

**ФИЗИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР
PHYSICAL SCIENCES
ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ**

УДК 524.3
МРНТИ 41.23.39

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-4-340-353>

^{1*}Ноляров А.С.,

PhD, ORCID ID: 0000-0002-0045-5457,

*e-mail: nodyarov.atilkhan@gmail.com

²Расылова А.Е.,

PhD, ORCID ID: 0000-0001-6964-8444,

e-mail: rassylova.ainash@gmail.com

¹Омар А.Ж.,

PhD, ORCID ID: 0000-0002-5604-3742,

e-mail: omaruzhan@gmail.com

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби,
г. Алматы, Казахстан

²Казахский национальный женский педагогический университет,
г. Алматы, Казахстан

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЗВЕЗДЫ MWC 645**Аннотация**

В данной работе представлены результаты спектроскопических наблюдений звезды MWC 645 – представителя слабоизученного класса объектов типа FS CМа, характеризующегося наличием сильных эмиссионных линий и инфракрасного избытка, связанного с околозвездной пылью. На основе наблюдений высокого спектрального разрешения впервые обнаружен холодный вторичный компонент в системе. Определены фундаментальные параметры обоих компонентов: для горячей (В-типа) звезды – эффективная температура $18,000 \pm 2000$ К и светимость $\log(L/L_{\odot}) = 3.9 \pm 0.4$, для холодной (К-типа) – 4250 ± 250 К и $\log(L/L_{\odot}) = 3.1 \pm 0.4$. Система находится на расстоянии 6.5 ± 0.9 кпк и демонстрирует признаки активного взаимодействия, включая текущий перенос массы, о чем свидетельствуют сложные профили эмиссионных линий. Полученные результаты подтверждают двойственную природу MWC 645 и ее принадлежность к типу FS CМа. Работа подчеркивает необходимость дальнейших наблюдений для уточнения параметров системы и лучшего понимания процессов в околозвездной оболочке.

Ключевые слова: звезды, двойные звезды, спектральные двойные звезды, Ве звезды, звезды с эмиссионными линиями.

Введение

Класс звезд В[е]-типа характеризуется наличием разрешенных и запрещенных эмиссионных линий низкого возбуждения, таких как H I, Fe II, [Fe II], N II, O I и другие в спектрах

звезд В-типа в сочетании с сильным избытком в ближнем и среднем ИК-диапазоне из-за излучения околозвездной пыли. Явление наблюдается у звезд с широким диапазоном масс и эволюционных статуса. К последним относятся звезды Ae/BeХербига до главной последовательности, симбиотические двойные системы, протопланетные туманности и небольшая группа сверхгигантов (например, η Киля), как это было сделано авторами работы [1]. Также почти 30 объектов из первоначального списка звезд B[e] остались неклассифицированными из-за отсутствия наблюдений и сложных свойств, которые содержали предположений на более чем одну звездную группу с известной природой. Большинство из них стали членами новой группы типов FS CMa, определенной в работе [2], который предположил, что эти объекты, скорее всего, являются тесными двойными звездами, которые претерпевают или претерпели фазу массообмена между компонентами.

Природа большинства объектов данного типа до сих пор до конца не выяснена, хотя все они считаются подозреваемыми или подтвержденными двойными системами. В частности, звезды MWC 17, FS CMa, MWC 342 и MWC 645 входят в группу FS CMa. Среди них MWC 645 является одним из наименее изученных объектов и составляет основной предмет настоящего исследования. На рисунке 1 представлено положение звезды MWC 645 по данным цифрового обзора неба (DSS).

Авторы работы [3] изучили синюю область спектра MWC 645, используя спектры Куде (coude) со спектральным разрешением 20 \AA mm^{-1} , полученные в 1971 г. Они обнаружили, что все сильные эмиссионные линии FeII и [FeII] имеют двойной пик с разницей средней лучевой скорости (RV) в 150 км/с между более сильным красным и более слабым синим пиками, в то время как профили H γ и H δ демонстрируют три компонента.

Оптические спектры промежуточного разрешения MWC 645 в области от 3741 \AA до 8790 \AA с щелью между 5137 и 6332 \AA , снятые в 1991–1995 гг., были изучены авторами [4]. Эти авторы идентифицировали 88 запрещенных и разрешенных эмиссионных линий и измерили для этих линий среднюю гелиоцентрическую скорость (RV), равную 76 км/с , но не обнаружили линий поглощения, сформированных в звездной атмосфере. Сравнение их результатов с данными других авторов показало, что спектральные линии сильно различались по эквивалентной ширине (EW) вплоть до 2 раз, а также что некоторые линии не были обнаружены в спектрах, снятых в разное время.

Главная звезда показана крестом, звезды сравнение числами. Прямое восхождение звезды $21:53:27.486$, склонение звезды $+52:59:58.01$.

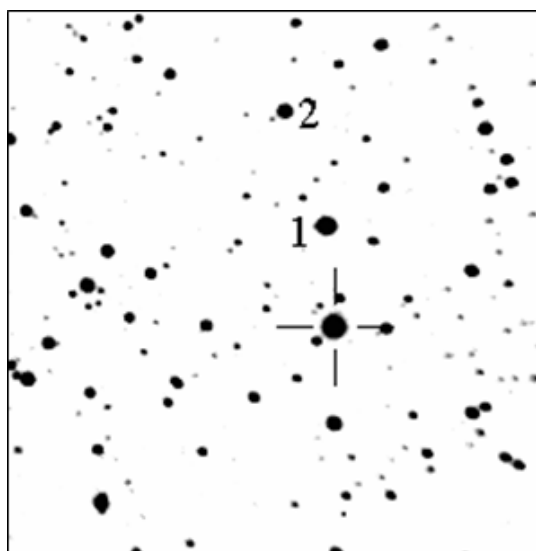


Рисунок 1 – Поле размером $10' \times 10'$ вокруг MWC 645 из цифрового обзора неба (DSS)

Ранее сообщалось, что профиль линии $\text{H}\alpha$ у звезды MWC 645 обладает необычной структурой, он состоит из широкого компонента с синим смещением и значительно более интенсивного узкого компонента с красным смещением. Это было замечено в спектрах низкого разрешения, полученных в работе [5] в 1981 г., а позже подтверждено в работе [6] автором, изучавшим узкие области спектра вокруг нескольких эмиссионных линий (например, $\text{H}\alpha$ и $[\text{OI}]$ 6300 и 6363 Å) в 1986–1988 и 2000–2002 гг. Он пришел к выводу, что такой профиль не обнаружен ни у одного другого объекта выборки из 18 звезд B[e], наблюдавшихся им с высоким разрешением. Этот автор также описал профили всех разрешенных эмиссионных линий в спектрах MWC645 как имеющие характерную асимметрию с крутым красным флангом и крылом на синей стороне, в то время как запрещенные линии были узкими и однопиковыми.

