

390. The Hamburg/ESO r-process enhanced star survey (HERES). IV. Detailed abundance analysis and age dating of the strongly r-process enhanced stars CS 29491-069 and HE 1219-0312 / [W. Hayek, U. Wiesendahl, N. Christlieb et al.]. // *Astron. Astrophys.* – 2009. – Vol. 504. – P. 511–524.

391. The Hobby-Eberly Telescope Chemical Abundances of Stars in the Halo (CASH) Project. I. The Lithium-, s-, and r-enhanced Metal-poor Giant HKII 17435-00532 / [I. Roederer, A. Frebel, M. Shetrone et al.]. // *Astrophys. J.* – 2008. – Vol. 679. – P. 1549–1565.

392. The Intermediate Neutron-capture Process and Carbon-enhanced Metal-poor Stars / M. Hampel, R. Stanclie, M. Lugaro, B. Meyer. // *Astrophys. J.* – 2016. – Vol. 831. – Id. 171.

393. The local spiral structure of the Milky Way / [Y. Xu, M. Reid, T. Dame et al.] // *Science Advances.* – 2016. – Vol. 2. – P. e1600878–e1600878.

394. The Luminosity and Mass Function of the Trapezium Cluster: From B Stars to the Deuterium-burning Limit / A. Muench, A. A., E. Lada, E. A., C. Lada, J. Alves. // *Astrophys. J.* – 2002. – Vol. 573. – P. 366–393.

395. The Nature and Orbit of the Ophiuchus Stream / [B. Sesar, J. Bovy, E. Bernard et al.]. // *Astrophys. J.* – 2015. – Vol. 809. – Id. 59.

396. The nu-process / [S. E. Woosley, D. H. Hartmann, R. D. Hoffman et al.]. // *Astrophys. J.* – 1990. Vol. 356. – P. 272–301.

397. The old nuclear star cluster in the Milky Way: dynamics, mass, statistical parallax, and black hole mass / [S. Chatzopoulos, T. Fritz, O. Gerhard et al.]. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2015. – Vol. 447. – P. 948–968.

398. The Role of Electron Captures in Chandrasekhar-Mass Models for Type IA Supernovae / [F. Brachwitz, D. Dean, W. Hix et al.]. // *Astrophys. J.* – 2000. – Vol. 536. – P. 934–947.

399. The r-process in the Neutrino Winds of Core-Collapse Supernovae and U-Th Cosmochronology / [S. Wanajo, N. Itoh, Y. Ishimaru et al.]. // *Astrophys. J.* – 2002. – Vol. 577. – P. 853–865.

400. The r-Process-enriched Low-Metallicity Giant HD 115444 / J. Westin, C. Sneden, B. Gustafsson, J. Cowan. // *Astrophys. J.* – 2000. – Vol. 530. – P. 783–799.

401. The s-process in low-metallicity stars – II. Interpretation of high-resolution spectroscopic observations with asymptotic giant branch models / [S. Bisterzo, R. Gallino, O. Straniero et al.]. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2011. – Vol. 418. – P. 284–319.

402. The s-process: Nuclear physics, stellar models, and observations / F. Käppeler, R. Gallino, S. Bisterzo, W. Aoki. // *Reviews of Modern Physics.* – 2011. – Vol. 83. – P. 157–194.

403. The structure of the nuclear stellar cluster of the Milky Way / [Schudel R., Eckart A., Alexander T. et al.]. // *Astron. Astrophys.* – 2007. – Vol. 469. – P. 125–146.

404. The thick disc of the Galaxy: sequel of a merging event / [A. Robin, M. Haywood, M. Creze et al.]. // *Astron. Astrophys.* – 1996. – Vol. 305. – P. 125.

405. The Two Micron All Sky Survey (2MASS) / [M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening et al.]. // *Astron. J.* – 2006. – Vol. 131. – P. 1163–118.

406. The Ubiquity of the Rapid Neutron-capture Process / [I. Roederer, J. Cowan, A. Karakas et al.]. // *Astrophys. J.* – 2010. – Vol. 724. – P. 975–993.

