

УДК 524.527:520.84

О ДЛИНАХ ВОЛН ПОКОЯ ДИФFUЗНЫХ МЕЖЗВЕЗДНЫХ ПОЛОС

© 2024 Г. А. Галазутдинов^{1,2*}, Е. В. Бабина^{1**}¹Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, 298409 Россия²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 19 февраля 2024; после доработки 11 апреля 2024; принята к публикации 24 апреля 2024

Длины волн покоя диффузных межзвездных полос (diffuse interstellar bands — DIB) являются параметрами фундаментальной важности из-за отсутствия однозначной идентификации этих загадочных особенностей. Обычно длины волн DIB оцениваются с использованием известных межзвездных атомных или молекулярных линий, служащих для сдвига шкалы длин волн в «межзвездное» состояние. Однако атомы/молекулы и носители диффузных полос могут находиться в разных частях межзвездного облака, движущихся с разной скоростью относительно наблюдателя. В данной работе мы показываем, что самая узкая известная диффузная межзвездная полоса 6196 Å является предпочтительным нуль-пунктом для построения «межзвездной» шкалы длин волн. Кроме того, мы предлагаем использовать геометрический центр масс диффузных полос (эффективную длину волны) в качестве меры длины волны покоя для этих, как правило, асимметричных особенностей. Исключением является DIB 6196. Согласно предлагаемому здесь методу, симметричная нижняя часть профиля этой особенности используется для построения «межзвездной» шкалы длин волн, а центр масс DIB 6196 служит для изучения переменности, наблюдаемой в верхней части профиля. Мы оценили величину изменения центра масс диффузных полос 5780, 5797, 6284 и 7224 Å, измеренную на 41 луче зрения в широком диапазоне межзвездного покраснения ($E_{B-V} = 0^m13-1^m06$). Использовались объекты без наблюдаемого в спектрах высокого разрешения доплеровского расщепления в профилях межзвездных линий SN 4300 и KI 7699 Å. Показано, что диффузные полосы демонстрируют постепенное увеличение ширины профиля, сопровождающееся ростом длины волны центра масс, т.е. красное крыло профилей является наиболее изменчивой частью DIB. Для оценки ширины диффузных полос мы предлагаем использовать параметр «эффективная ширина» W_{eff} , который представляет собой отношение эквивалентной ширины (EW) к глубине профиля и впервые был введен нами в 2008 г. В отличие от общепринятой полуширины на половине интенсивности (full width at half maximum — $FWHM$), параметр W_{eff} не чувствителен к форме профиля. Таким образом, W_{eff} обеспечивает меньшую погрешность измерений, чем $FWHM$. Постепенное увеличение W_{eff} , сопровождающееся красным смещением центра масс профиля, может свидетельствовать о заселении более высоких переходов Р-ветви полос молекул, предполагаемых носителей диффузных полос. Также показано, что в σ -облаках диффузные полосы, как правило, шире, но менее глубокие, чем в ζ -облаках.

Ключевые слова: межзвездная среда: облака — межзвездная среда: атомы, молекулы

1. ВВЕДЕНИЕ

Межзвездное пространство, особенно в диске Галактики (и подобных ей спиральных галактиках), заполнено облаками диффузной материи. Средняя плотность этой среды составляет всего один атом водорода на кубический сантиметр — так называемый предел Оорта. Оптически более толстые области (межзвездные облака) обычно делят на четыре типа в зависимости от их плотности: «диффузные», «полупрозрачные», «плотные» и области звездообразования. Плотные облака и области

звездообразования можно анализировать только в микроволновом или дальнем инфракрасном спектральном диапазоне, так как в оптическом и ультрафиолетовом диапазонах они слишком непрозрачны. Наличие полупрозрачных облаков, изучаемых в рамках данной статьи, выявляется в основном по абсорбционным линиям в спектрах горячих звезд, наблюдаемых сквозь межзвездную среду. Межзвездная среда (МЗС) состоит из нескольких компонентов: атомарного и молекулярного газа, а также пылинок, которые наблюдаются в соответствующих спектральных абсорбциях (редко в эмиссиях).

Наиболее распространенной из межзвездных

*E-mail: runizag@gmail.com

**E-mail: helenka_truth@mail.ru

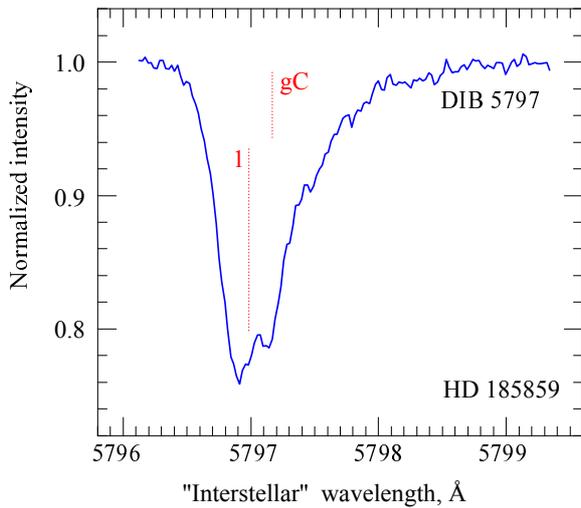


Рис. 1. Асимметричный профиль DIB 5797 в спектре HD 185859. Цифрой 1 отмечено положение «каталожной» длины волны (Galazutdinov et al., 2000); gC — положение центра масс диффузной полосы.

абсорбций, наблюдаемой, вероятно, во всех диффузных и полупрозрачных облаках, является дублет Ca II (состоящий из линий H и K). Его межзвездное происхождение известно еще по наблюдениям Hartmann (1904). Линии H и K часто наблюдаются даже при отсутствии других межзвездных линий (за исключением дублета натрия 5900 Å). Множество компактных, оптически тонких, рассеянных облаков относительно равномерно заполняют галактический диск (Galazutdinov et al., 2015). Спектральные линии многих известных химических элементов можно наблюдать в спектрах МЗС, но подавляющее большинство из них видны только благодаря резонансным линиям, расположенным в ультрафиолете, доступном лишь для космических телескопов.

Среди известных межзвездных спектральных линий и полос можно наблюдать неотожествленные, довольно широкие спектральные особенности, известные как диффузные межзвездные полосы (DIB), впервые обнаруженные еще в 1922 году (Negeer, 1922). Считается, что наиболее вероятными носителями DIB являются сложные молекулы, в том числе пребиотические. Молекулярное происхождение DIB подтверждается наличием субструктур внутри их профилей (Sarre et al., 1995; Kerr et al., 1998; Galazutdinov et al., 2008, 2020). Для конечной идентификации носителей DIB необходимо сравнить астрофизические данные с лабораторными спектрами молекул, полученными в газовой фазе. Наиболее вероятными кандидатами являются углеродные цепочки и полициклические ароматические углеводороды — ПАУ (Sarre et al., 1995; Salama et al., 1999; Motylewski et al., 2000).

Подавляющее большинство DIB (Fan et al., 2019) представляют собой относительно узкие и неглубокие абсорбции; анализ формы их профилей требует очень высокого разрешения и высокого S/N .

В течение последних трех десятилетий были обнаружены смещения длины волны некоторых DIB относительно атомных/молекулярных межзвездных линий (Krełowski and Greenberg, 1999; Galazutdinov et al., 2006, 2008; Krełowski et al., 2015). Также было отмечено, что профили (ширина, форма), в том числе «смещенных» DIB, по-видимому, меняются в зависимости от физических условий в конкретном облаке. Например, Kaźmierczak et al. (2009) была обнаружена связь вариаций профиля некоторых DIB с изменениями вращательной температуры простых углеродных молекул (C_2 , C_3). Эксперименты показывают, что спектры молекул (кандидатов в носители DIB), как правило, имеют одну–две сильные и несколько слабых линий. Очень сложно связать слабые DIB с сильными и таким образом разделить их на группы («семейства»), происходящие от одного носителя (например, Krełowski and Walker, 1987; Krełowski and Westerlund, 1988), на основе лишь наблюдательных данных. Дело в том, что S/N в профилях слабых DIB обычно очень низкое, что делает измерения их интенсивности недостаточно точными. Чтобы надежно измерить интенсивность слабых DIB, предполагаемых членов «семейств», требуются очень высокие значения S/N и спектрального разрешения. Это необходимо для отделения исследуемых DIB от других звездных и межзвездных особенностей и предполагает использование больших телескопов даже для относительно ярких звезд. Профили DIB могут меняться характерным для соответствующего носителя образом в зависимости от изменения температуры (кинетической и вращательной). Изменения профилей могут провоцировать изменение эффективной длины волны (центра масс профиля). Важно найти связь между шириной профилей DIB, положением, интенсивностью субструктур в их профилях и другими наблюдаемыми характеристиками МЗС — такими как, например, содержание CH , CH^+ , CN и вращательные температуры молекул C_2 и C_3 .