Недавно авторы работы [7] исследовали двойную природу звезды типа FS CMa MWC 645 с помощью ближней инфракрасной и оптической спектроскопии из нескольких обсерваторий. Они идентифицировали различные атомные и молекулярные спектральные особенности и проанализировали их свойства. Молекулярные полосы поглощения CO (1,62 мкм и 2,3 мкм) были впервые обнаружены в MWC 645, что дало новое представление о вторичном компоненте. Полосы CO предполагают наличие компаньона G-типа с верхним пределом для его эффективной температуры 5200 К. Авторы также обнаружили изменения в интенсивности эмиссионной линии $\text{H}\alpha$, коррелирующие с изменениями яркости, что указывает на события выброса массы или увеличенную потерю массы.

Поскольку все исследования этого объекта проводились давно и были безрезультатными в отношении его природы, MWC 645 требует более детального изучения. В частности, свойства околозвездного вещества, фундаментальные параметры, распределение энергии в спектре (SED) и кривая блеска подробно не изучались. В этой работе представляются результаты спектроскопии высокого и низкого разрешения звезды MWC 645, направленные на определение ее фундаментальных параметров и оценку ее природы и эволюционного статуса.

Материалы и методы

Для анализа использовались как фотометрические, так и спектроскопические методы. Фотометрические данные позволили оценить общие характеристики светимости объекта, выявить наличие инфракрасного избытка, а также проанализировать возможные вариации блеска во времени. Спектральный анализ был направлен на изучение профилей эмиссионных и абсорбционных линий, определение физических параметров звезды и характеристик околозвездной среды. Особое внимание уделялось эмиссионным линиям водорода и гелия, а также запрещенным линиям металлов, что позволило уточнить природу и структуру околозвездной оболочки.

Спектральные наблюдения звезды MWC 645 были получены на телескопах и инструментах, представленных в таблице 1.

Таблица 1 – Инструменты, использованные в спектральных наблюдениях

Обсерватория	Расположение	Диаметр телескопа, m	Диапазон Å	Разрешение	№
CFHT	Гавайи, США	3.6	3600 – 10500	65,000	4
McDonald	Техас, США	2.7	3600 – 10500	60,000	1
OAN-SPM	Сан-Педро-Мартир, Мексика	2.1	3600 – 7300	18,000	8
SAO	Нижний Архыз, Россия	6.0	5200 – 6800	60,000	1

В ходе исследования были получены оптические спектроскопические наблюдения звезды MWC 645 с высоким разрешением на 2.7-метровом телескопе Харлана Дж. Смита в обсерватории Макдональда (Техас, США, $R = 60\,000$) с помощью спектрографа Tull coude TS2 [8], 2.1-метрового телескопа Национальной астрономической обсерватории Сан-Педро-Мартин (ОАН СПМ, Нижняя Калифорния, Мексика, $R = 18\,000$) со спектрографом REOSC, 6-метровом телескопе Специальной астрофизической обсерватории (САО, Нижний Архыз, Россия, $R = 60\,000$) со спектрографом NES [9]) и 3.6-метровым канадско-французско-гавайском телескопе (CFHT, Маунакеа, Гавайи, США, $R = 65\,000$) со спектрополяриметром ESPaDOnS [10]. Наблюдения, полученные при CFHT, были обработаны программными пакетами Urena и Libre-ESpRIT [11]. Спектры других обсерваторий обрабатывались с помощью пакета echelle в IRAF. В таблице 2 представлена информация обо всех спектроскопических наблюдениях (14 спектров) с 2004 по 2021 гг.

Таблица 2 – Спектроскопические наблюдения

Дата	HJD	Эксп., сек	Диап., Å	Обс.
10.07.2004	3286.424	18000	5200-6800	SAO
10.12.2005	3655.633	900	4300-6800	SPM
12.21.2005	3725.595	1200	4050-10100	McD
11.17.2007	4421.634	6000	3900-6800	SPM
10.04.2008	4744.632	4800	4100-6900	SPM
10.08.2008	4748.635	6000	4000-6900	SPM
12.10.2008	4810.699	2400	4000-10000	CFHT
12.11.2008	4811.699	2400	4000-10000	CFHT
11.03.2009	5139.665	4800	4100-7100	SPM
10.18.2010	5487.748	6000	4100-7350	SPM
11.18.2012	6250.611	4800	3800-7350	SPM
10.18.2013	6583.705	3600	4550-8100	SPM
10.18.2016	7679.242	4686	3800-10450	CFHT
11.26.2021	9544.500a	10200	4000-10000	CFHT

Примечание: (1) Дата наблюдения (месяц/день/год). (2) Гелиоцентрическая юлианская дата (JD-2450000+). (3) Общее время экспозиции в секундах. (4) Информативный диапазон каждого спектра в Å. (5) Сокращенное наименование обсерватории.
а – Наблюдение CFHT в 2021 г. состоит из 10 комбинированных отдельных экспозиций, сделанных в течение трех ночей подряд (24–26 ноября 2021 г.).

Два спектра ближнего ИК-диапазона MWC645 с низким разрешением были получены на 3-метровом рефлекторе Шейна Ликской обсерватории (США, Калифорния, 0.46–2.5 мкм, $R \sim 700$) в июле 2005 г. и ноябре 2009 г. с помощью аэрокосмического спектрографа ближнего инфракрасного диапазона VNIRIS [12]. Охватываемый спектральный диапазон составлял 0.46–2.5 мкм в 2005 г. и 0.8–2.5 мкм в 2009 г.

Изучение закона межзвездного поглощения в направлении объекта

Для оценки межзвездного поглощения и покраснения звезды MWC 645 было использовано несколько методов.