407. The Ultra-Metal-poor, Neutron-Capture-rich Giant Star CS 22892-052 / [C. Sneden, A. McWilliam, G. Preston et al.]. // *Astrophys. J.* – 1996. – Vol. 467. – P. 819.

408. The VVV Survey Reveals Classical Cepheids Tracing a Young and Thin

Stellar Disk across the Galaxy's Bulge / [I. Дйќбны, D. Minniti, D. Majaess et al.]. // *Astrophys. J. Letters* – 2015. – Vol. 812. – Id. L29.

409. The Weak s-Process in Massive Stars and its Dependence on the Neutron Capture Cross Sections / [M. Pignatari, R. Gallino, M. Heil et al.]. // *Astrophys. J.* – 2010. – Vol. 710. – P. 1557–1577.

410. The, L.-S. s-Process Nucleosynthesis in Advanced Burning Phases of Massive Stars / L.-S. The, F. M. El Eid, B.S.Meyer. // *Astrophys. J.* – 2007. – Vol. 655. – P. 1058–1078.

411. Thielemann F.-K. Core-Collapse Supernovae and Their Ejecta / F.-K. Thielemann, K. Nomoto, M. Hashimoto. // *Astrophys. J.* – 1996. – Vol. 460. – P. 408–436.

412. Thielemann F.-K. Explosive nucleosynthesis in carbon deflagration models of Type I supernovae / F.-K. Thielemann, K. Nomoto, K. Yokoi // *Astron. Astrophys.* – 1986. – Vol. 158. – P. 17–33.

413. Thorium and Uranium Chronometers Applied to CS 31082-001 / [H. Schatz, R. Toenjes, B. Pfeiffer et al.]. // *Astrophys. J.* – 2002. – Vol. 579. – P. 626–638.

414. Three-dimensional Stellar Kinematics at the Galactic Center: Measuring the Nuclear Star Cluster Spatial Density Profile, Black Hole Mass, and Distance / [T. Do, G. D. Martinez, S. Yelda et al.] // *Astrophys. J. Letters*. – 2013. – Vol. 779. – Id. L6.

415. Three-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Implications for Cosmology / [D. Spergel, R. Bean, O. Doré et al.]. // *Astrophys. J. Suppl.* – 2007. – Vol. 170. – P. 377–408.

416. Timmes F. Galactic chemical evolution: hydrogen through zinc / F. Timmes, S. Woosley, T. Weaver. // *Astrophys. J. Suppl.* – 1995. – Vol. 98. – P. 617–658.

417. Tinsley B. Chemical evolution and the formation of galactic disks / B. Tinsley, R. Larson. // *Astrophys. J.* – 1978. – Vol. 221. – P. 554–561.

418. Tinsley B. Chemical evolution in the Solar Neighborhood. IV. Some revised general equations and a specific model / B. M. Tinsley. // *Astrophys. J.* – 1981. – Vol. 250. – P. 758–768.

419. Tinsley B. Evolution of the Stars and Gas in Galaxies / B. M. Tinsley. // *Fundam. of Cosmic Phys.* – 1980. – Vol. 5. – P. 287–388.

420. TOPoS. II. On the bimodality of carbon abundance in CEMP stars Implications on the early chemical evolution of galaxies / [P. Bonifacio, E. Caffau, M. Spite et al.] // *Astron. Astrophys.* – 2015. – Vol. 579. – Id. A28.

421. Towards an understanding of Type Ia supernovae from a synthesis of theory and observations / [W. Hillebrandt, M. Kromer, F. K. Röpkе, A. J. Ruiter] // *Frontiers of Physics*. – 2013. – Vol. 8. – P. 116–143.

422. Tracing the Galactic Thick Disk to Solar Metallicities / Bensby T., Zenn A. R., Oey M. S., Feltzing S. // *Astrophys. J.* – 2007. – Vol. 663. – P. L13 – L16.