До настоящего времени переменность длин волн диффузных полос наблюдалась в трех вариантах:

- голубой сдвиг диффузных полос. Эффект наблюдался в направлении HD 34078 и звезд ассоциации Sco OB1 (Galazutdinov et al., 2006, 2008, 2015);
- красный сдвиг диффузных полос (Krełowski et al., 2015). Смещение положения диффузных полос 4502, 5705, 5780, 6284 и 7224 Å в красную часть спектра относительно хорошо известных узких межзвездных линий атомов/молекул

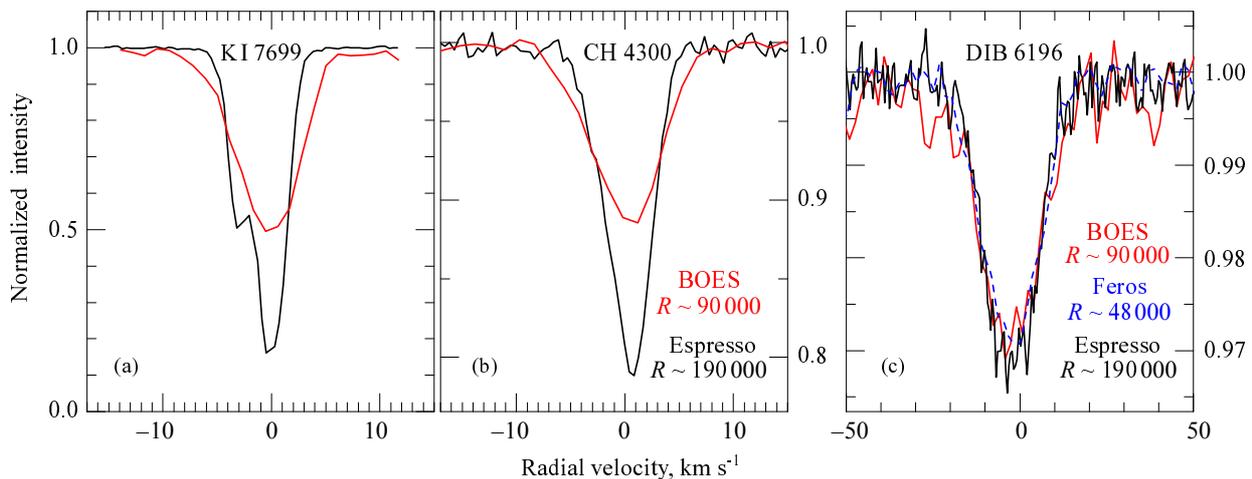


Рис. 2. Сравнение профилей межзвездных линий в спектре HD 23180, полученных на разных инструментах с разным спектральным разрешением. Видно, что профиль самой узкой известной диффузной полосы DIB 6196 (с) в целом мало изменяется с увеличением спектрального разрешения. Незначительная переменность не препятствуют уверенному нахождению центра в нижней (симметричной) части профиля.

наблюдалось в спектрах двух звезд Тrapeции Ориона;

- расширение диффузных межзвездных полос. В работе Kęłowski et al. (2021) мы сообщили о случаях сильной переменности ширины профилей (в некоторых объектах ширина вдвое больше «обычной»). Расширение профилей изученных DIB смещает центр профиля в красную область спектра. Возможно, это происходит вследствие увеличения населенности все более высоких уровней полосы Р неизвестного молекулярного носителя. В частности, профили диффузных полос шире в облаках с большей населенностью более высоких уровней молекулы водорода — ширина DIB коррелирует с вращательной температурой колебательного уровня $\nu = 2$ молекулы H_2 .

В данной статье мы делаем еще один шаг к выявлению свойств DIB, знание которых необходимо для отождествления носителей. С помощью «межзвездной» шкалы длин волн, основанной на самой узкой известной диффузной полосе 6196, мы исследуем диффузные полосы 6284 и 7224 Å, а также «главные» полосы 5780 и 5797 Å, используемые для разделения межзвездных облаков на σ - и ζ -типы¹. Также мы классифицируем диффузные полосы с помощью «эффективной шири-

¹Объекты, называемые σ -облаками (по названию архетипа σ Скорпиона), характеризуются более низким соотношением интенсивностей DIB 5797/5780. И наоборот, в ζ -облаках (архетип ζ Змееносца) соотношение интенсивностей этих DIB высокое (Kęłowski and Westerlund, 1988). Кроме этого, в облаках типа ζ наблюдаются сильные линии поглощения межзвездных молекул, таких как CH, CH⁺, CN, C₂, C₃ и т. д., тогда как последние слабы

ны» — параметра, впервые предложенного нами в 2008 году (Galazutdinov et al., 2008). Ниже приведены результаты исследования переменности вышеуказанных DIB с помощью этого нового подхода.

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Наблюдательные данные (таблица 1) были получены с помощью нескольких эшелле-спектрографов высокого разрешения, таких как:

- UVES (Ultraviolet and Visual Echelle Spectrograph; Dekker et al., 2000), установленный на 8-м телескопе Kueyen VLT в обсерватории Paranal ESO (Чили). Спектральное разрешение достигает $R \equiv \lambda/\Delta\lambda = 80\,000$ в голубой области спектра и $R = 110\,000$ в красной. Размер телескопа позволяет получать высокое S/N даже для относительно слабых звезд. Спектры UVES были получены в рамках наблюдательных программ EDIBLES (ESO Diffuse Interstellar Bands Large Exploration Survey) и нашей собственной программы (Siebenmorgen et al., 2020). Для последней есть онлайн-доступ².
- FEROS (Fiber-fed Extended Range Optical Spectrograph; Kaufer et al., 1999) — спектрограф обсерватории La Silla ESO (Чили), с помощью которого наблюдались некоторые звезды южного неба. Спектры FEROS имеют спектральное разрешение $R = 48\,000$ и разделены на 37 порядков в диапазоне длин волн

или отсутствуют в облаках типа σ (во многих случаях ниже уровня обнаружения).

²<https://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?source=J/A+A/641/A35>

примерно 3700–9200 Å, получаемом за одну экспозицию.

- ESPaDOnS³ (Echelle SpectroPolarimetric Device for the Observation of Stars) — эшелле-спектрограф-поляриметр высокого разрешения, установленный на 3.58-м телескопе CFHT (Canada-France-Hawaii telescope) в обсерватории на горе Мауна Кеа (Гавайские острова, США). Прибор позволяет получить спектр в диапазоне от 3700 до 10 050 Å, разделенный на 40 порядков, со спектральным разрешением $R \approx 68\,000$.
- Спектрограф MIKE (Magellan Inamori Kyocera Echelle; Bernstein et al., 2003), который установлен на 6.5-м телескопе Magellan/Clay в обсерватории Las Campanas (Чили). При ширине щели $0''.35 \times 5''$ спектральное разрешение составляет $R \approx 56\,000$ в голубой части спектра (3600–5000 Å) и примерно 77 000 в красной (4800–9400 Å).
- BOES (Bohуunsan Echelle Spectrograph; Kim et al., 2007), установленный на 1.8-м телескопе Национальной обсерватории Bohуunsan республики Корея. Спектрограф предоставляет три варианта наблюдений с различным спектральным разрешением R : 30 000, 45 000 и 90 000. В любом из этих вариантов спектрограф обеспечивает получение спектра, разделенного на 75–76 порядков в диапазоне длин волн приблизительно 3500–10 000 Å.
- ESPRESSO⁴ (Echelle Spectrograph for Rocky Exoplanets and Stable Spectroscopic Observations; Pepe et al., 2014) — высокостабилизированный оптоволоконный спектрограф, который может получать свет как от всех 8-м телескопов обсерватории VLT, так и от одного из этих зеркал, установленных в обсерватории Paranal ESO (Чили). Спектрограф оснащен двумя оптоволоконными входами: один для объекта исследования, второй для спектра сравнения. Для регистрации спектра используются две ПЗС-мозаики — для голубой части спектра (3800–5250 Å) и для красной (5250–7880 Å). Доступно три варианта спектрального разрешения: 190 000, 140 000 и 70 000. В любом из них регистрируется весь спектр в указанном выше диапазоне.

Обработка спектральных изображений, анализ и измерения экстрагированных спектров выполнялись с помощью пакета программ DECH (Galazutdinov, 2022). Обработка включала все

стандартные этапы: вычитание усредненного изображения bias, учет плоского поля, экстракция спектров из изображений с вычитанием рассеянного света и т.д. Рассеянный свет определялся как двумерная функция сложной формы, которая рассчитывалась для каждого спектрального изображения с помощью двумерной аппроксимации межпорядковых минимумов кубическим сплайном. Вариации чувствительности пикселей матрицы ПЗС исправлялись путем деления спектров объектов исследования на усредненный спектр плоского поля. Экстракция спектров выполнялась суммированием сигнала в направлении кросс-дисперсии по всей ширине спектрального порядка с учетом наклона щели (при необходимости). Извлеченные спектры одного и того же объекта, наблюдавшегося в одну и ту же ночь, усреднялись для достижения максимального S/N . Нормализация на континуум выполнялась интерактивно или автоматически путем аппроксимации опорных точек кубическим сплайном.

Шкала длин волн строилась методом аппроксимации реперных точек двумерным полиномом вида

$$\lambda(x, m) = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^n a_{ij} x^i m^j,$$

где a_{ij} — коэффициенты полинома; x — номер пикселя в спектральном порядке m . Аппроксимирующая функция строится по выборке из 1000–1500 линий тория в спектре торий-аргоновой лампы. Ошибка аппроксимации в среднем не превышает 0.003 Å. Коррекция длин волн в «межзвездную» шкалу выполнялось с помощью самой узкой известной диффузной полосы 6195.97 Å (Galazutdinov et al., 2000).

Программный пакет DECH позволяет измерять эквивалентную ширину, $FWHM$ и т.д. Центр масс линии (gC) в нормализованном на континуум спектре S_λ измерялся как:

$$gC = \frac{\sum_{\lambda=\lambda_1}^{\lambda_2} (1 - S_\lambda)\lambda}{\sum_{\lambda=\lambda_1}^{\lambda_2} (1 - S_\lambda)}.$$

На рис. 1 показаны положение «каталожной» длины волны покоя диффузной межзвездной полосы 5797 Å (из Galazutdinov et al., 2000) и центр масс этой совершенно асимметричной особенности.

Анализируемые спектры получены с помощью спектрографов с разной разрешающей способностью, иногда недостаточной для изучения профилей очень узких атомных или молекулярных межзвездных линий и субструктур профилей диффузных полос, но вполне достаточной для измерения центра

³<https://www.cfht.hawaii.edu/Instruments/Spectroscopy/Espadons/>

⁴<https://www.eso.org/sci/facilities/paranal/instruments/espresso.html>

масс, интенсивности (глубины) и эквивалентной ширины диффузных полос (рис. 2).

Профили диффузных полос 6284 и 7224 Å существенно загрязнены теллурическими линиями. Для их очистки мы использовали так называемые «дивайзеры» — спектры быстро вращающихся горячих звезд, свободные от межзвездного покраснения. На рис. 3 приводится пример очистки от теллурических линий спектра звезды HD 185859, для удаления которых использовался спектр Спика.