Чтобы учесть межзвездное поглощение, были использованы опубликованные зависимости между эквивалентной шириной и диффузными полосами межзвездного поглощения (DIB) и избытком цвета $E(B-V)$. Калибровки авторов работ [13] и [14] для эквивалентные ширины

DIB-ов при 5780 Å и 6613 Å дают избыток цвета $E(B-V) = 1.0 \pm 0.1$ mag. Межзвездное поглощение $AV = 3.1 \times E(B-V) = 3.1$ mag.

Покраснение MWC 645 также можно оценить по соотношению линий O I при 0.8446, 1.1287 и 1.3165 мкм [15]. Из спектра Лика от 3 июля 2005 г. это дает $E(B-V) = 0.94$ mag для кривой покраснения из работы [16]. Оба этих метода дают почти одинаковый результат для избытка цвета, указывая на небольшое околозвездное покраснение.

Отдельным методом оценки межзвездного покраснения является использование 3D-карты покраснения на основе расстояний Gaia и фотометрических данных для проекционных близких звезд из каталогов Pan-STARRS 1 и 2MASS [17]. Это подразумевает покраснение $E(g-r)$; $E(B-V) = 0.78 \pm 0.03$ mag в направлении на объект (галактические координаты $l = 98^\circ$, $b = -1^\circ$) на расстоянии 6.5 ± 0.9 кпк.

Расхождение между методами может быть связано с разбросом данных DIB, собранных с широкого диапазона лучей зрения, или с отсутствием данных для звезд главной последовательности на расстояниях более 6 кпк, указанных на карте покраснения в направлении объекта. Последняя причина кажется более вероятной, поскольку покраснение, рассчитанное с помощью инструмента трехмерной карты, достигает $E(g-r) = 1.0$ mag всего в 0.2° в направлении галактической плоскости от положения объекта. Уверенность усиливается за счет очень хорошего совпадения значений $E(B-V)$, полученных с использованием методов DIB и линий покраснения.

Результаты и обсуждения

Эмиссионные линии звезды MWC 645

Оптический спектр MWC645 демонстрирует многочисленные эмиссионные линии, что согласуется с предыдущими исследованиями. Сильные разрешенные и запрещенные эмиссионные линии представлены водородом (серии Бальмера и Пашена), FeII, CrII, TiII, CaII, OI, NI, NI, CaII, [FeII], [NiII], [CaII], [OI] и несколько строк других элементов. RV эмиссионных линий определялись путем подгонки пиков линий к гауссиане. Линии были идентифицированы с использованием списка линий в звездных спектрах [18], а EW были измерены путем интегрирования в континуум-нормализованные спектры.

Список больше 226 эмиссионных линий и их лучевые скорости в диапазоне длин волн 3966–10407 Å, идентифицированных в спектре (CFHT) 2008 г., представлены в работе [19], где лучевые скорости двухпиковых линий связаны с наиболее интенсивным (смещенным в красную сторону) пиком, линии с синим смещением трудно измерить из-за их слабости в большинстве линий, за исключением самых сильных бальмеровских линий. Параметры эмиссионных линий H α и H β приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры линий H α и H β в спектрах MWC 645

H α						
Дата	Обс.	RV_blue	RV_red	I_blue	I_red	EW
10.07.2004	SAO	-250.4	-33.7	85.5	95.2	-561.9
10.12.2005	SPM	-222.5	-18.6	135.8	448.2	-1603.5
12.21.2005	McD	-195.1	2.9	-	-	-
11.17.2007	SPM	-221.6	-5.3	197.2	347.2	-1557.5
10.04.2008	SPM	-240.8	-21.8	207.6	292.4	-1833.9
10.08.2008	SPM	-241.2	-21.8	207.2	294.7	-1345.5
12.10.2008	CFHT	-261.3	-30.9	194.5	280.1	-1609.0

Продолжение таблицы 3

12.11.2008	CFHT	-260.9	-30.9	192.9	273.4	-1595.7
11.03.2009	SPM	-213.8	-7.6	180.3	483.4	-1765.9
10.18.2010	SPM	-222.5	-8.5	156.2	492.2	-1771.7
11.18.2012	SPM	-236.2	-8.5	298.8	359.6	-1951.4
10.18.2013	SPM	-215.2	-17.2	213.0	633.9	-1998.8
10.18.2016	CFHT	-241.7	-29.1	237.1	350.2	-1631.8
11.26.2021	CFHT	-244.9	-27.3	111.7	356.1	-1192.5
H β						
10.07.2004	SAO	-	-	-	-	-
10.12.2005	SPM	-	-25.4	-	15.9	-31.2
12.21.2005	McD	-	-1.4	-	20.9	-44.6
11.17.2007	SPM	-230.9	2.3	32.1	56.8	-93.7
10.04.2008	SPM	-252.5	-24.2	23.8	47.8	-66.4
10.08.2008	SPM	-254.4	-25.4	23.7	46.8	-81.2
12.10.2008	CFHT	-280.3	-35.3	37.8	50.1	-75.1
12.11.2008	CFHT	-280.9	-34.7	38.5	50.9	-75.6
11.03.2009	SPM	-278.4	-2.6	7.5	29.8	-30.6
10.18.2010	SPM	-195.7	-11.8	18.1	45.6	-67.8
11.18.2012	SPM	-243.3	-10.0	37.1	48.6	-83.8
10.18.2013	SPM	-	-	-	40.5	-61.8
10.18.2016	CFHT	-241.4	-29.7	33.8	45.2	-100.3
11.26.2021	CFHT	-282.1	-30.4	4.3	19.8	-70.7
Примечание: Информация в столбце: (1) Дата наблюдения (месяц/день/год). (2) Сокращенное название обсерватории. (3), (4) Гелиоцентрические RV или эмиссионные пики, смещенные в синюю (RVblue) и красную (RVred) сторону спектра. (5), (6) Интенсивности пиков в единицах континуума. (7) Эквивалентные ширины эмиссионных линий в Å. Следует отметить, что линия H α была близка к краю спектрального порядка в спектре 2005 г., полученном в обсерватории Макдональда для определения приемлемого уровня континуума.						