423. Travaglio C. Chemical evolution of Sr-Y-Zr: the puzzle of the stellar multisource origin / C. Travaglio, R. Gallino, E. Arnone // In: *Proceedings of the 11th Workshop on "Nuclear Astrophysics"*, Ringberg Castle, Tegernsee, Germany, February 11-16, 2002 / W. Hillebrandt and E. Möller (Eds.). Garching b. München, Germany: Max-Planck-Institut für Astrophysik. – 2002. – P. 218–223.

424. Travaglio C. Metallicity effect in multi-dimensional SNIa nucleosynthesis / C. Travaglio, W. Hillebrandt, M. Reinecke. // *Astron. Astrophys.* – 2005. – Vol. 443. – P. 1007–1011.

425. Trigonometric Parallaxes of High Mass Star Forming Regions: The Structure and Kinematics of the Milky Way / [M. Reid, K. Menten, A. Brunthaler et al.]. // *Astrophys. J.* – 2014. – Vol. 783. – Id. 130.

426. Trumpler R. J. Globular Star Clusters / R. J. Trumpler // *Astron. Soc. Pacific Leaflets*. – 1930. – Vol. 1. – P. 117.

427. Trumpler R. Preliminary results on the distances, dimensions and space distribution of open star clusters / R. J. Trumpler // *Lick Observ. Bull.* – 1930. – N. 420.

– P. 154–188.

428. Trumpler, R. J. Spectral Types in Open Clusters / R. J. Trumpler // *Publ. Astron. Soc. Pacific*. – 1925. – Vol. 37. – P. 307.

429. Uncertainties in Galactic Chemical Evolution Models / [B. Côté, C. Ritter, W. O'Shea et al.]. // *Astrophys. J.* – 2016. – Vol. 824. – Id. 82.

430. UVES Observations of QSO 0000-2620: Oxygen and Zinc Abundances in the Damped Ly α Galaxy at $z=3.3901$ / [P. Molaro, P. Bonifacio, M. Centuriyn et al.]. // *Astrophys. J.* – 2000. – Vol. 541. – P. 54–60.

431. Vallee J. P. The Spiral Arms and Interarm Separation of the Milky Way: An Updated Statistical Study / J. P. Vallee // *Astron. J.* – 2005. – Vol. 130. – P. 569–575.

432. van Leeuwen F. Hipparcos, the New Reduction of the Raw Data / F. van Leeuwen. // *Astrophys. Space Science Library*. – 2007. – Vol. 350. – P. 480.

433. Vertical distribution of Galactic disk stars. IV. AMR and AVR from clump giants / C. Soubiran, O. Bienaymé, T. Mishenina, V. Kovtyukh // *Astron. Astrophys.* – 2008. – Vol. 480. – P. 91–101.

434. Villalobos A. Simulations of minor mergers - I. General properties of thick discs / A. Villalobos, A. Helmi. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2008. – Vol. 391. – P. 1806–1827.

435. Wagoner R. Big-Bang Nucleosynthesis Revisited / R. Wagoner // *Astrophys. J.* – 1973. – Vol. 179. – P. 343–360.

436. Walborn N. R. Evolutionary Helium and CNO Anomalies in the Atmospheres and Winds of Massive Hot Stars Atmospheric Diagnostics of Stellar Evolution / N. R. Walborn // *Chemical Peculiarity, Mass Loss, and Explosion. Proceedings of the 108-th. Colloquium of the International Astronomical Union, held at the University of Tokyo, Japan, September 1-4, 1987. / Lecture Notes in Physics.* – Editor, K. Nomoto; Publisher, Springer-Verlag. – Berlin, New York, 1988. – Vol. 305. – P. 33–45.

437. Walker T. Primordial nucleosynthesis redux / T. Walker, G. Steigman, H. Kang. // *Astrophys. J.* – 1991. – Vol. 376. – P. 51–69.

438. Wallerstein G. Photometric methods for measuring the metal content of K giants / G. Wallerstein, H. L. Helfer // *Astron. J.* – 1966. – Vol. 71. – P. 350 – 354.