DIB 6284 — одна из самых широких и сильных известных диффузных полос — имеет профиль сложной формы и блендирована теллурическими и другими межзвездными линиями. Мы измерили эквивалентную ширину этой полосы, используя профиль, интерактивно построенный по интерактивно указанным точкам (рис. 3). По интенсивности (глубине) этого профиля рассчитывалась эффективная ширина W_{eff} , которая представляет собой отношение эквивалентной ширины линии к ее центральной глубине. Процедура построения такого профиля и измерений реализована в программном пакете DECH (Galazutdinov, 2022). Ширина профиля DIB 7224 существенно меньше, чем ширина DIB 6284, но эта диффузная полоса также блендирована теллурическими линиями. Для анализа DIB 7224 мы использовали аналогичный метод измерений W_{eff} и эквивалентной ширины, что позволило уменьшить влияние статистического шума на точность измерений.

Таким образом, мы предлагаем новый подход к следующим методам:

- a) методу конверсии шкалы длин волн в «межзвездную» систему;
- b) методу оценки длины волны покоя диффузных межзвездных полос;
- c) методу оценки ширины диффузных полос.

Необходимость таких нововведений основана на следующих наблюдательных фактах:

- корреляция эквивалентной ширины диффузных полос с эквивалентной шириной полосы 6196 Å выше, чем с эквивалентной шириной линий K I λ 7769 и CN λ 4300 (последние обычно используются для построения «межзвездной» шкалы длин волн). Более высокая корреляция, наблюдаемая в первом случае, означает, что носители диффузных полос локализируются в примерно совпадающих объемах межзвездных облаков, тогда как атомный газ K и молекулярный CN расположены вне (как минимум частично) этих объемов. Таким образом, DIB 6196 является более надежной опорной линией для построения «межзвездной» шкалы длин волн. Необходимо отметить, что лучше — не значит идеально. Очевидно, вряд ли следует ожидать,

что все носители диффузных полос локализованы в совершенно совпадающих объемах облаков;

- во всех опубликованных обзорах диффузных полос длина волны покоя этих спектральных особенностей оценивается эмпирически по произвольным образом выбранной части профиля. Обычно выбирают область ближе к ядру, в относительно симметричной его части. Почти все диффузные полосы имеют профиль сложной формы (асимметричны), что делает процедуру определения длины волны покоя субъективной. Здесь мы предлагаем оценивать положение диффузной полосы (ее эффективный центр) по центру масс профиля. Этот подход является объективным, обеспечивает однозначную оценку длины волны, а также позволяет численным образом оценить переменность профиля диффузной полосы от объекта к объекту;
- ширина диффузных полос меняется от объекта к объекту, но ее нельзя корректно измерить с помощью *FWHM* из-за асимметричной формы профилей. В частности, переменность может иметь место только в верхней части (крыльях) профиля, как это происходит в случае DIB 6196. Предлагаемый нами параметр («эффективная ширина»), представляющий собой отношение эквивалентной ширины (в мÅ) профиля к ее глубине (интенсивности), свободен от недостатков *FWHM*.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Как показано в работе Galazutdinov et al. (2015), галактические орбиты облаков круговые, то есть термализованные, вероятно, по причине столкновений этих геометрически очень крупных объектов (см. Gnaniński and Młynik, 2017). Такие столкновения приводят к перемешиванию вещества. Поэтому глобальный химический состав между отдельными облаками не должен сильно различаться, по крайней мере на одинаковых расстояниях от центра галактики.

либо:

"Поэтому по глобальному химическому составу отдельные облака не должны сильно отличаться друг от друга, по крайней мере на одинаковых расстояниях от центра галактики. Отдельные облака наблюдаются по совпадающим на шкале лучевых скоростей спектральным линиям межзвездного происхождения. Отношение интенсивностей спектральных линий/полос неодинаково для облаков даже одного типа (например, полупрозрачных). Это является следствием различных физических условий и химического состава в межзвездных облаках, в том числе с очень близкими значениями

Таблица 1. Основные параметры звезд программы и результаты измерений: эффективная длина волны λ_{gc} (центр масс профиля), эффективная ширина W_{eff} , эквивалентная ширина (mÅ). Последняя буква в имени звезды обозначает происхождение спектра: b — BOES, e — ESPADONS, s — Espresso, f — FEROS, m — MIKE, u — UVES

HD	Sp/L	V , mag	E_{B-V} , mag	EW_{6284} , mÅ	λ_{gC}^{6284} , Å	W_{eff}^{6284} , km s ⁻¹	EW_{7224} , mÅ	λ_{gC}^{7224} , Å	W_{eff}^{7224} , km s ⁻¹	EW_{4300} , mÅ	EW_{7699} , mÅ	EW_{5780} , mÅ	λ_{gC}^{5780} , Å	W_{eff}^{5780} , km s ⁻¹	EW_{5797} , mÅ	λ_{gC}^{5797} , Å	W_{eff}^{5797} , km s ⁻¹
22951u	B0.5 V	4.97	0.26±0.03	330±50	6283.66±0.01	264±39	48±3	7224.11±0.02	47±3	8.3±0.8	50.6±3.0	101±10	5780.70	114±11	23±3	5797.10	37±4
23180b	B1 III	3.86	0.29±0.03	162±21	6283.77±0.05	254±65	29±3	7223.98±0.02	43±3	15.6±1.6	98.5±2.5	87±5	5780.52	107±7	66±2	5797.21	43±1
24263u	B3.5 V	5.77	0.21±0.06	355±65	6283.72±0.02	219±40	57±4	7224.12±0.01	44±3	7.4±1.0	87.6±1.5	160±19	5780.56	113±13	50±7	5797.10	45±6
24398bh	B1 Ib	2.85	0.34±0.03	165±40	6283.78±0.03	210±50	36±4	7224.06±0.02	47±5	16.8±1.2	70.6±2.7	110±6	5780.57	116±7	53±5	5797.11	36±4
30492u	B9.5 V	9.02	0.40±0.04	375±20	6283.77±0.01	192±10	57±2	7224.09±0.01	39±2	13.0±1.2	105.3±2.5	251±11	5780.50	115±5	88±7	5797.13	43±4
34078m	O9.5 V	5.96	0.52±0.04	400±20	6283.57±0.02	233±12	73±3	7223.99±0.02	49±2	47.2±0.6	171.8±1.9	188±7	5780.75	117±5	61±4	5797.33	53±4
37020me	B0 V	6.73	0.30±0.03	185±14	6284.01±0.02	196±15	27±3	7224.43±0.01	62±7	<0.3	4.9±1.3	43±5	5780.86	126±15	—	—	—
37021e	B1 V	7.96	0.50±0.05	115±10	6284.26±0.01	177±15	40±7	7224.43±0.02	85±8	<0.6	5.9±0.4	73±5	5781.24	140±10	—	—	—
37022emh	O8 V	5.13	0.34±0.04	360±30	6284.50±0.01	235±20	30±4	7224.34±0.01	57±7	0.7±0.1	6.4±0.8	63±3	5781.02	131±6	—	—	—
37023e	B1.5 V	6.70	0.34±0.04	410±20	6283.99±0.02	241±12	31±2	7224.42±0.01	61±4	0.7±0.2	6.3±0.8	63±5	5780.93	140±11	—	—	—
37041u	O8 V	6.30	0.21±0.03	74±30	6284.26±0.02	166±34	13±8	7223.88±0.1	39±9	<0.4	5.8±1.0	44±6	5780.79	120±16	5±3	5797.07	41±18
37061e	O9 V	6.83	0.56±0.04	575±20	6283.99±0.05	260±10	60±3	7224.50±0.01	75±4	1.6±0.2	13.5±0.5	178±5	5781.03	126±3	13±2	5797.29	51±8
104565u	O9.7 II	9.25	0.60±0.06	870±60	6283.88±0.03	243±17	145±10	7224.07±0.01	55±4	9.0±1.0	121.0±2.2	410±30	5780.76	125±9	117±11	5797.26	55±5
110432u	B0.5 IV	5.31	0.54±0.04	310±20	6283.44±0.10	195±13	64±3	7224.07±0.01	44±2	12.6±0.4	79.2±1.6	128±5	5780.58	101±4	38±2	5797.12	39±2
110715u	B9 V	8.65	0.45±0.03	230±30	6283.60±0.01	196±26	62±5	7224.08±0.01	39±3	23.2±1.7	114.1±1.6	130±12	5780.41	102±10	50±6	5797.15	40±5
133518u	B2 IV	6.39	0.14±0.03	100±30	6284.42±0.20	160±47	35±3	7223.98±0.01	52±4	0.9±0.4	9.6±0.6	67±5	5780.67	109±8	8±2	5797.06	39±10
143275ub	B0.3 IV	2.32	0.22±0.03	210±20	6283.62±0.10	228±22	65±7	7224.29±0.01	68±7	2.2±0.7	25.9±0.7	74±5	5780.60	104±7	14±4	5797.18	41±12
144217ub	B1 V	2.62	0.19±0.02	335±20	6284.07±0.10	232±14	55±5	7223.97±0.01	55±5	1.5±0.7	20.0±2.0	159±5	5780.62	110±3	17±2	5797.15	42±5
144470ub	B1 V	3.97	0.21±0.03	365±70	6284.20±0.01	223±42	60±5	7224.03±0.01	60±5	2.8±0.7	23.1±2.0	176±12	5780.61	112±8	25±5	5797.10	42±9
145502m	B2 V	4.00	0.29±0.02	320±20	6283.87±0.05	214±13	85±6	7223.98±0.01	54±4	3.6±0.1	33.5±1.3	173±3	5780.63	114±2	34±2	5797.18	45±2
147165u	B1 III	2.89	0.41±0.03	395±30	6283.97±0.01	222±17	63±4	7224.12±0.01	50±3	2.6±0.5	20.9±1.5	241±10	5780.67	114±4	31±3	5797.11	42±4

