ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Хоперскова Александра Валентиновича

на диссертационную работу Ткаченко Романа Валерьевича «ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ ГАЛАКТИЧЕСКОГО ДИСКА», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 — Астрофизика и звездная астрономия

Актуальность темы

Актуальность исследования определяется ключевой ролью химического состава звезд и межзвездного газа в целом для физики галактик, во многом определяя свойства наблюдаемого излучения, влияя на кинематику, морфологию и динамику галактических компонент. Химический состав межзвездной среды контролирует процессы звездообразования, влияя на скорость охлаждения газа, создавая условия для гравитационного коллапса в молекулярных облаках. Диссертация посвящена изучению химической эволюции нашей Галактики, для которой, с одной стороны, имеются огромные массивы новых данных, с другой, имеется целый ряд нерешенных теоретических проблем.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, оценка достоверности полученных результатов

Научные положения, выводы и рекомендации логически связаны, целостны, подтверждаются сравнительным анализом с результатами других

авторов в соответствующих предельных случаях, а также вычислительными результатами Автора.

Достоверность полученных результатов обусловлена использованием хорошо проверенных методик обработки и анализа данных наблюдений. Р.В. Ткаченко использовал хорошо обоснованные теоретические модели, в достаточной степени апробированные численные схемы с доказанной устойчивостью и сходимостью. К числу факторов, позволяющих считать результаты достоверными, можно отнести публикации основных полученных результатов в солидных научных журналах мирового уровня (MNRAS и ApJ).

Обоснованность разработанных в диссертации научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается использованной библиографией научных работ российских и зарубежных ученых, посвященных химической эволюции галактик, звездообразованию, наблюдаемым свойствам звезд различных типов, их эволюции. Список литературы содержит 133 наименования.

Дополнительным доводом в пользу обоснованности научных положений являются 4 публикации соискателя в ведущих научных астрофизических журналах Monthly Notices of the Royal Astronomical Society и Astrophysical Journal, которые имеют квартиль Q1 по библиографическим базам данных Web of Science и Scopus. Основные результаты диссертации отражены достаточно **полно** в 4 основных научных публикациях. Часть результатов обсуждалась научным сообществом на научных конференциях в Санкт-Петербурге, Москве, Нижнем Архызе, Ростове-на-Дону, Ялте.

Автореферат в достаточно **полной мере отражает** содержание и структуру диссертации, полностью удовлетворяет требованиям Положения о порядке присуждения учёных степеней, поскольку содержит основные

положения, результаты и выводы диссертации, научную новизну и практическую значимость результатов исследования, выделен личный вклад автора.

Новизна диссертационного исследования

Уточнены профили радиального распределения цефеид в нашей Галактике, используя данные наблюдений о содержании кислорода и железа.

Предложен и реализован новый численный алгоритм для описания формирования распределения кислорода и железа в галактическом диске. Коэффициент турбулентной диффузии для кислорода и железа дополнен учетом новых физических факторов. Развитая теория позволила получить оценку полного времени жизни нашего Солнца 11.4 млрд лет.

Автор объясняет наблюдаемые локальные понижения в распределении кислорода за счет падения на диск низкометалличного газа, связанного с галактиками-спутниками.

В диссертации развит новый статистический метод для оценки средних масс железа, которое выбрасывается в результате вспышек сверхновых Ia.

В качестве нового подхода, развитого в диссертационном исследовании, следует указать также на решение старой проблемы G-карликов, связанной с избыточным количеством низкометалличных звезд, предсказываемых в теориях нуклеосинтеза в солнечной окрестности, по сравнению с данными наблюдений. Автор развивает идею, что имеется корреляция между крупномасштабным радиальным распределением кислорода и железа в диске по молодым ярким звездам (цефеидам) и распределением звезд малых масс по металличности в близкой к Солнцу окрестности.

