

## Отзыв

официального оппонента на диссертацию С. А. Алексеевой на тему: “Определение содержания углерода и натрия у звезд спектральных классов В-К с учетом отклонений от локального термодинамического равновесия”, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 — астрофизика и звёздная астрономия

Исследование химического состава космических тел — одно из важнейших направлений современной астрофизики. Изучение химсостава звёзд даёт возможность проследить их эволюцию на протяжении миллиардов лет. В настоящее время прогресс в технологии спектральных наблюдений, новые приемники излучения и использование телескопов с большой апертурой способствуют получению высококачественных спектров. Однако существует определенный дефицит в методах их модельной интерпретации. Практика показывает, что простое ЛТР-приближение при расчете населенностей атомных уровней с последующим построением синтетического спектра приводит к избыточному упрощению задачи и, в итоге, к большим ошибкам в модельной интерпретации.

В настоящей диссертации предлагаются новые методики построения синтетических спектров на основе не-ЛТР расчетов для атомов углерода и натрия, разработанные и усовершенствованные самим автором. В диссертации продемонстрировано, как эти методы могут быть с успехом применены к исследованию химического состава большого числа объектов из различных подгрупп Галактики. Поэтому тема диссертации, безусловно, актуальна.

Диссертация состоит из Введения, 5 глав, Заключения и списка цитированной литературы (161 наименование).

Во Введении приведены все необходимые для диссертации сведения: дано развёрнутое изложение темы, её актуальность, приведен обзор научной литературы по изучаемой проблеме, перечислены цели исследования, практическая значимость исследования, личный вклад соискателя в совместные работы, апробация результатов.

Глава 1 посвящена методическим вопросам учета влияния не-ЛТР эффектов на профили спектральных линий. Описаны использование программного комплекса DETAIL для расчета населенностей уровней, применяемые при этом методы учета ударных скоростей с электронами и атомами водорода, а также используемые модели звездных атмосфер.

В Главе 2 диссертант показала, что созданная ею на основе наиболее новых данных об ударных скоростях модель атома и иона углерода способна не только адекватно описать линии разных мультиплетов одним содержанием элемента, но и смоделировать эмиссионные линии в спектрах холодных В-звезд. При этом показано, что применение более ранних расчетов ударных скоростей не в состоянии описать такую эмиссию. На примере 4 звезд продемонстрировано, что предлагаемая модель позволяет



использовать для определения содержания углерода линии в двух стадиях ионизации, причем как абсорбционные, так и эмиссионные.

В Главе 3 модель атома углерода применена к определению содержания с учетом не-ЛТР эффектов в атмосферах 57 звезд в широком диапазоне содержания металлов. Проведено сравнение полученного содержания с результатами исследований молекулярных линий CN и C<sub>2</sub>. Хорошее согласие содержаний углерода, даваемое этими двумя методами, подтверждает адекватность созданной модели атома, а также позволяет расширить область использования молекулярных линий на звезды с большим дефицитом металлов.

В Главе 4 автором описана созданная им модель атома натрия для комплекса DETAIL, ее исследование и использование для определения содержания натрия в спектрах большого количества звезд. Показано, что неучет отклонений от ЛТР может приводить к систематическим ошибкам. Всего исследовано 78 красных звезд-гиганов и 51 карлик спектральных классов FGK, принадлежащих разным подсистемам нашей Галактики.

Глава 5 посвящена сравнению полученных содержаний углерода, натрия и циркония с учетом влияния не-ЛТР эффектов у большого набора FGK-карликов с результатами моделирования химической эволюции Галактики. Показано, что современные модели химической эволюции Галактики еще не могут достаточно точно описать наблюдаемое распределение химических элементов.

В Заключение приводятся результаты, полученные в работе.

Замечания по диссертации носят в основном редакционный характер:

1. Неудачно выбрана структура диссертации: результаты, описанные в третьей главе, получены ранее результатов второй главы, причем с использованием более старой и менее совершенной модели атома. При этом не указано, насколько на результаты третьей главы влияет использование более новых и более точных расчетов ударных скоростей O. Зацаринного, применяемых в модели атома углерода во второй главе.
2. Название раздела 4.1 "Формирование линий Na I в неравновесных условиях" не вполне соответствует изучаемому вопросу. В представленной работе рассматриваются только стационарные атмосферы, для которых характерное время изменения таких параметров как температура, плотность, химический состав, скорость движения газа и т.п. значительно больше времени, необходимого для установления статистического равновесия в среде. Таким образом, делается предположение о статистическом равновесии, когда число процессов, опустошающих данный уровень в атоме, предполагается равным числу процессов, населяющих его. То есть надо говорить об отсутствии детального равновесия, но не о "неравновесных условиях".
3. В описании личного вклада автора в опубликованные работы [2A], [4A], [6A] недостаточно четко обозначены вклады соавторов.