Таблица 1. (Продолжение)

HD	Sp/L	V , mag	E_{B-V} , mag	EW_{6284} , mÅ	$\lambda_{\text{gC}}^{6284}$, Å	W_{eff}^{6284} , km s ⁻¹	EW_{7224} , mÅ	$\lambda_{\text{gC}}^{7224}$, Å	W_{eff}^{7224} , km s ⁻¹	EW_{4300} , mÅ	EW_{7699} , mÅ	EW_{5780} , mÅ	$\lambda_{\text{gC}}^{5780}$, Å	W_{eff}^{5780} , km s ⁻¹	EW_{5797} , mÅ	$\lambda_{\text{gC}}^{5797}$, Å	W_{eff}^{5797} , km s ⁻¹
147888uf	B3 V	6.74	0.48±0.05	310±10	6283.85±0.02	231±10	58±3	7224.13±0.02	59±3	16.1±0.3	89.3±1.1	236±15	5780.73	112±7	52±8	5797.19	43±6
147889uf	B2.5 V	7.90	1.06±0.03	455±20	6284.39±0.05	236±11	55±5	7224.45±0.1	58±5	49.6±0.6	79.7±0.9	377±9	5780.80	123±3	151±4	5797.24	47±2
147932f	B5 V	7.27	0.49±0.03	355±28	6283.76±0.02	239±20	56±6	7224.31±0.01	54±6	15.7±0.8	82.4±3.4	215±12	5780.71	116±7	53±6	5797.17	42±5
147933e	B1 V	5.05	0.47±0.03	360±20	6283.38±0.02	249±15	50±3	7224.17±0.01	53±3	18.0±0.6	89.5±0.9	204±7	5780.70	115±4	50±4	5797.24	47±4
148184ue	B2V	4.43	0.52±0.04	170±30	6283.35±0.02	176±30	27±2	7223.97±0.01	37±3	23.6±0.8	70.1±0.9	99±7	5780.62	112±8	51±4	5797.27	47±4
148579u	B8 V	7.32	0.35±0.03	210±20	6283.40±0.05	204±19	37±6	7224.16±0.02	59±10	12.9±0.8	50.0±0.9	127±15	5780.62	111±13	57±4	5797.20	48±4
148605uf	B3 V	4.79	0.13±0.02	110±14	6284.60±0.05	262±30	14±6	7224.08±0.1	44±11	0.6±0.3	6.5±0.5	41±11	5780.78	113±30	6±3	5797.16	49±24
149757e	O9.2IV	2.56	0.31±0.03	114±8	6283.56±0.01	180±13	25±3	7224.05±0.01	41±5	18.0±0.3	63.2±0.7	72±6	5780.56	113±10	33±3	5797.18	46±4
152076f	B0/1 III	8.90	0.49±0.03	430±50	6284.00±0.02	218±25	70±5	7224.05±0.02	47±3	20.7±1.9	151.3±4.9	182±10	5780.62	108±6	67±3	5797.22	44±2
152218uf	O9 V	7.57	0.51±0.04	400±40	6283.95±0.03	233±23	71±4	7224.11±0.02	47±2	16.9±1.7	118.9±1.7	183±5	5780.60	110±3	60±5	5797.25	47±4
152233mf	O6 II(f)	6.59	0.45±0.03	410±20	6283.91±0.04	222±11	57±3	7224.01±0.01	45±2	12.9±0.6	120.8±2.4	215±3	5780.56	114±2	60±3	5797.16	47±3
152249uf	O9.5 Iab	6.45	0.43±0.03	520±20	6283.74±0.02	216±10	82±2	7223.97±0.01	43±1	4.7±0.3	98.1±3.9	249±6	5780.61	119±3	53±3	5797.13	45±2
154445u	B1 IV	5.61	0.38±0.03	352±20	6284.08±0.02	218±12	70±3	7224.07±0.01	41±2	15.1±0.4	47.0±0.9	197±9	5780.59	107±5	69±4	5797.23	47±3
163800u	O7.5 III	7.00	0.58±0.03	482±15	6283.84±0.02	219±7	85±5	7223.96±0.03	45±2	23.0±1.1	87.8±1.5	247±10	5780.62	110±5	105±5	5797.13	41±2
164906u	B1 IV	7.38	0.43±0.11	350±20	6283.79±0.05	201±11	73±3	7223.99±0.02	46±2	8.1±1.2	60.8±2.4	158±5	5780.60	111±3	67±4	5797.15	38±3
170740u	B2 V	5.72	0.47±0.03	500±20	6283.77±0.20	232±9	93±4	7224.12±0.02	42±2	15.9±0.4	76.3±1.1	250±14	5780.63	114±6	70±6	5797.13	41±4
179406us	B2.5 II	5.34	0.34±0.03	280±20	6284.08±0.05	223±16	68±4	7224.01±0.01	40±2	15.1±0.8	111.1±4.2	158±8	5780.58	106±6	75±4	5797.19	41±2
184915ub	B0.5 III	4.96	0.24±0.04	220±20	6283.78±0.05	172±16	67±4	7224.05±0.02	40±2	5.3±0.4	26.8±0.7	150±7	5780.57	105±5	26±7	5797.10	38±11
185859ub	B0 Iab	6.59	0.60±0.06	370±30	6283.99±0.05	188±15	105±3	7224.00±0.02	40±1	19.2±0.6	127.7±2.6	295±10	5780.57	111±3	177±6	5797.16	39±1
210121ub	B3.5 V	7.68	0.31±0.07	61±20	6284.33±0.20	165±47	21±5	7224.25±0.05	46±6	21.1±0.6	102.0±2.0	63±15	5780.69	117±27	34±5	5797.19	47±7

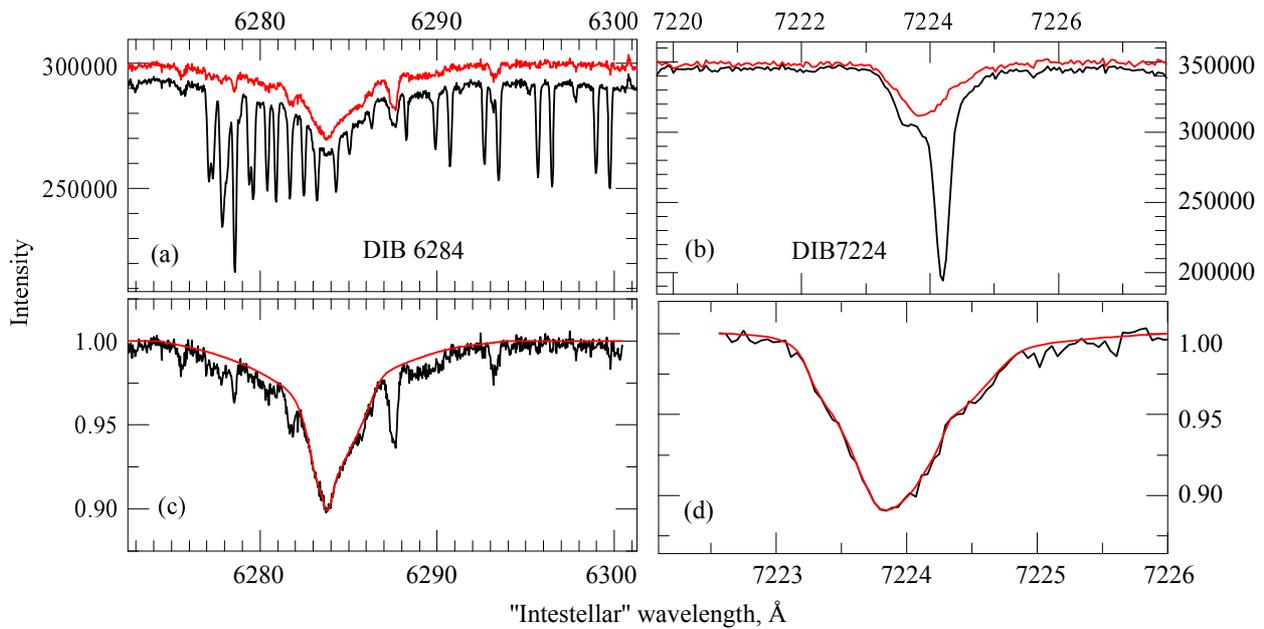


Рис. 3. Профили диффузных полос 6284 Å (панели (a) и (c)) и 7224 Å (панели (b) и (d)) в спектрах звезды HD 185859, полученных на оптоволоконном спектрографе BOES. Панель (a) — оригинальный спектр широкой диффузной полосы 6284 Å (черный) и он же после удаления теллурических линий (красный). Панель (b) — оригинальный спектр в области DIB 7224 (черный) и он же после удаления теллурических линий (красный). Панель (c) — DIB 6284 имеет профиль сложной формы; диффузная полоса блендирована линиями звездного и межзвездного происхождения (черный); Для измерений использовался интерактивно построенный в программе DECH профиль (красный). Панель (d) — очищенный от теллурических линий профиль DIB 7224 (черный) с интерактивно построенным профилем (красный).

плотности и массы. Наблюдаемые различия физических условий накладывают ограничения на теоретические модели таких облаков. Подчеркнем, что физические условия внутри межзвездных облаков зависят не только от их плотности и массы, но и от излучения близлежащих горячих звезд.

В отобранных нами объектах межзвездные атомные/молекулярные линии не показывают явного доплеровского расщепления на компоненты сопоставимой интенсивности, поэтому профили наблюдаемых DIB, скорее всего, определяются физическими параметрами только одного облака. Это имеет принципиальное значение, поскольку каждая сильная диффузная полоса имеет собственный носитель — соотношение интенсивности разных DIB переменено от объекта к объекту. Скорректировав шкалу длин волн спектра в положение, соответствующее длине волны покоя известных межзвездных атомных/молекулярных линий, можно измерить длину волны диффузных полос, носители которых неизвестны. Профили диффузных полос во многих случаях имеют сложную, переменную от объекта к объекту форму (субструктуры), зависящую от физических условий в межзвездных облаках.

