

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА  
на диссертационную работу Романа Валерьевича ТКАЧЕНКО  
«ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ ГАЛАКТИЧЕСКОГО  
ДИСКА»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.03.02 (астрофизика и звездная астрономия).

Диссертация Р.В. Ткаченко подводит итог большой работы автора по изучению химической эволюции диска нашей Галактики и моделированию процесса обогащения диска металлами. Выбранная тема **актуальна**, и имеет отношение к эволюции нашей Галактики. Вопросами построения моделей химической эволюции активно занимается несколько научных групп в мире, и в последние годы предложен ряд моделей, объясняющих наблюдаемые оценки металличности звезд на разных расстояниях от центра Галактики. Химическая эволюция зависит от большого количества трудно учитываемых процессов, и каждая модель, предлагавшаяся различными авторами, имеет свои особенности, учитывающие различные факторы. Работы, вошедшие в диссертацию Ткаченко, **оригинальны по содержанию**, они не повторяют других работ, и позволяют не только объяснить в рамках определенных предположений наблюдаемый характер распределения кислорода и железа в звездах Галактики, но и получить ограничения на массы сверхновых и выход тяжелых элементов при взрывах. **Новизна полученных результатов бесспорна. Основные результаты** опубликованы в четырех статьях в высоко-рейтинговых рецензируемых журналах, и написаны в соавторстве с руководителем диссертации.

**Во Введении** очень четко обрисована проблема создания непротиворечивой картины химической эволюции содержания тяжелых элементов в диске нашей Галактики, раскрыта актуальность этой задачи, показаны предлагавшиеся ранее и предложенные в диссертации пути ее решения, а также дана краткая аннотация последующих глав. Основное содержание диссертации заключено в четырех главах.

**В первой главе** наиболее важным представляется численное моделирование синтеза кислорода в галактическом диске, которое учитывает совместное влияние коротационного резонанса и турбулентной диффузии на обогащение диска тяжелыми элементами. Сделан важный вывод о предпочтении короткой шкалы времени формирования диска за счет выпадающего газа на формирующийся диск, а также получены предельные массы звезд, которые могут взрываться как сверхновые и обогащать среду.

Самое важное из результатов **второй главы** – это оригинальное теоретическое рассмотрение возможного влияния локальных выпаданий низко-металлического газа на диск и на его химическую эволюцию с учетом продолжающегося звездообразования. Выводы могут иметь более широкое приложение, чем только объяснение локальных минимумов металличности в диске галактики. К примеру, металличность газа бывает нередко понижена в центральной области спиральных галактик.

**В третьей главе** для объяснения сходства радиальных профилей распределения кислорода и железа в диске галактики автор предлагает учет того, что сверхновые Ia не представляют однородной популяции, и существует короткоживущий подтип сверхновых, концентрирующийся к спиральным ветвям. Результаты моделирования дали хорошее

согласие с распределением железа в диске Галактики и позволили поставить пределы на выход железа в расчете на одну вспышку обоих типов Сверхновых Ia.

**В четвертой главе**, посвященной анализу распределения металличности звезд в окрестности Солнца, в диссертации вводится видоизмененная начальная функция масс звезд, для которой использование разработанной модели обогащения железом приводит к результирующей функции распределения металличности, близкой к наблюдаемой.