формулировкой пункта "на защиту выносятся..."

5. Некоторые определения и сокращения (ЛТР) определены дважды, некоторые (населенности) - вообще не определены и т.п. Следовало бы вынести определения и сокращения на отдельный лист, как рекомендуется правилами.

Использован научный жаргон. Следовало бы заменить: стр. 26 с "принадлежащих синглетам и триплетам" на "синглетной и триплетной системе электронных уровней"; стр. 109 с "элементные отношения" на "соотношение содержаний элементов"; стр.121 "во второй главе построена модель" на "во второй главе описана, построенная модель" и т.п.

Стр. 63 - не понятен термин "нормализация континуума".

При перечислении числа используются в произвольном порядке, например, стр. 67 - "в Таблицах 8,9,1"

6. Неточности в оформлении списка литературы:

ссылка [25], [66], [80], [117], [123] - не указан тип источника (диссертация, монография и т.п.);

ссылка [27] - дана ссылка на препринт, хотя статья уже вышла в A&A, 593, 48, 2016;

ссылка [51] - указано неверное название статьи;

ссылка [56] - отсутствует иная информация, кроме фамилии автора;

ссылка [57] - указан неверный интернет-адрес;

стр. 77 - приведена неверная ссылка на расчеты Фросе Фишер. В подобных случаях лучше давать ссылку на базу данных ADAS. Там же - неточное описание использованных в модели натрия ударных скоростей. Отсутствует приведенное в оригинальной работе автора [6A] описание ударных скоростей из работы Park (1971).

7. Опечатки: на стр. 7 написано "отклонениям" вместо "отклонения"; в ссылке [66] написано "excitation" вместо "excitation".

8. Неточности в описании формул: на стр. 22 в формуле (1)  $n_i$  и  $n_j$  - не населенности верхнего и нижнего уровней, а населенности двух различных уровней; в формуле (2) не даны расшифровки обозначений.

9. Использование неточных формулировок:

На стр. 28 написано "Для всех переходов" - надо "Для всех ударных переходов"; написано "принимая эффективную силу ... для разрешенных" - надо "для запрещенных". На стр. 51 написано "К сожалению, наиболее точные данные... отсутствуют" - надо "Отсутствуют детальные квантово-механические расчеты". На стр. 108 написано "Для того, чтобы расшифровать наблюдаемые содержания, требуются ..." - надо "Для того, чтобы получить реальные содержания, требуются ...". На стр. 109 написано "... с точными атмосферными параметрами..." - надо "... с надежно определенными атмосферными параметрами...". На стр. 121 написано "были обнаружены в четырех самых горячих звездах..." - надо указывать, что среди рассмотренных семи звезд. На стр. 122 написано "...в классических 1D моделях атмосфер, представляющих модели звезд..." - следует убрать



"представляющих модели". На стр. 88 написано - "Зависимость не-ЛТР поправок от эквивалентной ширины обусловлены различным положением линии на кривой роста" - на самом деле это происходит из-за разной глубины формирования линии.

Сделанные замечания не влияют на оценку диссертации как законченного исследования, выполненного на современном научном уровне. Новизна и научная значимость результатов диссертации несомненны и подтверждены публикациями в ведущих астрономических журналах в России и за рубежом. Методическую и практическую значимость имеют разработанные автором модели атомов углерода и натрия для расчетов населенностей атомных уровней в условиях отсутствия ЛТР. Определенные автором с высокой точностью содержания углерода, натрия и циркония у звезд, относящихся к разным галактическим подсистемам, могут быть применены для "нормировок" моделей химической эволюции Галактики.

Результаты диссертации могут быть использованы в Институте космических исследований РАН, Институте астрономии РАН, САО РАН, ГАО РАН, ГАИШ МГУ, КрАО РАН, Казанском федеральном университете и других астрономических учреждениях.

Результаты диссертации опубликованы в шести статьях в рецензируемых журналах.

Автореферат в целом отражает содержание диссертации.

Все сказанное позволяет заключить, диссертационная работа "Определение содержания углерода и натрия у звезд спектральных классов В-К с учетом отклонений от локального термодинамического равновесия" является научно-квалификационной работой, которая полностью удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.03.02 (астрофизика и звездная астрономия), а ее автор Софья Александровна Алексеева безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент,  
ведущий научный сотрудник  
отдела физики звезд ФГБУН КрАО РАН,  
доктор физ.-мат. наук

С.А. Коротин

24 марта 2017 года

Подпись С.А.Коротина заверяю

ученый секретарь ФГБУН КрАО РАН



А. В. Бакланов