Для коррекции шкалы длин в «межзвездную» обычно используются либо сильная линия межзвездного калия K I λ 7699, либо относительно

сильная линия межзвездной молекулы CN λ 4300. Обе эти линии показывают высокую степень корреляции их эквивалентной ширины с эквивалентными ширинами диффузных полос. Анализ двух «главных» диффузных полос — DIB 5780 и DIB 5797 — показывает, что эквивалентная ширина «узкой» диффузной полосы 5797 Å демонстрирует хорошую корреляцию как с K I, так и с CN, в то время как «широкая» полоса 5780 Å слабо коррелирует с CN и умеренно с калием. Однако обе «главные» полосы демонстрируют очень высокую корреляцию с самой узкой из известных диффузных полос 6196 Å (рис. 4). Аналогичная ситуация с очень широкой DIB 6284 и узкой DIB 7224 с весьма симметричным профилем (рис. 5).

Таким образом, DIB 6196 является более предпочтительной опорной линией для построения «межзвездной» шкалы длин волн. Носитель диффузной полосы 6196 Å неизвестен, а длина волны этой особенности определена эмпирически и может отличаться от объекта к объекту, то есть может быть переменной. Однако в работе Krelowski et al. (2021) мы показали, что переменность профиля DIB 6196 происходит преимущественно в его красном крыле, то есть в верхней части профиля, тогда как ядро профиля остается практически

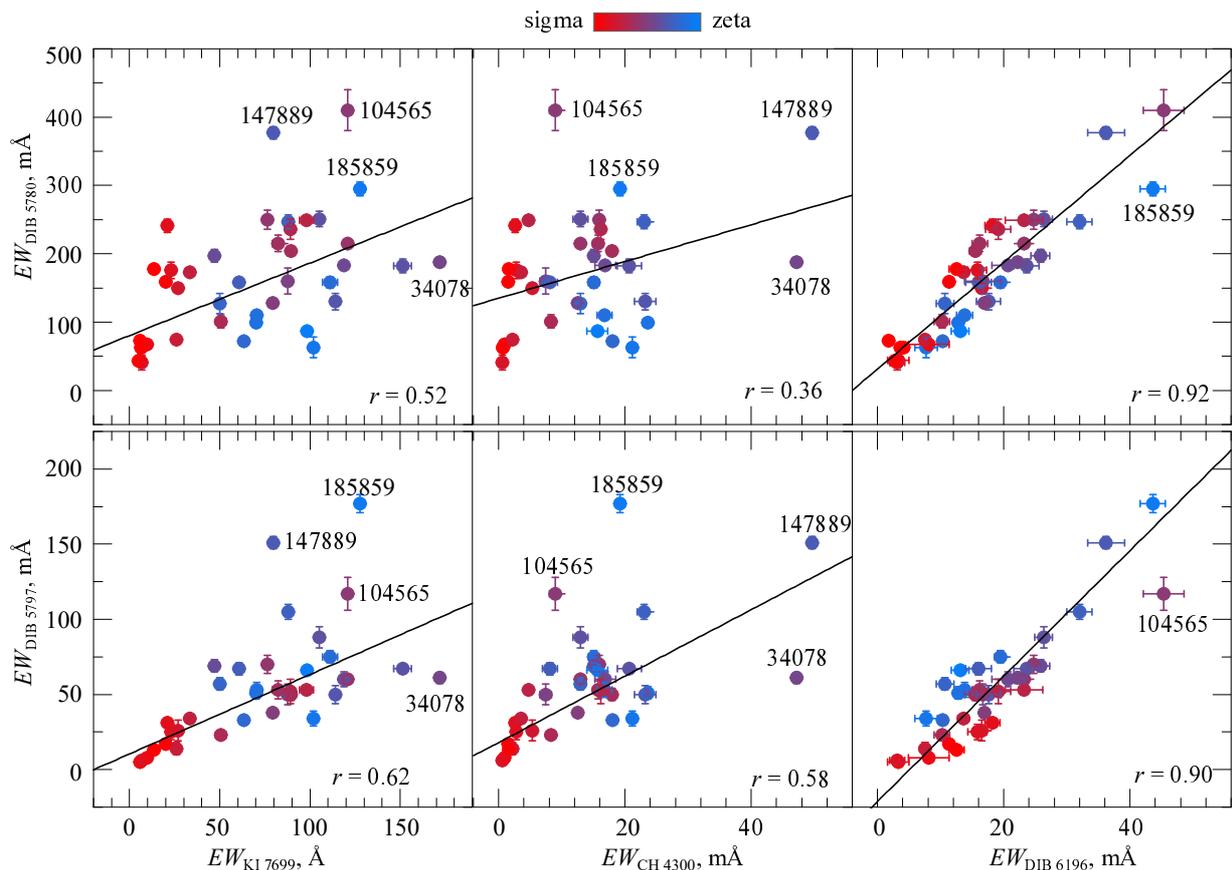


Рис. 4. Корреляция эквивалентных ширин «главных» DIB (5797 и 5780) с эквивалентными ширинами межзвездных CN 4300 Å, KI и DIB 6196. Коэффициент корреляции Пирсона указан на каждом из рисунков. Шкала цветов показывает соотношение эквивалентной ширины «главных» диффузных полос 5797/5780, то есть синий цвет соответствуют ζ-облакам, а красный — σ-облакам.

нетронутым. Почти идеально симметричная нижняя часть профиля DIB 6196 позволяет однозначно определить нуль-пункт «межзвездной» шкалы длин волн. На рис. 6 показаны профили DIB 6196 с разными эффективными ширинами, но с почти совпадающей нижней частью профиля (таблица 1). Длина волны DIB 6196 (определяемая как середина полной ширины на полувысоте профиля) в спектрах звезд, изученных Krelowski et al. (2021) (кроме объектов Sco OB1, где диффузные полосы 6196 Å смещены относительно межзвездного калия), лежит в узком диапазоне (6195.9–6196.04 Å) со средним значением 6195.96 ± 0.01 Å, что совпадает с «каталожной» длиной волны 6195.97 Å из нашего обзора Galazutdinov et al. (2000). Преимущество DIB 6196 как эталона для построения «межзвездной» шкалы длин волн подтверждается на графиках, сравнивающих эффективную длину волны диффузной полосы с эффективной шириной W_{eff} (рис. 8). В работе Krelowski et al. (2021) было показано, что DIB 6196 смещен в синюю часть спектра в звездах из ассоциации Sco OB1

и в случае «убегающей» звезды HD 34078 (см. рис. 2, Krelowski et al., 2021). Причиной такого смещения является нуль-пункт «межзвездной» шкалы длин волн, использованный Krelowski et al. (2021), а именно межзвездная линия K 7699 Å. В случае объектов Sco OB1 и «убегающей» звезды HD 34078 локализация носителей диффузных полос и атомарного газа в облаке не совпадает — см. пример на рис. 7, где показано, что в спектре одного из таких объектов центры профилей DIB и нейтрального калия различаются приблизительно на 7 km s^{-1} . Очевидно, носители разных диффузных полос локализуются примерно в одном и том же объеме облака, в отличие от других компонентов МЗС, таких как пыль, межзвездный калий, молекулы CN и т. д.

С увеличением спектрального разрешения в профилях атомных и/или молекулярных линий можно обнаружить больше доплеровских компонент; в диффузных полосах это становится сделать сложнее (из-за их большой ширины), а в случае кривых экстинкции или поляризации —

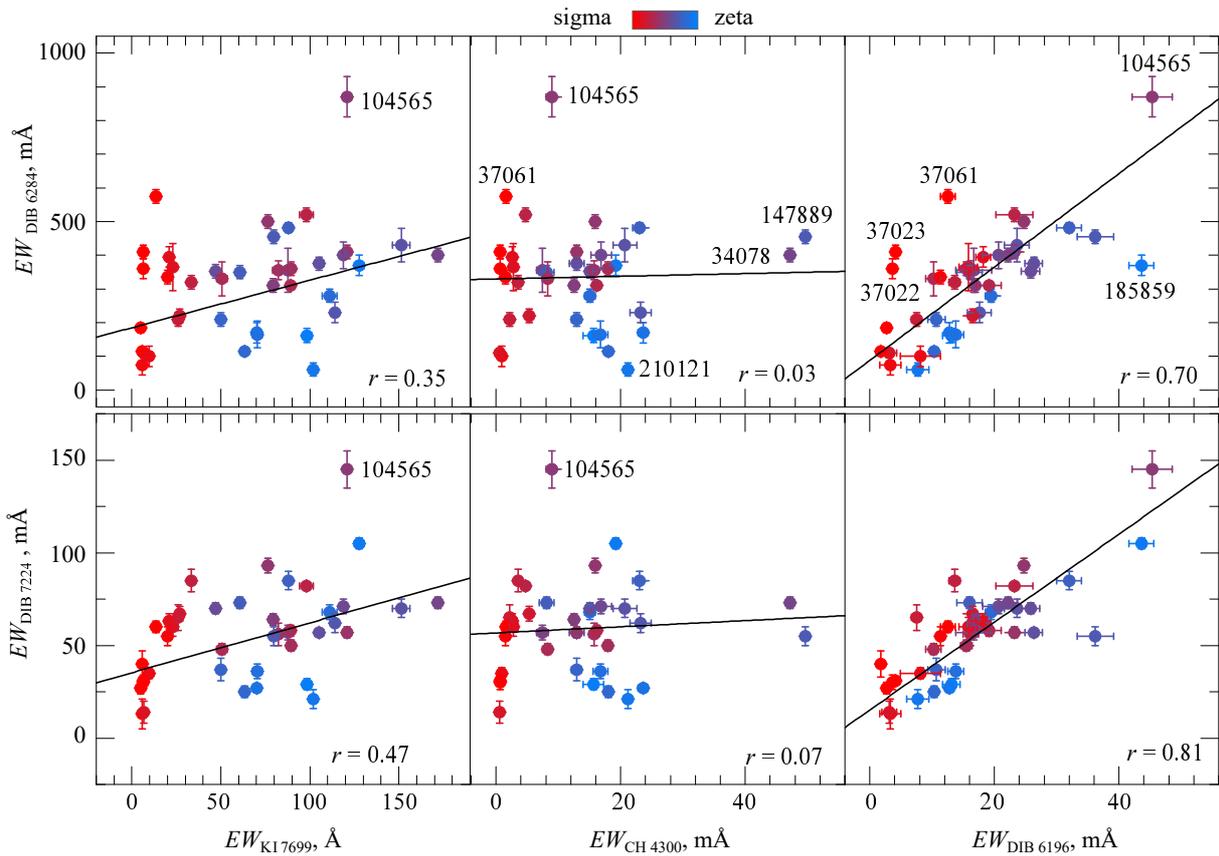


Рис. 5. То же, что на рис. 4, но для диффузных полос 6284 и 7224 Å.