### **Перейдем к замечаниям.**

1. Уязвимым для критики местом в диссертации является большая роль, уделяемая при моделировании коротационному резонансу в модели химической эволюции диска, когда считается, что темп образования звезд и выброс тяжелых элементов непосредственно определяется, помимо усредненной плотности газа, относительной угловой скоростью спиральной волны плотности на данном радиусе, из чего с неизбежностью следует зануление этих процессов на коротации. В работах Wyse and Silk, 1989, Portinari, 1999, Mishurov et al., 2002, и некоторых других в своё время для объяснения радиального градиента металличности в диске Галактики была введена простая линейная (если плотность газа мало меняется с радиусом) зависимость темпов звездообразования от угловой скорости спирального узора относительно диска. Это было оправданным и результативным шагом, заслуживающим внимания и развития. Развития этот подход ждёт и сейчас. В настоящее время картина представляется более сложной, и роль волн плотности в глобальном стимулировании звездообразования представляется не столь явной и значительной, в противном случае можно было бы ожидать, что галактики с упорядоченной спиральной структурой имеют существенно более высокую эффективность звездообразования (темп звездообразования на единицу массы газа), чем с флюккулентной структурой, где нет сильных волн сжатия, но этого не наблюдается. Наглядный пример: в неправильных галактиках интенсивное звездообразование идет безо всяких крупномасштабных волн плотности. Почему оно тогда должно гаснуть на коротации в спиральных галактиках? Как отмечали Elmegreen & Elmegreen (1986ApJ...311..554), в спиральных галактиках отсутствует четкая корреляция между темпом звездообразования на данном расстоянии от центра и глубиной потенциальной ямы, создаваемой спиралями; спирали скорее организуют, упорядочивают положение областей звездообразования. В диссертации стоило бы проверить, как выполняется принятый закон образования массивных звезд (ур-ние (1.8) в разделе 1.2.2) для нашей и других галактик. Радиальный профиль темпа звездообразования в нашей Галактике приведен, например, в цитируемой в диссертации работе Kibryk et al, 2015 (см. Fig. B1), и он не демонстрирует никакого значимого минимума там, где ожидается коротация – ни по сверхновым, ни по пульсарам. Нет заметных минимумов в радиальном распределении индикаторов звездообразования и в большинстве других спиральных галактик (см., например, Yim & van der Hulst, 2016, MNRAS, 463, 292). Автор, правда, ссылается на работу Уркухарт (Urquhart) и др, 2014, где по распределению молодых объектов в Галактике заметен минимум на ~ 9 кпк (вблизи коротации), но этот минимум почти расплывается при усреднении данных к югу и северу от плоскости Галактики, и сами авторы не настаивают на его достоверности. Что действительно демонстрируется в этой работе, так это концентрация молодых объектов к спиральным ветвям Галактики, и это делает радиальный профиль распределения объектов не-монотонным, причем спирали, определяемые по молодым объектам, при пересечении солнечного круга, близкого к

коротации, отнюдь не выглядят подавленно. Из уравнения (1.8) следует также ожидаемый рост эффективности звездообразования между коротацией и внешним линбладовским резонансом, но это никем не отмечалось.

**Резюмирую замечание:** в диссертационной работе остается неясным, насколько предлагаемая в предельно упрощенном виде зависимость темпов звездообразования от относительной угловой скорости узора является обоснованной в применении к нашей и другим галактикам. Было бы важным иметь более глубокое обсуждение этого вопроса в диссертации.

2. С учетом короткой шкалы времени образования диска, если провал в распределении кислорода сформировался на ранней стадии жизни галактики, и после этого замылся, превратившись в плато, то в общем случае радиус коротации надо было рассматривать как свободный параметр, поскольку в то далекое время в молодом диске и характер звездообразования, и скорость спирального узора, могли быть иными, чем мы наблюдаем сейчас.

3. В диссертации при рассмотрении условий звездообразования сделан важный и совершенно правильный формальный шаг – в предлагаемой модели автор «выводит» темп образования маломассивных звезд из-под какой-либо зависимости от угловой скорости спирали, связав темп их образования лишь с плотностью газа, и оставив искомую зависимость от волны сжатия лишь для массивных короткоживущих звезд. Но физическое обоснование этому слабое: как можно понять из текста диссертации, просто считалось, что долгоживущие звезды тоже не образуются на коротации, но в течение долгой жизни рассеяние звезд размывает минимум в их распределении. Но если темп звездообразования всех звезд действительно все время имел глубокий минимум в некоторой зоне вблизи коротации, то и рассеиваться нечему, и провал в звездной плотности, а также ожидаемый в этом случае избыток не-израсходованного газа, хоть и в сглаженном виде должен как-то себя обнаружить в спиральных галактиках в области коротации по распределению яркости, цвета, или поверхностной плотности газа, если только угловая скорость спирального узора сама не является функцией времени (что вполне вероятно, хотя и не вписывается в построенную в диссертации модель).