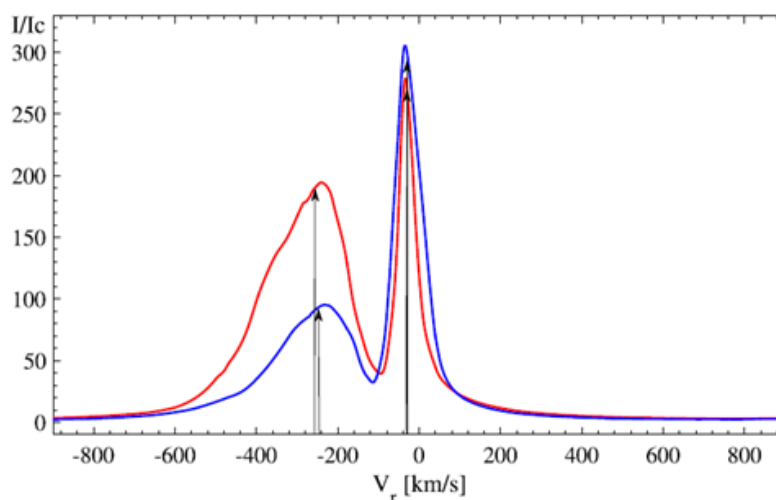
Средняя RV эмиссионных линий, определенная во всех наблюдаемых спектрах самого высокого разрешения, полученных в SAO (2004 г.), McD (2005 г.) и CFHT (2008, 2016, 2021 гг.), составляет -61.0 ± 4.3 км/с. Лучевые скорости (RV или) эмиссионных линий были определены по формуле эффекта Доплера (1):

$$V_r = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{lab}}{\lambda_{lab}} \cdot c \quad (1)$$

где, $\lambda_{obs} \cdot \lambda_{lab}$ – наблюдаемые и лабораторные длины волны, c – скорость света в вакууме в км/с.

Сравнивая спектры высокого разрешения и высокого отношения сигнал/шум, не было обнаружено исчезновения ни одной из спектральных линий, упомянутых [4]. Хотя в спектрах, полученных в разные годы, интенсивность линий разная, не были обнаружены сильные перемены лучевых скоростей эмиссионных линий в отдельных спектрах.

На рисунке 2 показан пример вариаций профиля линии H α . Его очень интенсивный и широкий пик с синим смещением имеет среднее значение RV -252 ± 9 км/с и ширину на полувысоте (FWHM) 224 ± 10 км/с, в то время как узкий пик с красным смещением имеет среднее значение RV -30 ± 2 км/с. и FWHM 60 ± 15 км/с. Используются все спектры с самым высоким разрешением, полученные в SAO и CFHT, для получения этих средних данных.



Стрелки показывают лучевые скорости пиков. Интенсивность нормирована на континуум, а лучевые скорости являются гелиоцентрическими.

Рисунок 2 – Сравнение профилей линии Na, полученных в 2008 г. (красная линия) и 2021 г. (синяя линия) в CFHT

Эти значения аналогичны значениям, указанным в работе [6]: $RV -218$ км/с и -30 км/с и FWHM 229 км/с и 59 км/с соответственно. Следовательно, пики профиля Na не претерпевают резких изменений за последние четыре десятилетия, что отражает относительную стабильность околозвездной среды. Параметры линий Na и H β представлены в таблице 3. Большинство разрешенных эмиссионных линий имеют сходные профили, тогда как расщепление пиков профилей запрещенных линий не очевидно.

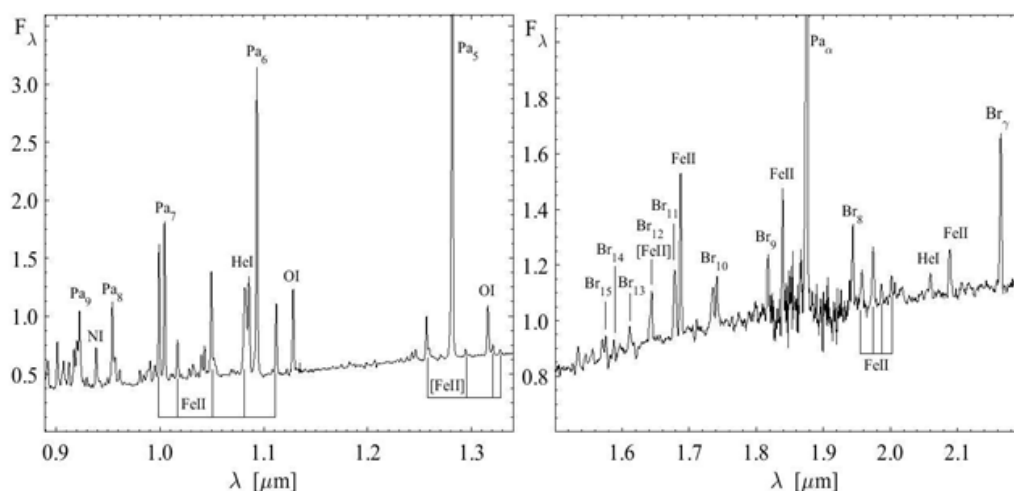
Эмиссионная линия He I $\lambda 6678$ Å, о наличии которой сообщается в работе [4] на основе спектра, полученного в 1995 г., отсутствовала в спектре 1987 г., представленного в работе [6]. В рамках настоящего исследования также не было обнаружено явных признаков присутствия данной линии в доступных наблюдательных спектрах.

Кроме того, автор работы [6] счел идентификацию эмиссионной линии около $\lambda 6665$ Å неопределенной, предполагая, что это может быть смесь линий FeI около $\lambda 6667$ Å. Однако в спектре MWC 645 присутствуют эмиссионные линии FeII, а не FeI. Эта линия была идентифицирована как линия [NiII] $\lambda 6666.80$ Å, которая наблюдается в спектрах некоторых других объектов типа FS CMa, таких как MWC 17 [20].

Эмиссионные линии, идентифицированные в спектрах ближнего ИК-диапазона, снятых в Ликской обсерватории по ранее опубликованным данным, снятым на том же оборудовании (например, [21, 22]), показаны на рисунке 3. Основной спектральный состав в диапазоне 0.8 – 2.5 мкм включает линии водорода серий Пашена и Брэкетта, а также линии FeII, Ni и OI. Две эмиссионные линии HeI на 1.083 мкм и 2.058 мкм с умеренной интенсивностью присутствуют в обоих спектрах ближнего ИК, снятых в 2005 и 2009 гг.