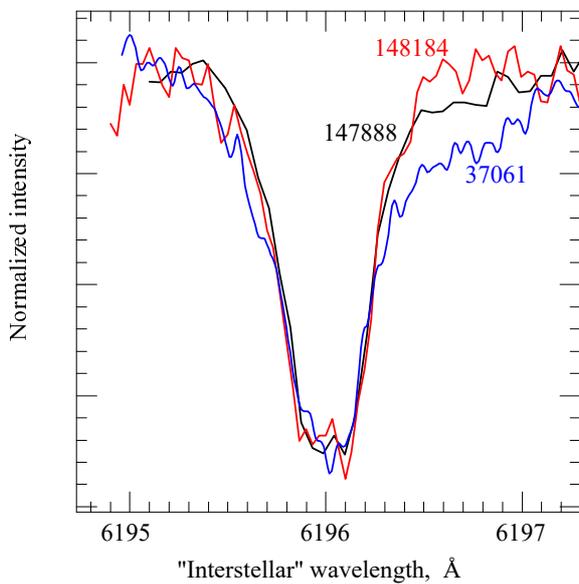


Рис. 6. Вариации эффективной ширины W_{eff} диффузной полосы 6196 Å. Профили нормализованы на одинаковую глубину для наглядности. Видно, что переменность профиля в основном происходит в красном крыле, тогда как нижняя часть профиля не показывает заметных изменений. Симметричная нижняя часть позволяет однозначно определить центр (сердину) этой части профиля.

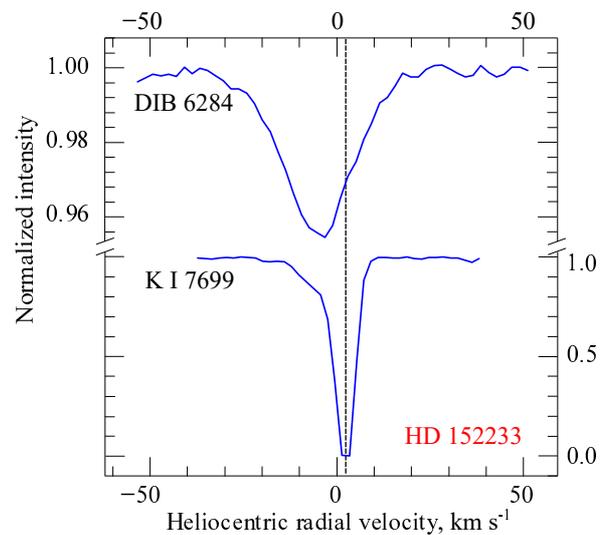


Рис. 7. Различная лучевая скорость межзвездных линий в спектре звезды HD 152233, принадлежащей ассоциации Sco OB1.

невозможно. К сожалению, количество объектов, изученных с помощью спектров высокого разрешения ($R \geq 100\,000$), весьма ограничено. С другой стороны, хотя даже $R \approx 90\,000$ может быть недостаточно для получения истинных профилей

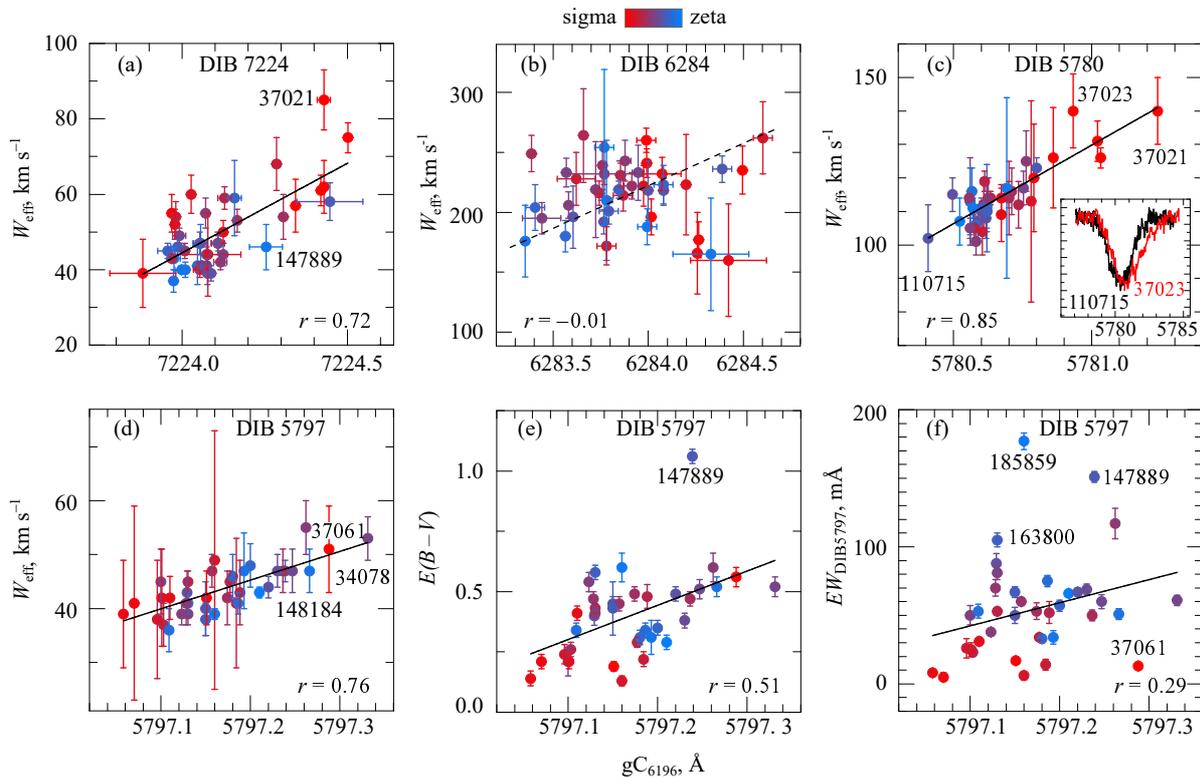


Рис. 8. Панели (a, b, c, d) — сравнение эффективной ширины (W_{eff}) с центром масс (gC) для выборки диффузных полос. «Межзвездная» шкала длин волн основана на DIB 6195.97 Å. На панели (b) пунктирная линия показывает линейную аппроксимацию без учета группы из четырех точек (в левом нижнем углу панели) с высоким уровнем неопределенности; на панели (c) во врезке показано сравнение профилей диффузной полосы 5780 двух объектов — видно как уширение одного из профилей, так и смещение одного из них в красную часть спектра; на панели (e) представлена зависимость центра масс диффузной полосы 5797 Å от межзвездного покраснения E_{B-V} ; на панели (f) — зависимость центра масс диффузной полосы 5797 Å от эквивалентной ширины. Цвет символа показывает отношение эквивалентных ширины (5797/5780). Синий цвет — ζ -облака, красный — σ -облака.

атомных/молекулярных межзвездных линий и для изучения субструктур в профилях диффузных полос, разрешающая способность $R \approx 48\,000$ позволяет определить истинную ширину самой узкой из известных диффузных полос 6196 Å. Использование DIB 6196 в качестве эталона для преобразования шкалы длин волн в «межзвездную» систему отсчета является возможным благодаря наблюдаемой симметрии профиля в нижней части этой диффузной полосы. Детальный анализ графиков на рис. 8 позволяет сделать некоторые предварительные выводы:

- существует хорошая корреляция между центром масс и шириной (W_{eff}) DIB 7224, DIB 5780 и DIB 5797 (рис. 8a, c, d). Та же корреляция для DIB 6284 формально невысока, но это может быть из-за влияния нескольких объектов с неточными измерениями (рис. 8b);
- с увеличением ширины W_{eff} центр масс профиля перемещается в красную сторону, то есть диффузная полоса расширяется в красную сторону. Предполагая молекулярное происхождение

диффузных полос, можно считать, что более широкие профили образуются дополнительными переходами P-ветви;

- обнаружена умеренная корреляция центра масс DIB 5797 с покраснением ($r = 0.51$, рис. 8e) и его низкая корреляция с эквивалентной шириной ($r = 0.29$, рис. 8f). Стоит отметить низкую корреляцию эффективной ширины W_{eff} DIB 5797 как с покраснением E_{B-V} , так и с эквивалентной шириной этой диффузной полосы — коэффициенты корреляции равны 0.29 и 0.11 соответственно (не показаны). Аналогичная ситуация и для других DIB (не показаны);
- ширина DIB 5780 в σ -облаках выше, и это не связано с интенсивностью данной диффузной полосы: эквивалентные ширины DIB 5780 в объектах Тrapeции Ориона невелики, тогда как эффективная ширина W_{eff} самая большая в выборке.