439. Wanajo S. Uncertainties in the μ p-process: Supernova Dynamics Versus Nuclear Physics / S. Wanajo, H.-T. Janka, S. Kubono // *Astrophys. J.* – 2011 – Vol. 729. – Id. 46

440. Wasserburg G. J. Abundances of Actinides and Short-lived Nonactinides in the Interstellar Medium: Diverse Supernova Sources for the r-Processes / G. J. Wasserburg, M. Busso, R. Gallino // *Astrophys. J.* – 1996. – Vol. 466. – P. L109–L113.

441. Wegg C. Mapping the three-dimensional density of the Galactic bulge with VVV red clump stars / C. Wegg, O. Gerhard // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2013. – Vol. 435. – P. 1874–1887.

442. Wegg C. The structure of the Milky Way's bar outside the bulge / Wegg C., Gerhard O., Portail M. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2015. – Vol. 450. – P. 4050–4069.

443. Wehmeyer B. Galactic evolution of rapid neutron capture process abundances: the inhomogeneous approach / B. Wehmeyer, M. Pignatari, F.-K. Thielemann. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2015. – Vol. 452. – P. 1970–1981.

444. Weinberg D. High-Redshift Galaxies in Cold Dark Matter Models / D. Weinberg, L. Hernquist, N. Katz. // *Astrophys. J.* – 2002. – Vol. 571. – P. 15–29.

445. Wesson R. Physical conditions in the planetary nebula NGC 6543 / R. Wesson, X. W. Liu // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2004. – Vol. 351. – P. 1026–1042.

446. What are the astrophysical sites for the r-process and the production of heavy elements? / [F.-K. Thielemann, A. Arcones, R. Kappeli et al.]. // *Progress in Particle and Nuclear Physics*. – 2011. – Vol. 66. – P. 346–353.

447. When the Milky Way turned off the lights: APOGEE provides evidence of star formation quenching in our Galaxy / [M. Haywood, M. Lehnert, P. Di Matteo et

al.]. // *Astron. Astrophys.* – 2016. – Vol. 589. – Id. A66.

448. Woosley S. E. The evolution and explosion of massive stars / S. E. Woosley, A. Heger, T.A. Weaver // *Rev. Modern Physics.* – 2002. – Vol. 74. – P. 1015–107.

449. Woosley S. E. The Evolution and Explosion of Massive Stars. II. Explosive Hydrodynamics and Nucleosynthesis / S. Woosley, T. Weaver. // *Astrophys. J. Suppl.* – 1995. – Vol. 101. – P. 181–235.

450. Woosley S. E. The Physics of Supernovae / S. Woosley, T. Weaver // *Lecture Notes in Physics.* – 1986. – Vol. 255. – P. 91–121.

451. Woosley S. E. The alpha-process and the r-process / S. Woosley, R. Hoffman. // *Astrophys. J.* – 1992. – Vol. 395. – P. 202–239.

452. Wrubel M. H. Exact Curves of Growth for the Formation of Absorption Lines According to the Milne- Eddington Model. I. Total Flux / M. H. Wrubel // *Astrophys. J.* – 1949. – Vol. 109. – P. 66 – 75.

453. Wyse R. Chemistry and Kinematics in the Solar Neighborhood: Implications for Stellar Populations and for Galaxy Evolution / R. Wyse, G. Gilmore. // *Astron. J.* – 1995. – Vol. 110. – P. 2771–2787.

454. Zakhozhay V. A. Disks around the nearest stars and substars / V. A. Zakhozhay, O. V. Zakhozhay // *Kinem. Phys. Cel. Bodies.* – 2010. – Vol. 26. – P. 1–17.

455. Zakhozhay V. A. The structure of our stellar system / V. A., Zakhozhay / *Kinem. Fiz. Neb. Tel.* – 2005. – Vol. 21. – P. 414–440.

456. Zasov A. Can molecular clouds live long? / A. Zasov, A. Kasparova. // *Astrophysics and Space Science.* – 2014. – Vol. 353. – P. 595–602.