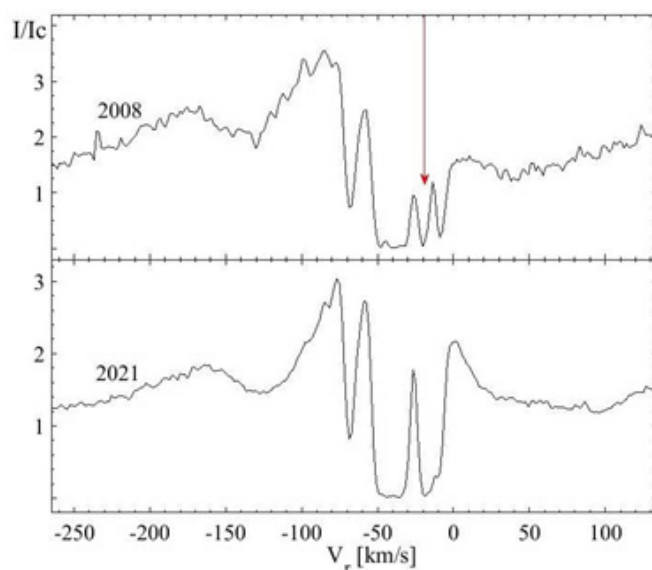
Линии поглощения звезды MWC 645

Спектр MWC645 содержит ряд линий поглощения, созданных в межзвездной среде, в том числе сильные диффузные межзвездные полосы (DIB), такие как 5780 , 5796 , 6613 Å. Профили линий NaI при 5889 и 5895 Å имеют сложную структуру (рисунок 4), состоящую из нескольких компонентов. Две более коротковолновые компоненты (узкая при $RV -70$ км/с и широкая при RV от -52 до -32 км/с) формируются, по-видимому, в межзвездной среде, а более длинноволновая (между RV от -22 до -12 км/с), положение которой близко к положению смещенного в красную сторону пика линии Na, изменяется по форме и может содержать некоторый вклад околозвездного вещества.



Длины волн даны в микронах, а потоки даны в единицах 10^{-12} Вт м $^{-2}$ мкм $^{-1}$.

Рисунок 3 – Части ближнего ИК-спектра MWC 645 с низким разрешением, полученные в Ликской обсерватории 3 июля 2005 г.



RV показаны относительно лабораторной длины волны линии (5889,92 Å). Интенсивность нормирована на континуум. Красная стрелка показывает среднее значение RV смещенного в красную сторону пика линии NaI.

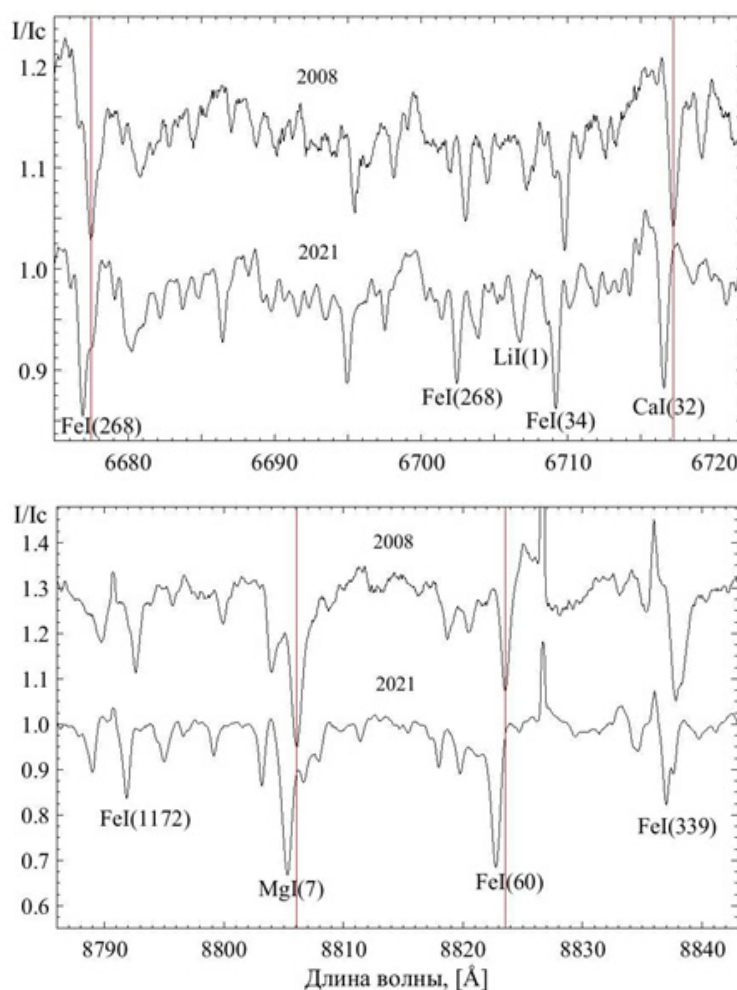
Рисунок 4 – Часть оптических спектров высокого разрешения MWC 645, полученных на CFHT в 2008 г. (верхняя панель) и 2021 г. (нижняя панель), которая показывает структуру линии NaI D2

Ни в одном из наблюдаемых спектров не обнаружено линий поглощения, типичных для атмосферы В-звезды. Это может быть связано с сочетанием высокой скорости вращения горячей звезды, вуалированы околзвездным континуумом и относительно низким отношением сигнал/шум в синей области спектра, где эффекты вуали меньше. Однако впервые был обнаружен ряд слабых линий поглощения нейтральных металлов, типичных для спектров холодных звезд, в наблюдаемых спектрах с максимальным отношением сигнал/шум, снятых на CFHT в

2008 и 2021 гг. Эти линии теряются в шумах во всех остальных спектрах из нашей коллекции. Линии поглощения, идентифицированные по каталогу [18], вместе с RV показаны в работе [19].