DIB 6284 — одна из самых широких диффузных полос. Профиль DIB 6284 сильно загрязнен теллурическими линиями, что может приводить к

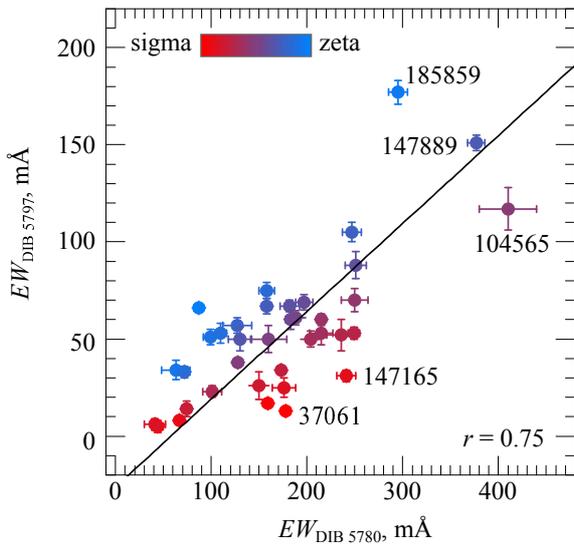


Рис. 9. Сравнение эквивалентных ширин «главных» диффузных межзвездных полос. Показана высокая степень корреляции DIB 5797 и 5780, имеющих заведомо разное происхождение.

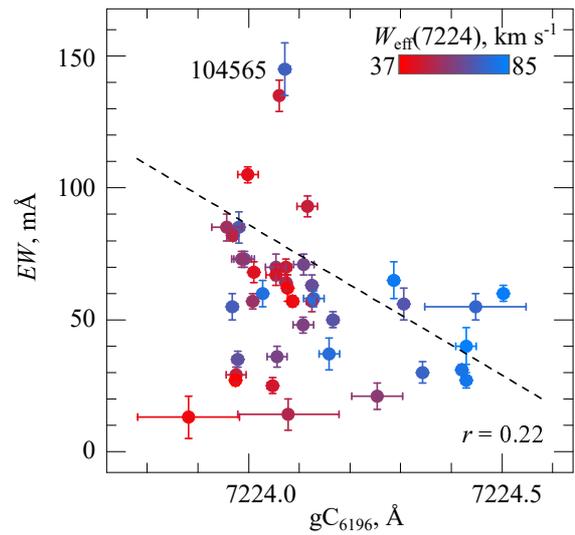


Рис. 10. Связь эквивалентной ширины DIB 7224 с центром масс этой полосы. Вариации эффективной ширины этой диффузной полосы показаны цветом: красный — узкие полосы, синий — более широкие.

неточным измерениям этой диффузной полосы и, как следствие, к низкой корреляции между центром массы и эффективной шириной W_{eff} этой полосы (рис. 8b). С другой стороны, опыт показывает, что эквивалентная ширина DIB 6824 не очень чувствительна к неопределенностям в проведении континуума и определение истинного профиля достаточно однозначно. Эквивалентная ширина этой полосы хорошо коррелирует с эквивалентными ширинами DIB 5780 и 6196, но слабо с DIB 5797 (таблица 2). Это удивительно, поскольку обе полосы, DIB 6196 и 5797, являются так называемыми «узкими» DIB с очень хорошей взаимной корреляцией.

Профиль DIB 7224 представляет собой узкую и симметричную спектральную линию с почти гауссовским профилем. Влияние теллурических линий вносит дополнительную неопределенность в результаты, но в целом серьезных трудностей в измерениях этой полосы не возникает. DIB демонстрирует умеренную корреляцию ($r = 0.72$) между центром массы и эффективной шириной. Также видно, что в облаках типа ζ профили DIB 7224 более узкие, тогда как в σ -облаках наблюдается систематически более широкий профиль (рис. 8).

На рис. 8 видно, что профили «узких» DIB 5797 и 7224 в σ -облаках шире, но имеют меньшие интенсивности: символы красного цвета в основном сосредоточены над «синей» группой. Вероятно, это происходит из-за имеющего место в σ -облаках мощного потока УФ-фотонов, который возбуждает более высокие переходы в спектре пока неизвестных молекулярных носителей.

В статье Krelowski et al. (2019) показано, что существует множество промежуточных типов облаков (между σ и ζ) и спектры облаков характеризуются как разными соотношениями интенсивностей диффузных полос, так и различиями в линиях известных молекул/атомов, в характеристиках пылевых частиц. В качестве дополнительного параметра, отражающего физические условия в межзвездных облаках, мы использовали соотношение эквивалентных ширин DIB 5797 и DIB 5780. Трехпараметрические зависимости, которые показаны на графиках в данной работе (третий параметр указан цветом символов), демонстрируют следующее:

- DIB 5780 слабее в облаках типа ζ (рис. 4, график с эквивалентными ширинами DIB 6196 и 5780), в то время как DIB 5797 — сильнее (рис. 4, график с эквивалентными ширинами DIB 6196 и 5797);
- центр масс DIB 5797 несколько смещен в красную сторону в объектах типа ζ (рис. 4), то есть профиль этой диффузной полосы более асимметричен в ζ -облаках. Возможно, это обусловлено населенностью более высоких переходов Р-ветви носителя. Действительно, лабораторные спектры молекул (например, углеродных цепочек) показывают уширение и красное смещение профилей с повышением температуры (Motylewski et al., 2000).

Наконец, подчеркнем, что корреляции между компонентами МЗС необходимо рассматривать с осторожностью, поскольку степень корреляции зачастую зависит в том числе от величины выборки

Таблица 2. Коэффициент корреляции Пирсона между межзвездным покраснением E_{B-V} , эквивалентными ширинами указанных диффузных полос, межзвездной молекулы CN λ 4300 и линии KI λ 7699

	CN	5780	5797	6196	6284	7224	KI	E_{B-V}
CN	1	0.36	0.58	0.46	0.03	0.07	0.68	0.69
5780	0.36	1	0.75	0.92	0.80	0.80	0.52	0.69
5797	0.58	0.75	1	0.90	0.48	0.56	0.62	0.74
6196	0.46	0.92	0.90	1	0.70	0.81	0.67	0.65
6284	0.03	0.80	0.48	0.70	1	0.79	0.35	0.52
7224	0.07	0.80	0.56	0.81	0.79	1	0.47	0.42
KI	0.68	0.52	0.62	0.67	0.35	0.47	1	0.47

Таблица 3. Обозначения: предельные и средние значения центра масс указанных диффузных полос; предельные и средние значения эффективной ширины W_{eff} . Измерения выполнены для объектов с межзвездным покраснением E_{B-V} в диапазоне от $0^{\text{m}}13$ до $1^{\text{m}}06$

$\lambda_{\text{gc}}, \text{\AA}$			$W_{\text{eff}}, \text{км с}^{-1}$		
min	max	mean	min	max	mean
5797.06	5797.33	5797.17 ± 0.01	36	55	43 ± 1
5780.41	5781.24	5780.68 ± 0.02	101	140	114 ± 1
6283.35	6284.60	6283.94 ± 0.05	160	264	218 ± 3
7223.88	7224.50	7224.13 ± 0.02	37	85	45 ± 1

изучаемых объектов. Большие выборки обычно демонстрируют наличие как минимум умеренной корреляции. Предпочтительна разумная по размеру выборка тщательно отобранных объектов без видимого доплеровского расщепления в профилях KI λ 7699 и CN λ 4300. Хорошая корреляция не обязательно означает наличие физической связи между компонентами МЗС. Например, номинальная корреляция между основными диффузными полосами DIB 5780 и 5797, измеренная в наших объектах (см. рис. 9 и таблицу 2), относительно высока (коэффициент Пирсона $r = 0.75$), несмотря на хорошо известное разное происхождение этих особенностей. Еще один интересный пример — пекулярный объект HD 210121 с очень сильными молекулярными и атомными линиями (включая как KI λ 7699, так и CN λ 4300). Несмотря на относительно хорошую корреляцию диффузных полос с этими линиями (в частности, в ζ -облаках), все диффузные полосы в спектре HD 210121 очень слабы.

4. ВЫВОДЫ

Таблицы 1, 3 и рисунки показывают наличие сильной переменности как ширины, так и центра

массы диффузных полос. Еще раз подчеркнем, что вариации ширины диффузных полос, о которых сообщается, например, в работе Krelowski et al. (2021), а также в данном исследовании, не вызваны наличием на луче зрения нескольких облаков с разными лучевыми скоростями, то есть эффектом Доплера. Одна и та же диффузная полоса может быть как более узкой, так и более широкой в разных объектах. Поскольку спектры звезд изученной выборки не демонстрируют сильного доплеровского расщепления в профиле межзвездной линии KI, вариации ширины диффузных полос, очевидно, вызваны различием физических условий в наблюдаемых на просвет межзвездных облаках. В диапазоне межзвездного покраснения $0^{\text{m}}13 - 1^{\text{m}}06$ мы обнаружили следующее:

- центр масс DIB 5797 варьируется в сравнительно узком диапазоне длин волн $5797.06 - 5797.33 \text{ \AA}$, тогда как ее эффективная ширина W_{eff} меняется более чем в полтора раза. Это означает слабое влияние красного крыла профиля этой особенности на общую интенсивность и высокую чувствительность этого крыла к изменению физических условий;
- напротив, центр масс DIB 5780 изменяется в широком диапазоне длин волн $5780.41 - 5781.24 \text{ \AA}$, тогда как ее эффективная ширина W_{eff} меняется слабо, то есть наблюдается сильное влияние красного крыла профиля на смещение центра масс диффузной полосы;
- широкая диффузная полоса DIB 6284 показывает сильную переменность обоих параметров, однако к этому результату следует относиться осторожно ввиду относительно высокой степени неопределенности измерений этой полосы, сильно загрязненной теллурическими линиями;
- DIB 7224 представляет собой редкий случай диффузной полосы почти гауссовой формы. Полоса демонстрирует удивительно высокую переменность своей ширины, меняющейся более чем в два раза при смещении центра массы в красную часть спектра всего примерно на 0.6 \AA . Вероятно, носитель этой полосы очень чувствителен к изменениям физических условий в облаке: синее и красное крыло профиля расширяются в унисон, но профиль становится более пологим;
- интенсивность DIB 5780 в ζ -облаках снижена (рис. 4, эквивалентные ширины DIB 6196 и 5780), тогда как DIB 5797 показывает интенсивность выше средней (рис. 4, эквивалентные ширины DIB 6196 и 5797);
- центр масс DIB 5797 смещен в красную область спектра в ζ -облаках (рис. 8), то есть профиль данной диффузной полосы в этих облаках более асимметричен;

- объекты в Трапедии Ориона (σ -облаках) демонстрируют самые широкие диффузные полосы в выборке. В этой области Галактики плотной группой расположены очень горячие звезды высокой светимости.