4. Некорректность ссылок на некоторые работы. В качестве важных аргументов, подтверждающих связь профилей металличности или звездообразования с положением коротации по наблюдениям спиральных галактик, в диссертации приводятся ссылки на три работы: Scarano et al 2011, Martínez-García and Puerari 2014 и Hu et al . 2018 (номера ссылок [87-89]). Но на самом деле в первой и третьей работе получены лишь профили металличности, причем не звезд, а газа (а это не одно и то же), при этом радиусы коротации галактик вообще в работах не определяются, а во второй работе – радиусы коротации определяются для двух галактик по разности фаз между газом и индикаторами звездообразования в спиралах, но нет никаких слов или свидетельств об остановке или замедлении звездообразования на коротации, и к тому же авторы совсем не рассматривают химию.

5. Представляются очень ненадежными, тонушими в большой дисперсии значений, выделения локальных провалов в распределении кислорода вдоль радиуса Галактики (рис.1.1). С учетом большого разброса точек, их достоверность очень сомнительна, а вероятностного анализа нет. Это, однако, не делает излишней проведенное автором рассмотрение теоретической возможности появления таких участков.

В качестве совета на будущее, а не замечания к диссертации: стоило бы обратить внимание на существование в диске Галактики толстого компонента диска со своей историей звездообразования и химической эволюцией, звезды которого перемешаны с тонким диском, что требует коррекции для любой модели химической эволюции диска. Хотя этого, по-моему, еще никто аккуратно не сделал.

#### **Подведем итоги.**

Диссертация написана на высоком научном уровне и свидетельствует о глубоком знании предмета и высокой квалификации автора, и это самое главное. Важно, что диссертанту очевидны реальные направления продолжения начатых работ.

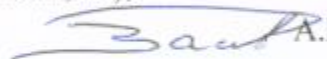
В работах, включенных в диссертацию, автор получил целый ряд интересных выводов. На мой взгляд, наиболее важными с научной точки зрения и достаточно обоснованными результатами диссертации являются следующие четыре:

1. Впервые в модели химической эволюции диска проведен учет различного времени жизни звезд, с которыми связаны Сверхновые Ia, что позволило лучше объяснить наблюдаемый характер распределения железа в звездах вдоль радиуса Галактики
2. Автор предложил и рассчитал оригинальный путь объяснения функции распределения металличности маломассивных звезд, связав его с модифицированной начальной функцией масс звезд.
3. Автором оценены средние массы железа и кислорода, выбрасываемого в среднем на одну сверхновую типов Ia и 2, что дает информацию о предельной оценке их массы.
4. Показано, что модели медленного формирования диска за счет поступающего газа хуже воспроизводят радиальное распределение кислорода и железа в диске, чем модели его формирования за короткое время около 2 млрд лет. Этот вывод имеет особое значение, поскольку он непосредственно касается не только химической эволюции диска, но и эволюции темпов аккреции и звездообразования в Галактике.

Приведенные выше замечания не умаляют научной ценности основных выводов, представленных в диссертации.

Исходя из изложенного выше, я считаю, что представленная диссертация удовлетворяет всем необходимым требованиям для успешной защиты, и ее автор, Романа Валерьевича ТКАЧЕНКО, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 "Астрофизика и звездная астрономия".

Заведующий отделом внегалактической астрономии ГАИШ МГУ  
(119234, Москва, Университетский проспект, 13),  
доктор физ.-мат.наук, профессор  
[zasov@sai.msu.ru](mailto:zasov@sai.msu.ru)

 А.В.Засов

Подпись зав.отдела ГАИШ МГУ А.В.Засова заверяю  
Директор ГАИШ МГУ  
профессор