Чтобы обеспечить надежную идентификацию, наблюдаемые спектры CFHT с самым высоким отношением сигнал-шум MWC645 были сравнены со спектрами MWC 623, двойной системы с компонентами В-типа и К-типа [23]. MWC 623 была включена [24] в первоначальный список звезд В[e] и признана членом группы FS CMa [2].

Средняя RV линий поглощения в спектре 2008 г. составляет -23.8 ± 3.6 км/с, тогда как в спектре 2021 г. она составляет -50.2 ± 3.7 км/с (рисунок 5). Этот результат может быть признаком орбитального движения холодного компонента. Линии поглощения в спектрах ближнего ИК-диапазона не обнаружены, скорее всего, из-за их вуалирования излучением околозвездной пыли.



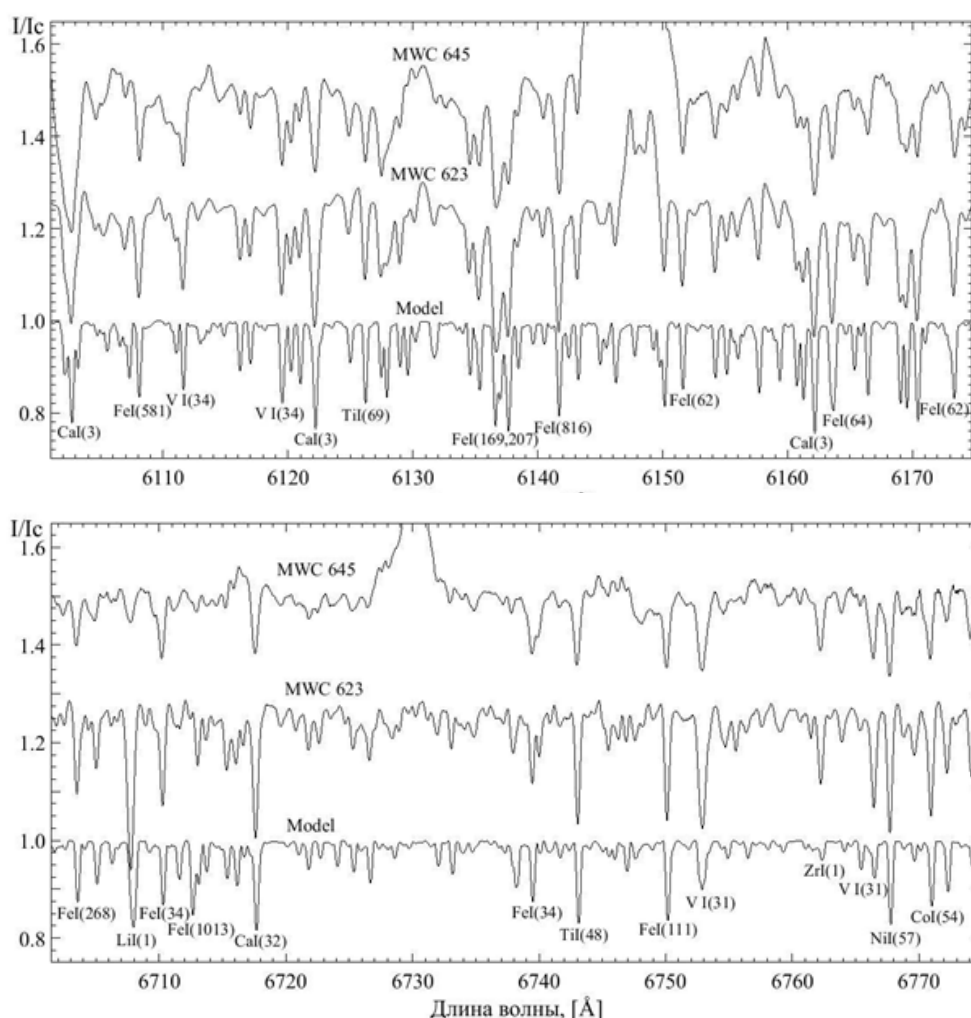
Вертикальные линии показывают положения некоторых линий в спектре 2008 г., чтобы обозначить сдвиг по сравнению с линиями в спектре 2021 г.

Рисунок 5 – Сравнение части спектров с линиями поглощения, снятыми 2008 и 2021 гг. в CFHT

Чтобы разделить вклады горячей и холодной компоненты, были рассчитаны синтетические спектры в нескольких узких диапазонах длин волн и искали наилучшее соответствие между наблюдаемыми и синтетическими спектрами, содержащими различные доли дополни-

тельного континуума. Последний представляет собой вклад горячего компонента без линий поглощения, которые не обнаруживаются в наблюдаемых спектрах. Такой подход оправдан пренебрежимо малым изменением вкладов компонент в диапазонах длин волн, используемых в данном анализе.

Для синтетических спектров были загружены модели атмосфер, предоставленные Ф. Каstellли, и рассчитаны спектры с помощью программы SPECTRUM, разработанной Gray & Corbally ([25]; рисунок 6) для T_{eff} между 3500 и 5000 K, $\log g = 1.5$ и 2.0, и проекции скорости вращения $v \sin i$ между 10 км/с и 20 км/с. Эти спектры сравнивались с наблюдаемыми спектрами, полученными на CFHT в 2008 и 2021 гг. Сравнивая интенсивности и ширины линий поглощения в синтетическом и наблюдаемом спектрах путем их деления и поиска наименьшей разницы между ними, были получены наиболее вероятные вклады компоненты. Относительные вклады горячей и холодной компонент оказались равными 85%/15% в области 5540–5580 Å, 75%/25% в области 6100–6175 Å и 70%/30% в области 6700–6775 Å соответственно.



Модель атмосферы была рассчитана для $T_{\text{eff}} = 4250$ K, силы тяжести на поверхности $\log g = 1.5$ и проецируемой скорости вращения $v \sin i = 10$ км/с. Вклад холодной компоненты составляет 25% в диапазоне 6100–6175 Å и 30% в диапазоне 6700–6775 Å. Интенсивность нормирована на локальный континуум, а шкала длин волн гелиоцентрическая.