Использование комбинации двух новых подходов (DIB 6196 в качестве нуль-пункта «межзвездной» шкалы длин волн и центр масс как метка длины волны диффузной полосы) позволило обнаружить, что объекты, демонстрирующие отклонение длины волны диффузных полос от каталожного значения (звезды в Sco OB1, HD 34078, объекты Трапедии Ориона и др. — см., например, Krelowski et al. (2021)), не показывают таких отклонений при использовании нового подхода.

Однако в некоторых случаях смещение в красную область, вызванное уширением профиля в красную сторону, сопровождается полным смещением профиля — см. смещенный профиль DIB 5780 в спектре HD 37023 на рис. 8с. Остается вопрос, чем вызвано это смещение. Если носитель DIB 6196 (эталон для межзвездной шкалы длин волн) и носители других DIB занимают разные объемы облаков, тогда это смещение может быть вызвано эффектом Доплера. Или же наблюдаемое смещение всего профиля целиком (в том числе левого крыла) вызывается физическими эффектами, например более высокой/низкой температурой, вариациями содержания изотопов и др.

DIB 6284 представляет собой сложную для анализа особенность из-за ее большой ширины и сильного загрязнения теллурической полосой O_2 , что делает результат восстановления ее профиля слишком неопределенным для уверенных заключений.

DIB 7224 показывает слабую, но тем не менее, вероятно, существующую антикорреляцию между центром масс и эквивалентной шириной (рис. 10). Рисунок 10 демонстрирует, что с ростом эквивалентной ширины DIB 7224 сужается, но одновременно становится глубже. На графике зависимости центра масс DIB 7224 от эффективной ширины, показанной на рис. 8а, видно, что в ζ -облаках (объекты этого типа сконцентрированы в нижней части общей зависимости) и σ -облаках эта полоса ведет себя по-разному — в первом случае DIB 7224 систематически более узкий. Как мы уже сообщили в Krelowski et al. (2021), наблюдаемая переменность ширины диффузных полос может быть использована в качестве дополнительного критерия для их объединения в группы (семейства), образованные предположительно одной и той же молекулой.

Следующим важным шагом является обнаружение возможной связи величин уширения и красного смещения профилей диффузных полос с изменением физических свойств межзвездных облаков.

Это может быть, например, связь с температурой вращения межзвездной молекулы C_2 (как известно, хорошо коррелирующей со многими диффузными полосами), измеренной в объектах без доплеровского расщепления в спектрах межзвездных атомов/молекул. Проблемой, как и прежде, остается ограниченное количество объектов, для которых получены спектры со сверхвысоким S/N и высоким спектральным разрешением.

БЛАГОДАРНОСТИ

В этом исследовании использовались данные научного архива ESO (<https://archive.eso.org/cms.html>) и база данных SIMBAD (<https://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>, Wenger et al., 2000).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Обработка и анализ данных выполнены с помощью программных средств, разработанных в том числе в Специальной астрофизической обсерватории, при финансовой поддержке грантом № 075-15-2022-262 (13.МНПМУ.21.0003) Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. Bernstein, S. A. Shtetman, S. M. Gunnels, et al., SPIE Conf. Proc. **4841**, p. 1694 (2003). DOI:10.1117/12.461502
2. H. Dekker, S. D'Odorico, A. Kaufer, et al., SPIE Conf. Proc. **4008**, p. 534 (2000). DOI:10.1117/12.395512
3. H. Fan, L. M. Hobbs, J. A. Dahlstrom, et al., Astrophys. J. **878** (2), article id. 151 (2019). DOI:10.3847/1538-4357/ab1b74
4. G. Galazutdinov, A. Bondar, B.-C. Lee, et al., Astron. J. **159** (3), id. 113 (2020). DOI:10.3847/1538-3881/ab6d01
5. G. Galazutdinov, A. Strobel, F. A. Musaev, et al., Publ. Astron. Soc. Pacific **127** (948), 126 (2015). DOI:10.1086/680211
6. G. A. Galazutdinov, Astrophysical Bulletin **77** (4), 519 (2022). DOI:10.1134/S1990341322040034
7. G. A. Galazutdinov, G. LoCurto, I. Han, and J. Krelowski, Publ. Astron. Soc. Pacific **120** (864), 178 (2008). DOI:10.1086/528938
8. G. A. Galazutdinov, G. Manicò, and J. Krelowski, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **366** (3), 1075 (2006). DOI:10.1111/j.1365-2966.2005.09886.x

9. G. A. Galazutdinov, F. A. Musaev, J. Krelowski, and G. A. H. Walker, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **112** (771), 648 (2000). DOI:10.1086/316570
10. P. Gnaciński and T. Młynik, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **129** (974), 044101 (2017). DOI:10.1088/1538-3873/aa5c9b
11. J. Hartmann, *Astrophys. J.* **19**, 268 (1904). DOI:10.1086/141112
12. M. L. Heger, *Lick Observatory Bulletin* **10** (337), 146 (1922).
13. A. Kaufer, O. Stahl, S. Tubbesing, et al., *The Messenger* **95**, 8 (1999).
14. M. Kazmierczak, P. Gnaciński, M. R. Schmidt, et al., *Astron. and Astrophys.* **498**, 785 (2009). DOI:10.1051/0004-6361/200811558
15. T. H. Kerr, R. E. Hibbins, S. J. Fossey, et al., *Astrophys. J.* **495** (2), 941 (1998). DOI:10.1086/305339
16. K.-M. Kim, I. Han, G. G. Valyavin, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **119** (859), 1052 (2007). DOI:10.1086/521959
17. J. Krelowski, G. Galazutdinov, and A. Bondar, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **486** (3), 3537 (2019). DOI:10.1093/mnras/stz1082
18. J. Krelowski, G. A. Galazutdinov, P. Gnaciński, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **508** (3), 4241 (2021). DOI:10.1093/mnras/stab2774
19. J. Krelowski, G. A. Galazutdinov, G. Mulas, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **451** (3), 3210 (2015). DOI:10.1093/mnras/stv1117
20. J. Krelowski and J. M. Greenberg, *Astron. and Astrophys.* **346**, 199 (1999).
21. J. Krelowski and G. A. H. Walker, *Astrophys. J.* **312**, 860 (1987). DOI:10.1086/164932
22. J. Krelowski and B. E. Westerlund, *Astron. and Astrophys.* **190**, 339 (1988).
23. T. Motylewski, H. Linnartz, O. Vaizert, et al., *Astrophys. J.* **531** (1), 312 (2000). DOI:10.1086/308465
24. F. Pepe, P. Molaro, S. Cristiani, et al., *Astronomische Nachrichten* **335** (1), 8 (2014). DOI:10.1002/asna.201312004
25. F. Salama, G. A. Galazutdinov, J. Krelowski, et al., *Astrophys. J.* **526** (1), 265 (1999). DOI:10.1086/307978
26. P. J. Sarre, J. R. Miles, T. H. Kerr, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **277** (2), L41 (1995). DOI:10.1093/mnras/277.1.L41
27. R. Siebenmorgen, J. Krelowski, J. Smoker, et al., *Astron. and Astrophys.* **641**, id. A35 (2020). DOI:10.1051/0004-6361/202037511
28. M. Wenger, F. Ochsenbein, D. Egret, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **143**, 9 (2000). DOI:10.1051/aas:2000332

On the Intrinsic Rest Wavelengths of Diffuse Interstellar Bands

G. A. Galazutdinov^{1,2} and E. V. Babina¹

¹Crimean Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nauchny, 298409 Russia

²Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

The resting wavelengths of diffuse interstellar bands (DIBs) are parameters of fundamental importance owing to the lack of unambiguous identification for these mysterious features. Usually the wavelengths of DIBs are estimated using known interstellar atomic or molecular lines serving to shift the spectrum to the resting wavelengths velocity scale. However, the latter may not share in fact the same parts of a cloud which the carriers of diffuse bands occupy. Here we argue that the narrowest known diffuse interstellar band 6196 Å is the best reference feature for building the “interstellar” wavelength scale. Also, we offer the geometrical center of gravity (the effective wavelength) of the diffuse bands as a rest wavelength measurer for these generally asymmetric features. We assessed the magnitude of variation of the center of gravity of the diffuse bands at 5780, 5797, 6284, and 7224 Å measured in 41 lines of sight in the broad range of interstellar reddening (E_{B-V} varies in the range of 0.13–1.06 stellar magnitudes) with the lack of evident Doppler-split in the profiles of interstellar atomic/molecular lines. We demonstrated that diffuse bands show gradual broadening of their profile widths, accompanied with the red-shift of the center of gravity, i.e., the red wing of the profiles is their most variable part. To estimate the width of the diffuse bands, we offer to apply an “effective width” parameter W_{eff} , which is the relation of the equivalent width (EW) to the depth of the feature. In contrast to habitual half width at half maximum ($FWHM$), the parameter originally introduced by us in 2008 (Galazutdinov, LoCurto, Krelowski) is not sensitive to the profile shape irregularities. W_{eff} provides lower measurement uncertainties than the $FWHM$ does. The gradual increase of W_{eff} , accompanied with the red-shift of the center of gravity of the profile, may suggest populating of higher transitions of the P branch of the bands of molecules, assuming the latter are DIB carriers. It is also shown, that diffuse bands are broader although more shallow in the harsh conditions of σ -clouds, where atomic and molecular lines are weakened and/or totally absent. The difference of the effective width of DIBs in ζ and σ clouds is discussed as well.

Keywords: *ISM: clouds—ISM: atoms, molecules*