Значимость для науки и практики результатов диссертационного исследования

Разработан метод для объяснения наблюдаемых особенностей распределения кислорода вдоль радиальной координаты в диске нашей Галактики. Определены параметры аккреции газа на диск, некоторые характеристики химической эволюции в звездно-газовом диске. Важно отметить, что имеются основания считать, что структуры типа плато у радиального профиля тяжелых элементов наблюдаются и в других галактиках.

Практическая ценность диссертации связана также с разработкой и программной реализацией построенных моделей.

Замечания по диссертации

1) В уравнении (1.17), которое описывает химическую эволюцию галактического диска, Автор добавляет слагаемое для учета турбулентной диффузии кислорода без ссылки на другие работы и без вывода. Хотелось бы получить обоснование используемой модели диффузии, где присутствуют градиенты как поверхностной плотности кислорода (что естественно), так и газа в целом. Почему в уравнении Фика для диффузионного потока кислорода выбрано выражение $\mu_g D\, \partial(\mu_O / \mu_g)/\partial r$ (неоднородная плотность газа $\mu_g(r)$ находится в знаменателе и числителе) ? Аналогичный вопрос возникает при рассмотрении железа в третьей главе (уравнение (3.1)).

2) В моделях в качестве галактического радиуса положения Солнца принято R_0=7.9 кпк, для радиуса коротации R_0=7 кпк, а для радиальной шкалы диска r_d=3.5 кпк. Представляет интерес исследование влияния тако-

го выбора на полученные результаты, поскольку определение этих трех пространственных характеристик по данным наблюдений все еще имеет заметную погрешность и следовало бы рассмотреть и крайние значения этих параметров.

3) В работе используется незамкнутая модель диска, в которой имеется поток межгалактического газа, падающий на диск. Кроме того, в реальном галактическом диске, по-видимому, имеет место радиальное перераспределение гравитирующей массы (об этом Автор пишет), особенно в условиях возможно нестационарного волнового узора. В связи с этим, возникает вопрос о перемещении радиуса коротации на протяжении космологического времени и как такого рода перемещения могут сказаться на полученных результатах. Работа основывается на фиксированной кривой вращения (см. стр.34). Использование этой кривой вращения из работы [74] 1985 года также вызывает вопрос, поскольку за прошедшие 35 лет проблеме построения галактической кривой вращения посвящены сотни научных работ. Кроме того, формула для кривой вращения (1.13) отсутствует в работе [74].

4) Для решения задачи (1.12) Автор выбрал значение поверхностной плотности газа на радиусе орбиты Солнца 10 $M_{sun}/пк^2$, ссылаясь на работу 1997 года [62]. Сами авторы этой работы (Haywood et al., 1997) пишут на стр.456, что величина поверхностной плотности газа является очень неопределенной и лежит в пределах между 6 и 13 $M_{sun}/пк^2$, и сами рассматривают свои модели и для этих крайних оценок плотности. Было бы разумно поступить аналогично в диссертационном исследовании, что позволило бы оценить погрешность конечных результатов в зависимости от неопределенности входных параметров. После 1997 года имеется значительная литература по определению радиальных профилей плотности газа. Отмечу, например, подробное исследование McKee C.F., Parravano A., Hollenbach D.J.

(2015, ApJ, 814, 13), в котором для радиуса орбиты Солнца 13.7±1.6 $M_{sun}/пк^2$. Кроме того, данные наблюдений о радиальных профилях различных компонент газа (HI, HII, H_2) указывают на их сильную неоднородность на малых масштабах (меньше/порядка килопарсека), см., например, Marasco A. et al., 2017, A&A 607, A106. Автор использует гладкие радиальные профили распределения газа и возникает вопрос о влиянии такого выбора.

5) Обосновывая, что так называемые локальные особенности между 9 и 11 кпк связаны с падением спутников, Автор фактически в качестве довода указывает только на снижение значений [O/H] слева и справа относительно точки на радиусе r = 10 кпк. Однако, можно предположить другую интерпретацию, что в точке r = 10 кпк мы имеем повышенное содержание кислорода, а в точках 9.5 кпк и 10.5 кпк оно "нормальное", поскольку, если выбросить точку 10 кпк, то имеем достаточно гладкую убывающую зависимость. Хотелось бы иметь дополнительные доводы в пользу авторской интерпретации. Также, представляет интерес распределение кислорода вдоль азимутального угла, которое должно отражать импакт-событие и с этой точки зрения модели должны быть двумерными.

6) На стр.63-64 для оценки величины возмущения плотности маломассивных звезд, которые доминируют по суммарной массе, используется только уравнение химической эволюции и не учитываются динамические процессы, связанные, в частности, со спиральными рукавами.

7) Встречаются жаргонизмы и нечеткие формулировки: "единый градиент для всего диапазона расстояний", "наблюдатели теряют слабосветящие звезды", "чтобы извлечь из теории часть звезд", "солнечное время жизни" и др. Следует определять используемые безразмерные величины, например, в (1.13). Отмечу использование термина **нелинейные** радиальные обилия кислорода и железа вдоль галактического диска. Термин "нелиней-

ный" в работе встречается только на стр.11 (результат 2), стр.13 (говорится о новизне), стр.55 (перечисляются основные результаты), стр.71 (в первом абзаце гл.3). В основной части работы этот термин не используется и не раскрывается. Очевидно, говоря о характере радиальной зависимости содержания кислорода правильно говорить о неоднородности и наличии плато, поскольку и без плато зависимость [O/H] от радиуса является нелинейной функцией.

Данные замечания не ставят под сомнение положения, выносимые на защиту, и все основные результаты, сформулированные в работе. Скорее мои вопросы и замечания свидетельствуют об интересных и важных постановках как рассмотренных задач, так и требующих дальнейшего анализа и решения. Работа написана грамотно и в достаточной степени иллюстрирована. Диссертационная работа и опубликованные научные статьи демонстрируют, что Р.В. Ткаченко является сложившимся научным работником, способным выполнять научные исследования на высоком уровне.

Работа, безусловно, соответствует паспорту специальности 01.03.02, в частности, пункту 2. Все результаты являются оригинальными, опубликованы в высокорейтинговых международных журналах, имеют высокую практическую значимость и могут быть использованы в ведущих научных учреждениях России (САО РАН, ИКИ РАН, МГУ, ГАО РАН, ИНАСАН, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Санкт-Петербургский университет, Казанский университет, Новосибирский университет, Южный федеральный университет, Волгоградский университет и др.) и зарубежных центрах, в которых ведутся работы по исследованию галактик.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

В работе приведены результаты, позволяющие квалифицировать их как решение научной задачи по определению и объяснению особенностей в распределении химических элементов в диске нашей Галактики на основе теоретических моделей химической эволюции и данных наблюдений. Диссертация представляет собой логически выдержанное самостоятельное научное исследование, выполненное на актуальную тему, обладающее внутренним единством и содержащее новые научные результаты и положения, выдвигаемые для защиты.

Считаю, что диссертация Романа Валерьевича Ткаченко «Особенности химической эволюции галактического диска» является научно-квалификационной работой, которая удовлетворяет всем требованиям Положения о порядке присуждения учёных степеней, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 - «Астрофизика и звездная астрономия».

Официальный оппонент:
Хоперсков Александр Валентинович

Зав. кафедрой информационных систем и компьютерного моделирования, ФГАОУ ВО Волгоградский государственный университет, доктор физ.-мат. наук, профессор

Почтовый адрес: 400062 Волгоград, пр. Университетский, 100; ВолГУ
e-mail: infomod@volsu.ru, www.volsu.ru
тел.: 8(8442) 476051

А.В. Хоперсков

22.08.2020

Подпись Хоперскова А.В.
заверяю
Ученый секретарь федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный университет»
Н.В. Лисовская
«24» августа 2020 г.