Рисунок 6 – Сравнение спектров линий поглощения
MWC 645 и MWC 623 с модельным спектром

Заключение

Настоящая работа посвящена исследованию звезд с околозвездными оболочками, одной из наименее изученных категорий которых являются объекты типа FS CMa. Эта группа, включающая лишь несколько десятков известных представителей, характеризуется наличием ярких эмиссионных линий в оптических спектрах, включая запрещенные переходы, а также выраженным инфракрасным избытком, обусловленным присутствием околозвездной пыли. Несмотря на накопленные наблюдательные данные, природа формирования таких оболочек остается до настоящего времени неясной.

Исследования, проведенные в данной работе, привели к следующим основным результатам.

В работе представлены данные спектроскопических наблюдений высокого разрешения объекта типа FS CMa MWC 645. Основным результатом данного исследования является обнаружение холодного вторичного компонента.

Фундаментальные параметры MWC 645 составляют $T_{\text{eff}} = 18,000 \pm 2000$ К и светимость $\log(L/L_{\odot}) = 3.9 \pm 0.4$ для горячего компонента, $T_{\text{eff}} = 4250 \pm 250$ К и светимость $\log(L/L_{\odot}) = 3.1 \pm 0.4$ для холодного компонента, межзвездное поглощение $AV = 3.1 \times E(B-V) = 3.1$ mag, проекционная скорость вращения для холодного компонента $v \sin i = 10$ км/с, расстояние до звезды $D = 6.5 \pm 0.9$ кпк.

Результаты анализа спектральных данных ясно показывают, что MWC 645 представляет собой двойную систему, состоящую из звезд В-типа и К-типа, окруженную большим количеством околозвездного газа и пыли.

MWC 645 можно классифицировать как объект типа FS CMa на основании его двойственности и положения компонентов системы на HR-диаграмме. Хотя соответствующие эволюционные модели не точно описывают свойства компонентов, наблюдаемый спектр с сильными эмиссионными линиями согласуется с сильным текущим переносом массы между компонентами. Необычные профили многих эмиссионных линий (широкий пик с синим смещением и более сильный и узкий пик с красным смещением) могут служить дополнительным свидетельством продолжающегося переноса.

Более тщательное изучение, включающее более высокий уровень сигнала к шуму, спектроскопию высокого разрешения на больших телескопах и многоцветный фотометрический мониторинг, позволило бы определить больше свойств системы, таких как орбитальный период и наклонение, а также свойства ее околозвездной оболочки. В частности, ограничение цикличности возможных вариаций блеска помогло бы расширить теоретические исследования двойных систем с переносом массы на изучение структуры околозвездной среды.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Lamers, H.J., Zickgraf, F.J., de Winter, D., Houziaux, L., & Zorec, J. An improved classification of B[e]-type stars. *Astronomy and Astrophysics*, 340, 117–128 (1998).
- 2 Miroshnichenko, A.S. Towards understanding the B[e] phenomenon. I. Definition of the galactic FS CMa stars. *The Astrophysical Journal*, 667 (1), 497 (2007). <http://dx.doi.org/10.1086/520798>.
- 3 Swings, J.P., Allen, D.A. MWC 645 and MWC 819: Two Stars Resembling Eta Carinae. *Astrophysical Letters*, 14, 65 (1973).
- 4 Jaschek, M., Andrillat, Y., Jaschek, C. B[e] stars. III. MWC 645. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 120 (1), 99–105 (1996). <http://dx.doi.org/10.1051/aas:1996277>.
- 5 Swings, J.P., Andrillat, Y. Line widths in peculiar emission line objects. *Astronomy and Astrophysics*, 103, L3-L4 (1981).

- 6 Zickgraf, F.J. Kinematical structure of the circumstellar environments of galactic B[e]-type stars. *Astronomy & Astrophysics*, 408 (1), 257–285 (2003). <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20030999>.
- 7 Torres, A.F. et al. New insight into the FS CMa system MWC 645 from near-infrared and optical spectroscopy. *Galaxies*, 11 (3), 72 (2023). <http://dx.doi.org/10.3390/galaxies11030072>.
- 8 Tull, R.G., MacQueen, P.J., Sneden, C., & Lambert, D. L. The high-resolution cross-dispersed echelle white pupil spectrometer of the McDonald Observatory 2.7-m telescope. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 107 (709), 251 (1995). <http://dx.doi.org/10.1086/133548>.
- 9 Panchuk, V.E., Klochkova, V.G., Yushkin, M.V. The high-resolution Echelle Spectrograph of the 6-m telescope of the special astrophysical observatory. *Astronomy Reports*, 61 (9), 820–831 (2017). <http://dx.doi.org/10.1134/S1063772917080091>.
- 10 Manset, N., & Donati, J.-F., in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Vol. 4843, Proc. SPIE, ed. S. Fineschi, 2003, pp. 425–436
- 11 Donati, J.F., Semel, M., Carter, B.D., Rees, D.E., & Cameron, A.C. Spectropolarimetric observations of active stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 291 (4), 658–682 (1997). <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/291.4.658>.
- 12 Rudy, R.J., Puetter, R.C., Mazuk, S. Paschen lines and the reddening of the radio galaxy 3c 109. *The Astronomical Journal*, 118 (2), 666 (1999). <http://dx.doi.org/10.1086/300980>.
- 13 Herbig, G.H. The diffuse interstellar bands. IX-Constraints on the identification. *The Astrophysical Journal*, 407, 142–156 (1993). <http://dx.doi.org/10.1086/172500>.
- 14 Kos, J., Zwitter, T. Properties of diffuse interstellar bands at different physical conditions of the interstellar medium. *The Astrophysical Journal*, 774 (1), 72 (2013). <http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/774/1/72>.
- 15 Rudy, R., Erwin, P., Rossano, G.S., & Puetter, R.C. The 1.0-1.3 micron spectrum of LkH-alpha 101. *ApJ*, 383, 344–350 (1991). <http://dx.doi.org/10.1086/170792>.
- 16 Schlafly, E.F., Finkbeiner, D.P. Measuring reddening with Sloan Digital Sky Survey stellar spectra and recalibrating SFD. *The Astrophysical Journal*, 737 (2), 103 (2011). <http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/737/2/103>.
- 17 Green, G.M., Schlafly, E., Zucker, C., Speagle, J.S., & Finkbeiner, D. A 3D dust map based on Gaia, Pan-STARRS 1, and 2MASS. *The Astrophysical Journal*. 887 (1), 93 (2019). <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ab5362>.
- 18 Coluzzi, R. VizieR Online Data Catalog: Revised version of the ILLSS Catalogue (Coluzzi 1993–1999). *VizieR Online Data Catalog*, 1999, p.VI/71A.
- 19 Nodyarov, A.S. et al. VizieR Online Data Catalog: Toward Understanding the B [e] Phenomenon. IX (Nodyarov+, 2022). *VizieR Online Data Catalog*, 193, J/ApJ/936/129 (2024).
- 20 Klochkova, V.G., Chentsov, E.L. Detailed optical spectroscopy of the B[e] Star MWC17, *Astrophysical Bulletin*, 71(1), 33–42 (2016). <http://dx.doi.org/10.1134/S1990341316010041>.
- 21 Venturini, C.C., Rudy, R.J., Lynch, D.K., Mazuk, S., & Puetter, R.C. Near-Infrared Spectroscopy of Nova Sagittarius 1999 (V4444 Sagittarii). *The Astronomical Journal*, 124 (5), 3009 (2002). <http://dx.doi.org/10.1086/343832>.
- 22 Miroshnichenko, A.S., Levato, H., Bjorkman, K.S., Grosso, M., Manset, N., Men'shchikov, A.B., Rudy, R.J., Lynch, D.K., Mazuk, S., Venturini, C.C., Puetter, R.C., Perry, R.B. Properties of galactic B[e] supergiants-III. MWC 300. *Astronomy & Astrophysics*, 417 (2), 731–743 (2004).
- 23 Zickgraf, F.J. New spectroscopic observations of the B[e]/K binary system MWC 623. *Astronomy & Astrophysics*, 375 (1), 122–129 (2001). <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20010812>.
- 24 Allen, D.A., Swings, J.P. The spectra of peculiar Be stars with infrared excesses. *Astronomy and Astrophysics*, 47, 293–302 (1976).
- 25 Gray, R.O., Corbally, C.J. The calibration of MK spectral classes using spectral synthesis. 1: The effective temperature calibration of dwarf stars. *The Astronomical Journal*, 107, 742–746 (1994). <http://dx.doi.org/10.1086/116893>.

