

ОТЗЫВ

на диссертацию Галазутдинова Газинура Анваровича
«Спектроскопические исследования Галактической межзвездной среды в
оптическом диапазоне»,

представленную на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук по специальности 1.3.1 – Физика космоса, астрономия

Диссертационная работа Г.А. Галазутдинова «Спектроскопические исследования Галактической межзвездной среды в оптическом диапазоне» выполнена в Федеральном государственном учреждении науки Крымская астрофизическая обсерватория. Она состоит из Введения, пяти глав, Заключение, Приложения, Списка литературы, содержащего 565 наименований. Общий объем диссертации – 355 страниц. В диссертации 185 рисунков и 75 таблиц.

Диссертация посвящена **актуальным** проблемам современной астрофизики, и в ней получен целый ряд **новых** результатов:

– проанализированы спектральные наблюдения – более 500 горячих покрасневших звезд с высоким спектральным разрешением (до $\sim 3 \times 10^5$) и отношением сигнала к шуму (до ~ 4000), – в результате составлен каталог объектов, рекомендованных для изучения межзвездной среды;

– на базе результатов исследований распределения межзвездного ионизованного кальция и титана построена шкала межзвездных расстояний;

– оценен вид кривой вращения Галактики по результатам измерения лучевых скоростей и расстояний межзвездных облаков в направлениях галактических долгот $l = 135^\circ$ и $l = 180^\circ$;

– обнаружены редкие межзвездные облака с солнечным содержанием кальция и железа, типа CaFe, без молекул и межзвездной пыли;

– уточнено влияние объектов с «серым поглощением» на определение спектральных параллаксов звезд;

– подтверждена вытянутая структура рассеянного скопления Плеяды;

– обнаружены запрещенные линии поглощения гелия (HeI*) в окрестностях горячих звезд с мощным УФ-излучением;

– обнаружен целый ряд простых двухатомных молекул, для которых уточнены, или впервые определены силы осцилляторов спектральных линий;

– обнаружено более 100 новых диффузных межзвездных полос (ДМП) в оптическом и ближнем ИК диапазонах, измерены их длины волн и интенсивности в различных объектах;

– оценены параметры носителей некоторых ДМП;

– указана связь содержания молекул H_2 и CH , что позволяет использовать молекулу CH в качестве индикатора H_2 ;

– измерены точные длины волн некоторых узких ДМП, и предложен численный метод оценки изменений сложных профилей ДМП.

Разработанные диссертантом в САО РАН методы обработки цифровых спектров высокого разрешения, входящие в авторский пакет DECH, активно используются при анализе спектральных данных.

Достоверность полученных результатов подтверждается многочисленными проверками на разных телескопах как северного, так и южного полушарий.

Работы Галазутдинова, вошедшие в диссертацию, докладывались на многочисленных всероссийских и международных конференциях, и опубликованы в 94 статьях в рецензируемых журналах, в том числе – 39 статей – в качестве первого автора. Несмотря на то, что публикации содержат много авторов, вклад соискателя существенен, и более 70% наблюдательного материала было получено с участием Галазутдинова.

После **Введения**, содержащего необходимые сведения о диссертационной работе (актуальность темы, цель работы, ее научная новизна и практическая значимость), в **Главе 1** дается описание методики наблюдений с высоким спектральным разрешением межзвездных линий поглощения в оптическом и ближнем ИК диапазонах. В этой Главе автор рассматривает особенности получения и обработки данных, специфические для межзвездных спектров атомов и молекул, а также диффузных межзвездных полос.

Глава 2 посвящена результатам наблюдений атомарного газа в Галактическом диске. Рассмотрен метод калибровки межзвездных расстояний по линиям CaII и TiII. Излагаются результаты исследований структуры и кинематики тонкого диска Галактики. Анализируются физические условия, приводящие к образованию линий поглощения метастабильного HeI*. Перечисляются характеристики открытых автором редких облаков, состоящих, преимущественно, из нейтральных Ca и Fe (так называемые CaFe-облака). Подтверждается предположение о вытянутой вдоль луча зрения пространственной структуре рассеянного скопления Плеяды.

Глава 3 описывает многочисленные исследования простых межзвездных молекул, включающих CH, CH⁺, CN, OH, OH⁺, C₃, для которых, в ряде случаев, впервые измерены силы осцилляторов наблюдаемых линий астрономическими методами. Также сообщается о первых отождествлениях линий молекул NH и SH.

Полученные наблюдательные факты, подтверждающие существование газо-пылевых комплексов на луче зрения, искажающих спектры удаленных объектов независимо от длины волны («серое поглощение»), представлены в **Главе 4**.

Диффузные межзвездные полосы рассмотрены в **Главе 5**, в которой проведен обширный анализ различных корреляционных связей интенсивностей и ширины ДМП с физическими условиями в окружающем газе, определенными из спектров сопутствующих атомов и молекул.