457. Zasov A. V. Gravitational stability and dynamical overheating of galactic stellar disks / A. V. Zasov, A. V. Khoperskov, A. S. Saburova. // *Astron. Letters.* – 2011. – Vol. 37. – P. 374–384.

458. Zdanavicius K. V. Integrated photometry of globular clusters in the Vilnius system / K. V. Zdanavicius. // *Astron. Zh.* – 1983. – Vol. 60. – P. 44–52.

459. Zinn R. The globular cluster system of the galaxy. III - Measurements of radial velocity and metallicity for 60 clusters and a compilation of metallicities for 121 clusters / R. Zinn, M. West. // *Astrophys. J. Suppl.* – 1984. – Vol. 55. – P. 45–66.

460. Zucker, C. C. The Skeleton of the Milky Way / C. Zucker, C. Battersby, A. Goodman // *Astrophys. J.* – 2015. – Vol. 815. – Id. 23.

461. Диоген Лаэртский. О жизни, учениях и изречениях знаменитых философов / пер. и прим. М. Л. Гаспарова; общ. ред. и вступ. ст. А. Ф. Лосева. – М.: Мысль, 1979. – 624 с. – (Серия «Философское наследие»).

462. Каплан С. А. Физика межзвездной среды / С. А. Каплан, С. Б. Пикельнер. – М.: Наука, 1979. – 591 с.

463. Кудря Ю. Позагалактична астрономія / Кудря Ю., Вавилова І. – Київ.: Наукова думка, 2016. – Книга 1. – 342 с.

464. Марочник Л. С. Галактика / Л. С. Марочник, А. А. Сучков. – М.: Наука, 1984. – 392 с.

465. Марсаков В. А. Распределение металлов среди населений Галактики и галактическая эволюция / В. А. Марсаков, А. А. Сучков // *Астрон. журн.* – 1977. – Т. 54. – С. 1232–1240.

466. Марсаков В. А. Элементы орбит и кинематика звезд гало и старого населения диска: свидетельство об активных фазах в эволюции Галактики / В. А. Марсаков, А. А. Сучков // *Астрон. журн.* – 1978. – Т. 55. – С. 472–481.

467. Марсаков В. А. Функция металличности шаровых скоплений: свидетельство о трех активных фазах в эволюции Галактики / В. А. Марсаков, А. А. Сучков // *Письма в Астрон. журн.* – 1976. – Т. 2. – С. 380–385.

468. Локтин А. В. Лекции по звездной атмосфере / А. В. Локтин, В. А. Марсаков. – М.: Южный федеральный университет, 2009. – 280 с.

469. Огородников К. Ф. Динамика звездных систем / К. Ф. Огородников. – М.: Физматгиз, 1958. – 627 с.

470. Рузмайкин А. А. Магнитные поля галактик / А. А. Рузмайкин, Д. Д. Соколов, А. М. Шукуров. – М., 1989.

471. Холопов П. Н. Звездные скопления / П. Н. Холопов. – М.: Наука, 1984. – 480 с.

ГАЛАКТИКА, ЕЕ СТРОЕНИЕ И ОБОГАЩЕНИЕ ХИМИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

РЕЗЮМЕ

Монография посвящена рассмотрению проблем, связанных с изучением структуры и эволюции нашей Галактики, производством химических элементов и обогащения межзвездной среды. Представлено общее описание Галактики в историческом контексте. Дано детальное описание составляющих Галактики – тонкого, толстого дисков, балджа, гало и других подструктур. Описаны характеристики всех составляющих структуры Галактики с учетом результатов исследований, проведенных автором, и с использованием исследований, выполненных в последнее время. Особое внимание уделено происхождению галактического спирального узора, количеству спиральных рукавов и новому современному взгляду на галактический центр, структуру балджа в виде коробки, имеющей вид ядра ореха арахиса, и наличия черной дыры в его центре. Раскрыты особенности структуры Галактики – Пояс Гулда, Кольцо Единорога; "пузыри" Ферми и высокоскоростные облака, а также свидетельства связи с другими галактиками. Среди них Магелланов Поток, небольшая галактика-спутник в Стрельце и др. Проведен анализ химического состава и показаны его особенности у звезд тонкого и толстого дисков, рассеянных и шаровых скоплений, поля гало. Описаны результаты, полученные космическими миссиями по исследованию Галактики.