¹*Нодяров А.С.,

PhD, ORCID ID: 0000-0002-0045-5457,

*e-mail: nodyarov.atilkhan@gmail.com

²Расылова А.Е.,

PhD, ORCID ID: 0000-0001-6964-8444,

e-mail: rassylova.ainash@gmail.com

¹Омар А.Ж.,

PhD, ORCID ID: 0000-0002-5604-3742,

e-mail: omaruzhan@gmail.com

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан²Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы қ., Қазақстан

MWC645 ЖҰЛДЫЗЫНЫҢ СПЕКТРЛІК ТАЛДАУЫ

Аңдатпа

Бұл жұмыста жеткіліксіз зерттелген FS CMa типті нысандардың бірі – MWC 645 жұлдызына жүргізілген жоғары рұқсатты спектроскопиялық бақылаулардың нәтижелері ұсынылған. Бұл типтегі жұлдыздар күшті эмиссиялық сызықтарымен және жұлдыз маңындағы шаңның әсерінен пайда болатын инфрақызыл артық сәулеленуімен сипатталады. Алғаш рет бұл жүйеде салқын екінші компонент анықталды. Екі компоненттің де негізгі параметрлері анықталды: ыстық (B-типті) жұлдыз үшін тиімді температура $18\,000 \pm 2000$ К және жарқырауы $\log(L/L_{\odot}) = 3.9 \pm 0.4$; ал салқын (K-типті) жұлдыз үшін $T_{\text{eff}} = 4250 \pm 250$ К және $\log(L/L_{\odot}) = 3.1 \pm 0.4$. Жүйе 6.5 ± 0.9 кпк қашықтықта орналасқан және белсенді өзара әрекеттесудің айқын белгілерін көрсетеді. Бұл белгілер көптеген эмиссиялық сызықтардың күрделі профильдері арқылы байқалатын зат алмасу үдерістерімен түсіндіріледі. Алынған нәтижелер MWC 645 жұлдызының қосжұлдыздық табиғатын және оның FS CMa типіне жататынын растайды. Бұл жұмыс жүйенің параметрлерін нақтылау, сондай-ақ оның жұлдыз маңындағы ортасының құрылымы мен шығу тегін тереңірек түсіну үшін әрі қарайғы бақылаулардың қажеттілігін көрсетеді.

Тірек сөздер: жұлдыздар, қос жұлдыздар, спектралды қос жұлдыздар, Be жұлдыздар, эмиссиялық сызықты жұлдыздар.

¹*Nodyarov A.S.,

PhD, ORCID ID: 0000-0002-0045-5457

*e-mail: nodyarov.atilkhan@gmail.com

²Rassylova A.E.,

PhD, ORCID ID: 0000-0001-6964-8444

e-mail: rassylova.ainash@gmail.com

¹Omar A.Zh.,

PhD, ORCID ID: 0000-0002-5604-3742

e-mail: omaruzhan@gmail.com

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan²Kazakh National Women's Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan

SPECTRAL ANALYSIS OF THE STAR MWC 645

Abstract

This study presents results of high-resolution spectroscopic observations of the star MWC 645, a representative of the poorly studied FS CMa-type objects. These stars are characterized by strong emission lines and significant infrared excess caused by circumstellar dust. For the first time, a cool secondary component has been detected in this system. Fundamental parameters were determined for both components: for the hot (B-type) star, an effective

temperature of $18,000 \pm 2000$ K and luminosity $\log(L/L_{\odot}) = 3.9 \pm 0.4$; and for the cool (K-type) star, $T_{\text{eff}} = 4250 \pm 250$ K and $\log(L/L_{\odot}) = 3.1 \pm 0.4$. The system is located at a distance of 6.5 ± 0.9 kpc and shows clear signs of active interaction, including ongoing mass transfer indicated by the complex profiles of many emission lines. The results confirm the binary nature of MWC 645 and its classification as an FS CMa-type object. This work highlights the need for further observations to refine the system's parameters and improve our understanding of the structure and origin of its circumstellar environment.

Keywords: stars, binary stars, spectroscopic binary stars, Be stars, Emission line stars.

Дата поступления статьи в редакцию: 17.07.2025