Основные результаты соискателя ученой степени перечислены в **Заключении**.

Переходя к общей оценке диссертационной работы, отметим следующие положительные моменты:

- тщательно отработаны методики наблюдений на эшелльных спектрографах с высоким спектральным разрешением и получения спектров с предельно высоким отношением сигнала к шуму;

- накоплен большой наблюдательный материал, приобретенный в различных российских и международных обсерваториях;

- анализ наблюдений позволил получить новые интересные результаты по физическим свойствам и химическому составу межзвездных диффузных облаков. Надежность представленных результатов обеспечивается контролем систематических ошибок определения параметров абсорбционных линий, а также использованием современных математических методов обработки экспериментальных данных.

К содержанию диссертации имеется несколько замечаний:

- в Главе 2, в разделах 2.1.1 и 2.1.2, описываются методы определения межзвездных расстояний по абсорбционным линиям CaII и TiII, соответственно. Первое, на что следует обратить внимание, – вычисленные коэффициенты ранговой корреляции Спирмена (рис. 2.1 – 2.4) приводятся без указания ошибок, хотя разбросы точек на этих рисунках значительны. Во-вторых, параметры в соотношениях «расстояние – эквивалентная ширина» приведены без ошибок, хотя сами параметры указываются с тремя знаками после запятой (например, на стр. 50, $d = 2.654 \times EW(\text{CaII K})$ – создается ложное впечатление, что эти параметры известны с относительной ошибкой 0.2%). Далее, на этой же странице, в ссылке на работу Megier et al. 2005, дается соотношение $d = 2.78 \times EW(\text{CaII K}) + 95$ [пк]. При этом, свободный параметр, 95 пк, включен для учета радиуса Местного Пузыря, почти не содержащего межзвездного газа и пыли. Аналогичная процедура установления зависимости «расстояние – эквивалентная ширина» применяется к более слабым межзвездным линиям TiII. Обе полученные выборки для CaII и TiII сравниваются на рис. 2.11. Большой разброс данных на обеих панелях этого рисунка вызывает сомнение в точности вычисленных коэффициентов корреляции Пирсона: $R = 0.9$ для TiII и $R = 0.8$ для CaII, которые также указаны без ошибок, а сами графики линейной регрессии приводятся без доверительных диапазонов. На основании данных по TiII, показанных на верхней панели рисунка 2.11, автор диссертации дает результирующее соотношение между эквивалентной шириной TiII и расстоянием: $d = 30 (\pm 1) \times EW(\text{TiII } 3383.579) - 30 (\pm 2)$ [пк]. Относительно приведенного соотношения возникает два вопроса:

- 1) разброс точек при фиксированной эквивалентной ширине на рис. 2.11 (верхняя панель) лежит в диапазоне от 1 кпк при $EW \sim 25 \text{ мÅ}$ до 2 кпк при $EW \sim 100 \text{ мÅ}$, что составляет, соответственно, разброс относительно среднего в $\sim 70\%$ и $\sim 50\%$. Каким образом относительная ошибка в расстоянии, в вышеуказанном уравнении, может быть порядка 3%?

2) в аналогичном соотношении для расстояния по CaII-методу свободное слагаемое имеет простое физическое объяснение – радиус Местного Пузыря. Остается неясным физический смысл величины -30 пк в TiII-методе.

– на стр. 58 утверждается, что CaII-метод может быть использован для объектов, расположенных в Галактическом диске на достаточно больших расстояниях (до нескольких кпк) – см. рис. 2.9. Однако, из рис. 2.9 видно, например, что при $D_{\text{CaII}} \sim 2$ кпк расстояние для объектов, определенных GAIA, лежит в интервале от ~ 1 до ~ 5 кпк. Такого же порядка большой разброс обнаруживается и в других точках на рис. 2.9.

– вывод о кеплеровском вращении тонкого газового диска Галактики в направлениях галактических долгот $l = 135^\circ$ и $l = 180^\circ$ базируется на CaII-методе для определения лучевых скоростей и расстояний до межзвездных облаков. В большинстве случаев, кеплеровское вращение галактических дисков не подтверждается плоскими кривыми вращения, измеренными в других галактиках, о которых упоминает автор. Кроме этого, плоские кривые вращения обусловлены обширными галактическими гало темного вещества, которое проявляет себя в многочисленных эффектах гравитационного линзирования удаленных объектов. По-видимому, выборка вдоль только двух галактических долгот, является недостаточной для установления истинной картины кривой вращения тонкого газового диска. Либо, неопределенности в расстояниях до межзвездных облаков не позволяют использовать CaII-метод в качестве универсального для этой задачи. Данный важный вопрос, затрагивающий природу темного вещества, требует дальнейшей проработки.