В монографии представлены основные положения моделирования обогащения химическими элементами межзвездной среды и прослеживаются основные источники производства элементов, опирающиеся на самые последние расчеты в этой области. Автором выполнен анализ источников производства конкретных элементов: 1) меди и цинка, с учетом выходов элементов от различных источников нуклеосинтеза и с использованием расчетов моделей химической эволюции; 2) натрия, путем сравнения с различными моделями химической эволюции; 3) марганца, путем анализа выходов элемента в различных источниках нуклеосинтеза; 4) ряда элементов, от кислорода до европия, при сравнении с основными современными расчетами моделирования химической эволюции Галактики. На основании анализа, а также привлечения данных новейших исследований показано, что в целом современные модели галактической химической эволюции достаточно хорошо описывают наблюдения. Однако выявлены нерешенные проблемы в моделировании процессов нуклеосинтеза, в частности ряда элементов в массивных коллапсирующих в ядре сверхновых требуют дальнейших глубоких изучений.

Автор выражает благодарность коллегам, принимавшим участие в совместных научных поисках, и Владимиру Марсакову за тщательное прочтение рукописи, а также выражает признательность за поддержку, которая была получена благодаря совместному украинско-французскому проекту "Днипро" и Швейцарскому научному фонду.

ГАЛАКТИКА, ЇЇ БУДОВА ТА ЗБАГАЧЕННЯ ХІМІЧНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

РЕЗЮМЕ

Монографія присвячена розгляду проблем, пов'язаних з вивченням структури й еволюції нашої Галактики, виробництвом хімічних елементів і збагаченням міжзоряного середовища. Представлено загальний опис Галактики в історичному контексті. Дано детальний опис складових Галактики – тонкого, товстого дисків, балджа, гало й інших підструктур. Описано характеристики всіх складових структури Галактики з урахуванням результатів досліджень, проведених автором, і з використанням досліджень, виконаних останнім часом. Особливу увагу приділено походженню галактичного спірального візерунка, кількості спіральних рукавів і новому сучасному погляду на галактичний центр, структуру балджа у вигляді коробки, що має вигляд ядра горіха арахісу, і наявності чорної діри в його центрі. Розкрито особливості структури Галактики – Пояс Гулда, Кільце Єдинорога; «пузири» Фермі і високошвидкісні хмари, а також свідчення зв'язку з іншими галактиками, серед них Магелланів Потік, невелика галактика-супутник в Стрільці та ін. Проведено аналіз хімічного складу і показані його особливості у зір тонкого і товстого дисків, розсіяних і кульових скупчень, поля гало. Описано результати, отримані космічними місіями по дослідженню Галактики.

У монографії представлені основні положення моделювання збагачення хімічними елементами міжзоряного середовища і простежуються основні джерела виробництва елементів, які спираються на найосучасніші розрахунки в цій області. Автором виконано аналіз джерел виробництва конкретних елементів: 1) міді і цинку, з урахуванням виходів елементів від різних джерел нуклеосинтезу і з використанням розрахунків моделей хімічної еволюції; 2) натрію, шляхом порівняння з різними моделями хімічної еволюції; 3) марганцю, шляхом аналізу виходів елемента в різних джерелах нуклеосинтезу; 4) ряду елементів, від кисню до Європію, порівнюючи з основними сучасними (6 кодів) розрахунками (моделюванням) хімічної еволюції Галактики. На підставі аналізу, а також залучення даних новітніх досліджень показано, що в цілому сучасні моделі галактичної хімічної еволюції досить добре описують спостереження. Однак виявлені невирішені проблеми в моделюванні процесів нуклеосинтезу, зокрема ряду елементів в масивних колапсуючих в ядрі наднових вимагають подальших глибоких досліджень.

Автор висловлює подяку колегам, які брали участь в спільних наукових пошуках, В. А. Марсакову за уважне прочитання рукопису, а також висловлює вдячність за підтримку, яка була отримана завдяки спільному україно-французькому проекту «Дніпро» і Швейцарському національному науковому фонду.

GALAXY, ITS STRUCTURE AND ENRICHMENT WITH CHEMICAL ELEMENTS

SUMMARY

The monograph addresses the issues pertinent to the study of the structure and evolution of our Galaxy, production of chemical elements and enrichment of the interstellar medium. A broad description of the Galaxy in the historical context is presented. A detailed description of the galactic components, namely thin and thick disks, bulge, halo and other sub-structures is given. The characteristics of all structural components of the Galaxy have been described based on the results of the research performed by the author, as well as other studies carried out recently. Special consideration is given to the origin of the galactic spiral pattern, the number of spiral arms and a new modern view of the galactic centre, a boxy- or peanut-shaped structure of the bulge and the presence of a black hole in its centre. Specific features of the galactic structures, such as the Gould Belt, Monoceros Ring, Fermi bubbles and high-velocity clouds have been defined, and also the evidences of the interactions with other galaxies, including the Magellanic Stream and a dwarf satellite galaxy in Sagittarius, etc. have been revealed. The chemical composition of the stars of thin and thick disks, open and globular clusters, as well as those of the halo field, was analysed and their peculiarities have been shown. The results obtained by space missions for the Galaxy exploration have been described.

The monograph presents the key principles of the simulation of the interstellar-medium chemical enrichment and traces the main sources of element production based on the latest relevant computations. The author has analysed the sources of production of certain elements: 1) the production of copper and zinc was analysed with due regard to the yield of elements from different sources of nucleosynthesis and using computations of the chemical evolution models; 2) the sodium production was analysed by comparison with various chemical evolution models; 3) the production of manganese was studied by analysing the yield of this element from different sources of nucleosynthesis; 4) the production of a number of elements from oxygen to europium was analysed by comparison with the main computations (simulations) of the Galactic chemical evolution developed with six numerical codes.

On the basis of the analysis performed, as well as the latest research results acquired, it has been shown that modern models of the galactic chemical evolution tend to describe the observation data quite well. However, the unsolved problems detected in the simulation of nucleosynthesis processes require further in-depth study.

The author is grateful to her colleagues who participated in joint scientific research and to Vladimir Marsakov for his careful reading of the manuscript; the author also acknowledges the support provided within the framework of the joint Ukrainian-French project "Dnipro" and by the Swiss National Science Foundation.

У монографії представлений загальний опис Галактики, її будови і сучасне розуміння її хімічної еволюції. Розглянуто проблеми, пов'язані з вивченням структури і розвитком Галактики, виробництвом хімічних елементів і збагаченням міжзоряного середовища. Підкреслено роль, яку відіграє теоретичне моделювання, яке спирається на розрахунки нуклеосинтезу і на зв'язок кінематичних властивостей, що спостерігаються, та хімічного складу різних галактичних структур.

Монографія може бути використана при викладанні курсів загальної та теоретичної астрофізики, зоряної астрономії, буде корисною для студентів, аспірантів, молодих вчених, а також для усіх, хто цікавиться сучасним станом вивчення нашої Галактики.

Наукове видання

МІШЕНИНА ТАМАРА ВАСИЛІВНА

**ГАЛАКТИКА, ЇЇ БУДОВА І ЗБАГАЧЕННЯ ХІМІЧНИМИ
ЕЛЕМЕНТАМИ**

Російською мовою

Надруковано в авторській редакції з готового оригінал-макета

Формат 60x84/16. Ум.-друк. арк. 11,16 + 0,47.

Тираж 300 прим. Зам. № 134(50).

Видавництво і друкарня "Астропринт"

65091, м. Одеса, вул. Разумовська, 21.

Тел.: (0482) 37-07-95, 37-14-25, 33-07-17, (048) 7-855-855

e-mail: astro_print@ukr.net

www.astroprint.ua, www.stranichka.in.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №1373 від 28.05.2003 р.