– на стр. 132 идет ссылка к Таблице 33, в заголовке которой пропущено название молекулы CN. Во второй колонке этой Таблицы перечислены измеренные дублетные отношения, которые, во многих случаях, меньше 1.3, что, согласно тексту диссертации, указывает на насыщение линий дублета. Как учитывался этот эффект насыщения при оценке превышения температуры возбуждения нижних вращательных уровней CN над температурой микроволнового фонового излучения? Фиксация доплеровского параметра $b = 1$ км/с, о которой идет речь на стр. 134, приводит, по словам автора, к более точному результату для кривой роста, хотя сама кривая роста не обсуждается. Предложение использовать перемасштабирование параметра b , полученного по линиям CN, возможно, если обе молекулы трассируют друг друга. Однако, на стр. 130 автор приводит наблюдательные факты, указывающие на то, что «лучевая концентрация CN может различаться более чем на порядок у объектов, где лучевая концентрация молекулы CN одинакова». Утверждение на стр. 137, что вращательная температура CN почти постоянна в большинстве случаев, противоречит утверждению на стр. 130, что CN очень чувствительна к физическим условиям внутри межзвездных облаков, из-за высокого дипольного момента. Поэтому вопрос о значении параметра b , в каждом конкретном случае, требует индивидуального подхода.

Также отметим некоторые мелкие замечания:

– по всему тексту встречаются различные грамматические и пунктуационные ошибки, а также опечатки и промахи (например, в Таблице 1 смещена строка с размерностями);

– в оформлении рисунков отсутствуют подписи осей (рис. 1.7, рис. 1.12, рис. 1.14, рис. 2.7 и далее по тексту);

– стр. 24: ссылка на работу Musaev et al., 1999 – спектральное разрешение от 45 000 до 500 000. В самой работе указаны три спектральных разрешения: 45 000, 90 000 и 190 000;

– стр. 25: «... использованы два детектора... с разрешением 2048×2048 пикселей» – количество пикселей в CCD не определяет спектральное разрешение;

– на стр. 43, в формуле для центра тяжести абсорбционной детали, не определены величины, стоящие под знаком суммы;

– в оформлении таблиц – не везде указаны размерности Галактических координат l и b ;

– в ряде случаев в таблицах не приводятся ошибки измерений;

– правила округления измеряемых величин рекомендуют указывать ошибки измерений до первой значащей цифры, и по этой ошибке записывать результат измерений (например, в Таблице 1: $K \pm \sigma_K = 619 \pm 32$ мÅ следует писать как 620 ± 30 мÅ). Если первая значащая цифра в ошибке измерений 1, то следует округлять ошибку в результате до второй значащей цифры (например, $D_{\text{Call}} \pm \sigma_{D_{\text{Call}}} = 4896 \pm 1086$ пк должно записываться как 4900 ± 1100 пк);

– к рекомендациям, которые позволяют достичь оптимальных результатов в наблюдениях с CCD (Глава 1, параграф 1.1), следовало бы добавить ссылки на известные учебники. Например, S.B. Howell “Handbook of CCD Astronomy” (Cambridge University Press, 2000), в котором подробно рассмотрены необходимые калибровки CCD, включающие bias, dark frames и flat field -коррекции в параграфе 4.5;

– на стр. 138 утверждается, что «высокая корреляция между обилием молекулы NH и количеством пыли свидетельствует в пользу гипотезы о формировании этой молекулы на поверхности пылинок; молекула NH более тесно связана с CN...», однако, на стр. 134 сказано, что пылинки не играют существенной роли в образовании CN, и что лучевая концентрация и температура возбуждения CN не коррелируют с $E(B - V)$. Это же противоречивое утверждение вынесено в резюме к Главе 3 (п. 6 и п. 8);

– на стр. 183 высказано предположение, что носителем ДМП могут быть большие молекулы, образовавшиеся в диффузных облаках – возникает вопрос о фотодиссоциации таких молекул межзвездным УФ-излучением, которое пронизывает диффузные облака;

– таблицы с номерами 22, 24, 32, 34, 46, 49, 67 и 75 из Приложения – не описаны в тексте.

Перечисленные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Галазутдинова Г.А. Считаю, что рассматриваемая

диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г., № 842, а ее автор – Газинур Анварович Галазутдинов – заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1 – Физика космоса, астрономия.

Автореферат диссертации правильно отражает ее содержание.

Левшаков Сергей Анатольевич
д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник сектора теоретической астрофизики, Отделение физики плазмы, атомной физики и астрофизики, Федеральное государственное бюджетное учреждение Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
С.-Петербург, 194021
Политехническая, 26
тел. раб. 292-73-26
e-mail: lev@astro.ioffe.ru

24 сентября 2024 г.

/С.А. Левшаков/

Подпись С.А. Левшакова удостоверяю: