

# ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ НЕОБЫЧНОЙ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ЗВЕЗДЫ КЛАССА В HD 119608

© 2018 Т. Шахин\*

Факультет науки, университет Акдениз, Анталия, 07058 Турция

Поступила в редакцию 25 сентября 2017 г.; принята в печать 17 октября 2017 г.

В статье представлен ЛТР-анализ оптических эшелле спектров высокого разрешения высокоширотного В11b-сверхгиганта HD 119608, полученных на 3.9-метровом Англо-Австралийском Телескопе (ААТ) с помощью спектрографа UCLES. Новое определение атмосферных параметров при помощи ЛТР-моделей атмосфер с покровным эффектом и спектральное моделирование дало  $T_{\text{eff}} = 23\,300 \pm 1000$  К,  $\log g = 3.0 \pm 0.3$ , микротурбулентную скорость  $\xi = 6.0 \pm 1.0$  км с<sup>-1</sup> и  $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.16$ . Скорость вращения звезды получена по линиям С, О, N, Al и Fe и составляет  $v \sin i = 55.8 \pm 1.3$  км с<sup>-1</sup>. Химическое содержание было определено для десяти разных элементов. Содержание He, Al и P было определено для звезды впервые. По спектрам были исследованы статус post-AGB и свойства звезды населения I. Приблизительно солнечное содержание углерода и кислорода, а также небольшой избыток гелия и азота говорят не в пользу гипотезы о том, что состав атмосферы был сформирован в результате переработки CNO, из чего следует, что звезда принадлежит горячим post-AGB объектам. ЛТР-анализ химического состава также указывает на солнечное содержание серы и немного повышенное — магния. Усредненные содержания В-карликов в хорошо изученных OB-ассоциациях и звезд населения I поразительно схожи с составом, полученным для HD 119608 в данной работе. Это может свидетельствовать о том, что звезда является «беглянкой».

Ключевые слова: *звезды: магнитное поле — звезды: химически пекулярные — звезды: индивидуальные: HD 119608*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Атмосферные параметры большинства молодых В-звезд в рассеянных скоплениях (т.е. звезд населения I) говорят об их post-AGB природе. Спектры эти звезд идентичны звездам ранних типов, находящимся на высоких галактических широтах (т.е. горячим звездам после асимптотической ветви гигантов (post-AGB)).

Будучи высокоширотным сверхгигантом, принадлежащим гало, HD 119608 — одна из тех интересных для изучения звезд, эволюционная стадия которой пока плохо установлена. В МК-классификации звезде приписан статус В11b, т.е. сверхгиганта [1]. Звезда впоследствии изучалась на предмет обнаружения профилей линии на 21 см в направлении по лучу зрения [2]. Профиль линии с максимальной яркостной температурой  $T_b > 30$  К предполагает очень высокую скорость, которую нельзя объяснить только галактическим вращением.

В исследовании пространственного распределения 165 звезд раннего типа на средних и высоких

галактических широтах была получена фотоэлектронная фотометрия HD 119608 в линии H $\beta$  [3]. Звезда была, по-видимому, включена в Таблицу 2 в работе [3] для известных и подозреваемых звезд низкой светимости на основании нескольких критериев, включающих в себя избыток цвета, скорость и положение. Из-за своей высокой лучевой скорости и  $M_V = -6^m$  HD 119608 не удовлетворяет критериям низкой светимости.

Опубликованные в литературе расстояния до звезды варьируются от 3.4 до 4.4 кпк [2, 4–6].

HD 119608 была включена в выборку из 17 кандидатов в горячие post-AGB звезды, для которых были получены наблюдения в ИК-диапазоне. У звезды не обнаружено<sup>1</sup> избытка ИК [9].

Звезда также наблюдалась в рамках обзора Edinburgh-Cape Blue Object Survey в зоне наблюдений I (северная галактическая шапка) и имеет каталожный идентификатор

<sup>1</sup>Следует отметить, что цвета 2MASS для звезды явно показывают ИК-избыток (см. также Таблицу 1), и звезда, по-видимому, имеет небольшой избыток в полосе  $L'$  фотометрии UKIRT (для сравнения см. Рис. 2 в [9]).

\*E-mail: timursahin@akdeniz.edu.tr

**Таблица 1.** Основные параметры HD 119608, включая индексы Стремгrena и джонсоновскую и женевскую фотометрию звезды

HD 119608	$\alpha(2000)$	$\delta(2000)$	$l$	$b$	Sp.Type	$V$	$B$	$E(B - V)$
	13 <sup>h</sup> 44 <sup>m</sup> 31 <sup>s</sup> .31	-17°56'13"2	320°35	43°13	B1Ib	7.51 <sup>1</sup>	7.43	0.16 <sup>2</sup>
Strömgen	$m_1$	$c_1$	H $\beta$	$(b - y)$				
	0.033 <sup>3</sup>	-0.014 <sup>3</sup>	2.554 <sup>3</sup>	0.021 <sup>3</sup>				
Geneva Phot. <sup>a</sup>	$U$	$V$	$B_1$	$B_2$	$V_1$	$G$	$V_M$	
	0.360	1.038	0.792	1.579	1.730	2.238	7.509	

Notes: 1: [7]; 2: [4]; 3: [8]; <sup>a</sup>: Женевский фотометрический каталог <http://obswww.unige.ch>.

EC13418-1741 [10]. Этот обзор южного неба, направленный на обнаружение голубых звездных объектов на высоких галактических широтах, подтвердил спектральный класс HD 119608 как B1 (т.е.  $B - V = -0.06$ ,  $U - B = -0.87$ ). Для этого были использованы  $UBV$  (фотоэлектронная) фотометрия и спектроскопия среднего разрешения.

В исследовании, посвященном выяснению химического состава В-звезд, находящихся над галактической плоскостью, HD 119608 была включена в список как post-AGB звезда [11]. Расчет эффективной температуры по женевской фотометрии и поверхностного ускорения силы тяжести по профилям Бальмеровских линий привел к следующим модельным параметрам:  $T_{\text{eff}} = 26413$  K,  $\log g \approx 4.1$  dex.

Во время мониторинга периодических вариаций линии  $H\alpha^2$  для выборки ярких OB-сверхгигантов (O7.5–B9) были получены  $T_{\text{eff}}$  и  $\log g$  звезды: 20 260 K и 4.9 соответственно [12]. Однако данные были слишком скудными для того, чтобы сделать вывод о потенциальном периодическом изменении линии  $H\alpha$  у HD 119608, т.е. о наличии крупномасштабных ветровых структур.

В данной работе мы определяем новый химический состав HD 119608 — высокоширотного сверхгиганта класса В — по оптическому эшелле спектру высокого разрешения. Помимо исследования модельных параметров, принятых для звезды в более ранних работах (указанных выше), по химическому составу мы делаем попытку определить класс объекта из литературы, как В-звезды населения I и В-сверхгиганта избранных OB ассоциаций. Статья организована следующим образом: в Разделе 2 обсуждается оптический

спектр высокого разрешения полученный в Англо-Австралийской обсерватории и процесс обработки спектра; в Разделе 3 описан анализ химического состава; обсуждение химического состава и эволюционного статуса HD 119608 приводится в Разделе 4; в Разделе 5 приводится заключение.

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Оптический синий спектр HD 119608 высокого разрешения ( $\lambda/\Delta\lambda \approx 48000$ ) был получен с помощью эшелле спектрографа университетского колледжа Лондона (UCLES [13]) на Англо-Австралийском телескопе (AAT) 29 июля 1999 г. (HJD 2451388.886). Конфигурация UCLES использует решетку с 31.6 штрихами на мм, тонкую ПЗС-матрицу Tektronix (1024 × 1024; размер пикселя 24  $\mu$ ) и ширину щели 0.70 мм. Центральная длина волны 4307 Å, спектральный диапазон от 3847 до 5010 Å. До и после пятиминутной экспозиции звезды<sup>3</sup> снималась экспозиция торий-аргоновой (Th-Ar) лампы для калибровки по длинам волн. Средняя остаточная разность полученной калибровочной кривой по экспозициям Th-Ar составляла менее 0.02 Å. Плоские поля были сняты с помощью кварцевой лампы непрерывного спектра.

Обработка наблюдений производилась в пакете программ редукции STARLINK ECHOMOP [14]. Предварительная обработка ПЗС-изображения проводилась традиционным образом и включала в себя обрезку полезной части кадра, вычет bias, учет плоского поля и удаления следов космических частиц. Кадр UCLES необходимо было повернуть и отразить в направлении дисперсии для обработки

<sup>2</sup>по спектру с обратной дисперсией 1.54 Å pix<sup>-1</sup>.

<sup>3</sup>seeing составлял 1"1.

в ЕСНОМОР, индивидуальные порядки были найдены и аппроксимированы полиномами по центрам тяжести с разбросом менее 0.5 пикселя. За определением щели следовало создание комбинированного bias и вычитание полного плоского поля. Размер деккера был выбран наиболее широким для покрытия каждого индивидуального порядка и соответствующего участка неба на кадре по изображениям плоского поля. С помощью мастер-изображения плоского поля были также смоделированы каналы неба и объекта. После вычета неба и калибровки длин волн двумерное изображение спектра было экстрагировано оптимальным образом для получения наилучшего отношения  $S/N$ , где каждый порядок представлен одним рядом. Нормализация континуума и «сшивание» порядков были выполнены в LIME [15], где мы получили одномерный единый спектр с нормализованным континуумом. Лучевая скорость звезды была измерена по нескольким элементам, таким как C, N, O, Al, Si, P и Fe. Первые три элемента дают примерно 53, 49 и 52 км с<sup>-1</sup> соответственно, линии Al, Si, P и Fe показали приблизительно 57 км с<sup>-1</sup>. Средняя лучевая скорость составила  $55.0 \pm \pm 1.3$  км с<sup>-1</sup>. Однако было отдано предпочтение лучевой скорости, измеренной по линиям Fe,  $57.0 \pm \pm 1.4$  км с<sup>-1</sup>, которое наилучшим образом соответствует модели; гелиоцентрическая лучевая скорость звезды составляет  $V_{\text{HEL}} = 28.0 \pm 1.4$  км с<sup>-1</sup> ( $V_{\text{LSR}} = 31.9 \pm 1.4$  км с<sup>-1</sup>). Эта лучевая скорость согласуется со значениями ( $26.0 \pm 4.4$  км с<sup>-1</sup>) [16] и ( $31.0 \pm 1.0$  км с<sup>-1</sup>) [17] в пределах ошибок.

### 3. АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА: МОДЕЛИ АТМОСФЕР, ПАРАМЕТРЫ ЗВЕЗДЫ И СОДЕРЖАНИЯ

Мы выполнили ЛТР-анализ с учетом покровного эффекта для выяснения состава фотосферы звезды, используя как предварительно вычисленные, так и новые сетки моделей атмосфер с различным химическим составом. Модельные сетки были рассчитаны программой Armagh Stellar Model Atmosphere Code STERNE [18], которая вычисляет ЛТР-модели в предположении плоскопараллельной атмосферы, а также гидростатического и лучистого равновесий. Данная версия кода STERNE вычисляет модель структуры звездных атмосфер для горячих звезд с эффективными температурами от 10 000 К до 35 000 К и использует данные Opacity Project (например, сечения фотоионизации) для непрерывных непрозрачностей. Атомные несвободно-свободные непрозрачности взяты из ATLAS и дополнены таблицами для углерода и азота [19]. Для учета непрозрачностей в линиях были использованы функции распределения

непрозрачности, как в ATLAS6. Ретротермический эффект, вызванный покровным эффектом, модифицирует атмосферу и учитывается в STERNE. Уравнение переноса излучения решается методом Фотрие [20] с температурой, скорректированной методом Unsold-Lucy [21]. Теоретические смоделированные спектры высокого разрешения для конкретной модели атмосферы из STERNE в заданном диапазоне длин волн были получены с помощью программы синтеза ЛТР-спектров SPECTRUM [22]. Программа SPECTRUM использует сечения из Opacity Project для вычислений несвободно-свободных непрозрачностей. При заданной модели атмосферы она также может быть использована для вычисления содержания ионов по индивидуальным линиям заданной эквивалентной ширины и микротурбулентной скорости ( $\xi$ ). При вычислении теоретических синтетических спектров в программе SPECTRUM профили линий нейтрального водорода вычислялись из таблиц уширения [23, 24], профили линий гелия He I 4026, 4388, 4471 и 4922 Å — из [25–27], а He I 4009 и 4144 Å — из [28, 29], тогда как остальные линии гелия вычислялись как профили Фойгта. Профили линий ионизованного гелия вычислялись по таблицам уширения из [30]. Линии металлов в нормированном спектре рассчитывались как профили Фойгта. Были также учтены радиационные, ударные и доплеровские уширения, а также уширения, вызванные микротурбулентией.

В процессе определения химического состава сильные линии продемонстрировали большее отклонение от ЛТР по сравнению со слабыми линиями (например, [31]), и, в целом, при подходе полного спектра к определению химического состава в данной работе с использованием программ SPECTRUM и/или SFIT (см. Раздел 3.3) влияние индивидуальных линий на результат ожидается минимальным. Столь же важно отметить, что, как показано в [32, 33], ЛТР-содержания для В-звезд должны быть согласованы с соответствующими не-ЛТР значениями в пределах 0.2 dex. С другой стороны, в большинстве случаев модели строго ЛТР-атмосфер не принимают во внимание рассеяние, которое учитывается в программе Armagh Stellar Atmosphere. Таким образом, программы ЛТР, используемые анализа модели атмосферы HD 119608 в настоящей работе, следует рассматривать не как строго ЛТР, а частично не-ЛТР. И, конечно, следует подтвердить результат моделями не-ЛТР атмосфер. В следующих подразделах мы детально комментируем процедуры определения эквивалентных ширин, начальных модельных параметров из фотометрии, а также созданию модельных сеток методом минимизации  $\chi^2$  в программе SFIT. Мы также кратко описываем

вычисление температуры по Бальмеровским линиям, вычисление микротурбулентных скоростей и скоростей вращения, а также тесты, проведенные с целью проверки модельных параметров и содержания гелия прежде чем делать наши заключения по поводу состава HD 119608 и ее соответствующего эволюционного статуса в Разделе 4.

### 3.1. Отождествление линий и измерение эквивалентных ширин

Отождествление линий было проведено обычным образом, как описано в [34]. Стандартная процедура состоит в рассмотрении спектра и определении наличия компонентов заданного мультиплета и их подходящей относительной интенсивности. Также ищутся линии со схожими потенциалами возбуждения и лабораторными интенсивностями.

Мы провели измерения эквивалентных ширин (EW), несмотря на то, что для анализа содержания HD 119608 был использован подход полного спектра, и некоторые отождествленные линии оказались сильно блендированы. EW были измерены тем же способом, что и в [34], и сравнивались со

значениями, полученными в LIME [15]. Результаты согласовывались в пределах  $4 \text{ m}\text{\AA}$ . Мы воспользовались аппроксимацией гауссовыми профилями для измерения EW, локальный континуум был аппроксимирован полиномом первого порядка. Для сильных линий использовалось прямое интегрирование. Ошибки измерений EW были определены в соответствии с методом, описанным в [35].

Из-за блендирования мы не приводим содержания в линиях, полученных в результате анализа EW, но так как, насколько нам известно, в литературе нет опубликованных списков линий HD 119608, мы решили привести список линий для звезды. Это решение было также связано с тем, что большинство В-звезд не содержит такого большого количества спектральных линий, как у HD 119608, поэтому мы оставили даже отождествленные блендированные линии в наших списках. Список линий для отождествленных переходов с измеренными эквивалентными ширинами приводится в Таблице 2 с комментариями в сносках; эквивалентные ширины сильно блендированных линий не приводятся в списках.

Таблица 2. Отождествленные линии HD 119608

Тип	$\lambda$ , $\text{\AA}$	Мультиплет	EW, $\text{m}\text{\AA}$	Комментарии
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
O II	3911.96	17	$115 \pm 6$	...
C II	3918.97	4	...	bl
C II	3920.67	4	...	bl
Si III	3924.44	a	...	bl He II(4)3923.48
He I	3926.53	...	...	bl
S III	3928.62	8	...	...
Ca II	3933	...	...	int
O II	3945.048	6	$123 \pm 8$	
O II	3954.37	6	...	bl
He I	3964.72	...	...	bl
Ca II	3968	...	...	int
O II	3973.26	6	...	...
O II	3982.71	6	...	bl S III(8)
S III	3985.97	8	...	...
N II	3994.99	12	$249 \pm 6$	...
He I	4009.27	...	$271 \pm 5$	...
He I	4023.97	...	...	bl He I
He I	4026.18	...	$770 \pm 7$	bl He I
N II	4035.08	39	$55 \pm 4$	...
N II	4041.31	39	$79 \pm 4$	...

Таблица 2. (Продолжение)

Тип	$\lambda$ , Å	Мультиплет	EW, mÅ	Комментарии
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
N II	4043.53	39	$56 \pm 5$	...
O II	4048.21	50	$11 \pm 3$	...
O II	4062.94	50	...	bl O II(97)
O II	4069.89	10	...	...
O II	4072.16	10	...	bl O II(10)
O II	4075.86	10	...	bl O II(10)
O II	4078.84	10	...	bl O II(10)
O II	4085.11	10	...	bl O II(48)
O II	4087.15	48	...	bl O II(48)
Si IV	4088.86	48	...	bl O II(48)4089.29
O II	4092.93	10	...	...
N III	4097.33	1	...	bl H $\delta$ +O II(20,48)
O II	4105.0	20	...	bl H $\delta$
O II	4110.78	20	...	w + bl H $\delta$ , O II(21)
Si IV	4116.22	1	$73 \pm 5$	...
O II	4119.22	20	...	bl He I
He I	4120.84	...	...	bl O II(20)
S III	4128.05	3	...	bl O II(19)
S III	4130.88	3	...	bl
O II	4132.8	19	...	bl N II(43.01)
He I	4143.76	...	$474 \pm 9$	Fe III(119,232) on bw
Al III	4150.0	5	...	bl A III(5)
O II	4153.30	19	$133 \pm 4$	bl S II(44)4153.09
O II	4156.53	19	$43 \pm 4$	...
S II	4162.69	44	...	bl C III(21)
Fe III	4164.73	118	$52 \pm 5$	bl Fe III(232,118)
Fe III	4166.86	118	$12 \pm 4$	bl Fe III(118) 4164.73
He I	4168.97	52	$99 \pm 4$	...
N II	4171.6	43	$27 \pm 3$	...
N II	4176.16	43	...	bl Fe III(232)
N II	4179.67	50	...	...
O II	4185.45	36	$102 \pm 4$	...
O II	4189.79	36	$110 \pm 4$	...
N III	4195.76	6	...	bl O II(42)
He II	4199.87	...	...	bl N III(6)
P III	4222.15	3	$69 \pm 5$	...
N II	4227.74	33	$60 \pm 5$	...
N II	4236.91	48	$109 \pm 7$	...

Таблица 2. (Продолжение)

Тип	$\lambda, \text{Å}$	Мультиплет	EW, mÅ	Комментарии
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
N II	4241.78	48	$107 \pm 6$	...
P III	4246.7	3	$18 \pm 4$	...
S III	4253.59	4	$202 \pm 7$	bl O II(101)
C II	4267.15	6	$295 \pm 6$	...
O II	4273.10	68	...	*
O II	4275.99	68	...	bl + *
O II	4276.75	54, 67	...	bl + *
O II	4281.32	54	...	bl
O II	4282.96	54	...	bl
S III	4284.99	4	...	bl O II(78)4285.70
O II	4288.82	54	...	...
O II	4294.79	54	...	bl
O II	4303.82	54	$113 \pm 10$	...
O II	4307.23	53	...	bl
O II	4313.44	78	...	...
O II	4317.14	2	...	...
O II	4319.63	2	...	...
O II	4325.76	2	...	bw H $\beta$
S III	4332.71	4	...	bw H $\beta$ +O II(65)4332.71
O II	4345.56	2	...	rw H $\beta$
O II	4347.42	16	$45 \pm 3$	bl O II(2)
O II	4349.43	2	...	rw H $\beta$
O II	4351.26	16	...	bl O II(2)
S III	4361.53	4	...	...
O II	4366.89	2	...	bl
O II	4378.03	102	...	t + bl
O II	4378.41	102	...	t + bl
He I	4387.93		$459 \pm 9$	...
Fe III	4395.78	4	...	id:O II 4395.95(26)
O II	4414.90	5	...	bl O II(5)
O II	4416.97	5	...	bl O II(5)+Fe II(27)+Fe III(4)
He I	4437.55	50	$94 \pm 5$	...
O II	4448.21	35	...	bl N II 4447.03(15)
O II	4452.37	5	$73 \pm 5$	...
He I	4471.50		$910 \pm 11$	...
Mg II	4481.21		$259 \pm 7$	bl A III 4479.89(8)
O II	4489.49	86	...	bl t+A III(7)+O II(86)
O II	4491.25	86	...	bl O II(86)

Таблица 2. (Продолжение)

Тип	$\lambda$ , Å	Мультиплет	EW, mÅ	Комментарии
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Al III	4512.54	3	$57 \pm 4$	...
Al III	4529.20	3	$169 \pm 6$	bl A III(3)+N II(59)
Si III	4552.6	2	$447 \pm 6$	...
Si III	4567.8	2	$405 \pm 5$	...
Si III	4574.8	2	$245 \pm 5$	...
O II	4590.97	15	$202 \pm 5$	...
O II	4596.18	15	$142 \pm 4$	...
N II	4601.48	5	$108 \pm 4$	...
N II	4607.16	5	$76 \pm 4$	bl O II 4609.42(93)
O II	4609.42	93	$61 \pm 5$	bl N II 4607.16(5)
N II	4613.87	5	$93 \pm 5$	...
C II	4619.23	50	...	id **
N II	4621.39	5	...	bl O II 4621.24(92)
N II	4630.54	5	$199 \pm 5$	...
N II	4634.14	2	...	t
O II	4638.86	1	...	bl C II(12.01)
O II	4641.81	1	...	bl O II(1)+N III(2)
O II	4649.13	1	...	bl O II(1)+C III(1)
O II	4650.84	1	...	bl O II(1)
Si IV	4654.14	7	...	...
O II	4661.64	1	$198 \pm 5$	...
O II	4673.73	1	...	bl O II(1)
O II	4676.24	1	...	bl O II(1)
O II	4696.4	1	...	bl O II(25)
O II	4699.22	25	...	bl
O II	4705.35	25	...	bl
O II	4710.0	24	...	bl
He I	4713.17	...	...	bl S II(9)
Si III	4716.65	b	...	bl He I+S II(9)
O II	4751.3	24	...	...
N II	4779.7	20	$26 \pm 3$	...
N II	4788.13	20	$54 \pm 4$	...
N II	4803.29	20	$86 \pm 3$	...
Si III	4813.30	9	$70 \pm 3$	...
S II	4815.51	9		bl Si III(9)
Si III	4819.7	9	$87 \pm 3$	...
Si III	4828.96	9	$103 \pm 3$	...
S II	4885.6	15	$24 \pm 3$	...

Таблица 2. (Продолжение)

Тип	$\lambda$ , Å	Мультиплет	EW, mÅ	Комментарии
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
O II	4890.86	28	$52 \pm 3$	...
O II	4906.83	28	$68 \pm 5$	...
S II	4917.2	15	...	bl He I
He I	4921.93	...	...	bl S II(15)
O II	4924.6	28	...	bl S II(7)
O II	4941.07	33	...	bl
O II	4943.00	33	...	bl
O II	4955.8	33	$16 \pm 4$	...

bl — линия блендирована;

bw — на синем крыле другой линии;

gw — на красном крыле другой линии;

id — отождествление сомнительно;

t — линия слишком слаба;

int — межзвездное происхождение;

\* — O II 4273.10, 4275.99 мульт. номер: 68, O II 4276.75 мульт. номер: 54, 67 блендированы/не разрешены;

\*\* — [36]; a, b — согласно [37], линия не классифицирована. В каталоге ILLSS (Список отождествленных линий в звездных спектрах) [38] нет конкретного номера мультиплета для линии. Также отмечены линии N II 4432.73 и 4433.48 (мульт. номер 55), которые являются блендой. Они видны в спектре, но не приведены в таблице. Линия O II 4443.05 (35) блендирована с N II 4441.99 (55) и не включена в таблицу.

### 3.2. Фотометрия

До проведения спектрального анализа оценку атмосферных параметров можно произвести по фотометрии. Калибровка цветов ( $B - V$ ) с учетом покраснения из [39] и [40] дает грубую оценку  $T_{\text{eff}} \approx 23\,200$  К с  $E(B - V) = 0.16$  из [4] и ошибкой  $\sigma = 4\%$  для  $T_{\text{eff}}$  для дальнейшей калибровки.

Соотношение цвет–температура системы Стремгrena из [40] для показателя цвета ( $u - b$ ), свободного от покраснения, дало  $27\,032 \pm 810$  К.

Попытка использовать  $ubvy\beta$ -фотометрию [8] звезды для измерения эффективной температуры методами Муна [40, 41] дала  $T_{\text{eff}} \approx 19\,400$  К<sup>4</sup>, тогда как изначальное значение  $T_{\text{eff}}$  из первой работы было скорректировано формулой, приведенной в [40]. Данное значение температуры близко к верхнему пределу для звезд, которые используются как температурные стандарты при калибровке, включающей в себя звезды B2–G0 ( $20\,000$  К  $> T_{\text{eff}} > 6000$  К).

Женевская фотометрия звезды (см. Таблицу 1) также использовалась для оценки температуры и

поверхностного ускорения силы тяжести при помощи соотношения из [42]. Эта фотометрическая система очень похожа на фотометрическую систему  $ubvy\beta$ , но она не чувствительна к межзвездному покраснению в случае В-звезд. Соотношение из [42] основано на параметрах  $X$  и  $Y$ , свободных от покраснения, и дает  $T_{\text{eff}} = 26\,413 \pm 891$  К и  $\log g = 4.1 \pm 0.6$  (т.е.  $X = 0.192$  и  $Y = 0.002$ ). Однако, следует быть осторожным при таком высоком значении  $T_{\text{eff}}$ , так как только 7 из 30 звезд, используемых для составления сетки данной калибровки имеют температуру более 20 000 К.

Таким образом, фотометрия дает не единственное значение, а целый диапазон температур  $T_{\text{eff}} = (19\,000 - 27\,000$  К), который может быть использован в качестве начального значения в спектральном анализе. Этот диапазон также включает температуру, предполагаемую для спектрального класса HD 119608 (B1b), приблизительно 21 000 К.

### 3.3. Минимизация $\chi^2$

Метод минимизации  $\chi^2$  используется для измерения соответствия между теоретическими и наблюдательными спектрами, наилучший набор модельных параметров для звезды был получен нами этим методом. Для анализа HD 119608 была

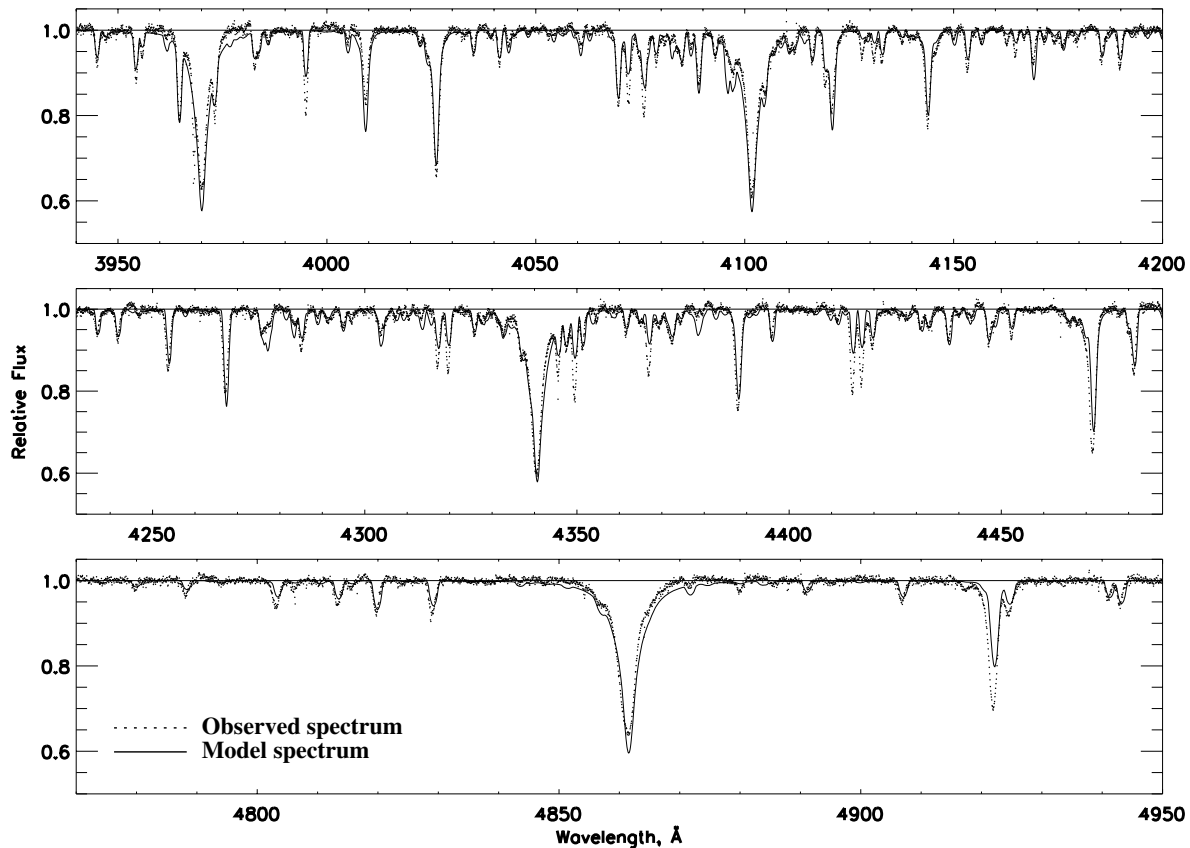
<sup>4</sup>Та же калибровка дала следующие цвета стремгреновской системы, скорректированной за покраснение, для звезд:  $c_0 = -0.030$ ,  $m_0 = 0.061$ ,  $(b - y)_0 = -0.065$  и  $E(b - y) = 0.086$ .



**Таблица 3.** Параметры атмосферы HD 119608. Также приведены модельные параметры из предыдущих исследований

$T_{\text{eff}}$ , К	$\log g$ , $\text{cm s}^{-2}$	$\xi$ , $\text{km s}^{-1}$	$v \sin i$ , $\text{km s}^{-1}$	$v_{\text{HEL}}$ , $\text{km s}^{-1}$	Ссылка
$23\,300 \pm 1000$	$3.0 \pm 0.3$	$6.0 \pm 1.0$	$55.8 \pm 1.3$	$28.0 \pm 1.4$	Эта работа
24 000	3.0	...	...	...	CON92
26 413	4.1	15	50	...	MAR04
20 260	4.9	...	74	...	MOR04
19 900	2.7	16	$59.0 \pm 9.0$	$31.0 \pm 1.0$	McE17

CON92: [44]; MOR04: [12]; MAR04: [11]; McE17: [17]

**Рис. 1.** Спектр AAT/UCLES звезды HD 119608 вместе с наилучшей аппроксимацией (сплошная линия):  $T_{\text{eff}} = 23\,000 \pm 1000$  К,  $\log g = 3.0 \pm 0.3$  dex и  $n_{\text{He}} = 0.14$ . Решение получено по сетке моделей с  $[\text{Fe}/\text{H}] = 0$  с помощью опции solve в программе SFIT.

определена сетка модельных спектров при помощи программы расчета звездных атмосфер SFIT [43]. SFIT ищет наиболее подходящее решение для сетки спектров с помощью опции SOLVE, используя минимизацию  $\chi^2$ . В обычном цикле программы SFIT несколько частей спектра аппроксимируются одновременно. В итеративном процессе аппроксимации в качестве метода оптимизации парамет-

ров был использован метод Нелдера–Мида для определения  $T_{\text{eff}}$ ,  $\log g$  и  $n_{\text{He}}$  (относительное содержание гелия) одновременно (в первом цикле). Алгоритм Амоева ищет минимальное значение  $\chi^2$  между наблюдаемым и синтетическим спектром. Затем значение  $n_{\text{He}}$  фиксируется, а  $T_{\text{eff}}$  и  $\log g$  подбираются вместе в финальной итерации. Затем, пользуясь моделью атмосферы с подобранными

параметрами, мы вычисляли содержания неосновных элементов. В подходе полного спектра влияние индивидуальных линий на определение состава ожидается минимальным. Только по этой причине некоторые области наблюдаемого спектра были исключены из анализа. В качестве альтернативного метода оптимизации параметров в SFIT можно также использовать метод Левенберга–Марквардта. Программа измеряет  $T_{\text{eff}}$  по относительным интенсивностям линий гелия и ионизационному балансу всех элементов, представленных в спектре (например, N II/III, Si II/III/IV). Также SFIT одновременно вычисляет  $n_{\text{He}}$  по интенсивностям линий водорода и гелия.  $\log g$  измеряется по профилям линий водорода и гелия (например, линии со штарковским уширением). Таким образом, сетка из 24 модельных спектров была вычислена для  $T_{\text{eff}} = 15\,000, 18\,000, 20\,000, 22\,000, 24\,000$  и  $25\,000$  К,  $\log g = 2.5(0.5)4.0$  и  $n_{\text{He}} = 0.10$  и  $0.50$  в диапазоне длин волн  $3900\text{--}5100$  Å. Для определения верхнего и нижнего пределов эффективной температуры для сетки мы рассмотрели диапазон  $T_{\text{eff}}$ , полученный по фотометрическим калибровкам (см. Раздел 3.2). Сетка содержит модели с  $\xi = 5.0$  км с<sup>-1</sup>; в начальной сетке мы пользовались моделями солнечной металличности. Все модели, использованные в нашем анализе, были вычислены в ЛТР-приближении.

Модельные атмосферные параметры, полученные SFIT, следующие:  $T_{\text{eff}} = 23\,300 \pm 1000$  К,  $\log g = 3.0 \pm 0.3$  dex и  $n_{\text{He}} = 0.14$  (далее — наилучшая модель, Таблица 3). На Рис. 1 мы представляем наилучшую модель вместе с нормированным LIME-спектром звезды. Химический состав, вычисленный по этой модели, представлен в Таблице 4, а ошибки оценены путем измерения вариаций химического состава с учетом погрешностей  $T_{\text{eff}}$  и  $\log g$ . Металличность звезды была вычислена по содержанию Fe и равна солнечной ( $[\text{Fe}/\text{H}] \approx 0$ ). При расчете модели спектра HD 119608 была использована база атомных данных LTE LINES<sup>5</sup> [47].

### 3.4. Бальмеровские линии

Как было упомянуто в Разделе 3.3, несмотря на то, что опция SOLVE программы SFIT производит аппроксимацию профилей линий водорода и гелия с целью определения поверхностного ускорения силы тяжести, мы вычислили  $\log g$ , фиксируя определенные значения  $T_{\text{eff}}$  в диапазоне от

<sup>5</sup><http://www.arm.ac.uk/~csj/lines/lte/html/lines.lte.html>; LTE LINES является сборником атомных данных для абсорбционных линий элементов синей области оптического диапазона (4000–5000 Å) и подходит для ЛТР-анализа звезд раннего типа.

15 000 К до 26 000 К, чтобы найти теоретические профили, наилучшим образом аппроксимирующие линии H $\gamma$  и H $\delta$ . Профили рассчитывались с помощью ЛТР-кода SPECTRUM. На рис. 2 изображены наблюдаемый профиль и наилучший синтетический спектр (сплошная линия) с параметрами  $T_{\text{eff}} = 24\,000$  К и  $\log g = 3.0$  dex. Также показаны синтетические спектры для  $T_{\text{eff}} = 20\,000$  К и  $T_{\text{eff}} = 26\,000$  К — (альтернативных) моделей с комбинацией значений  $\log g = 2.0, 3.0$  и  $4.0$  dex. Эти альтернативные модели показывают (приблизительные) модельные параметры звезды, опубликованные в [11] ( $T_{\text{eff}} = 26\,000$  К и  $\log g = 4.0$  dex) и [17] ( $T_{\text{eff}} = 19\,900$  К и  $\log g = 2.7$  dex).

### 3.5. Микротурбулентная скорость ( $\xi$ )

Анализ синтетического спектра в программе SFIT при использовании сразу нескольких ионов дал значение  $\xi = 6.0 \pm 1.0$  км с<sup>-1</sup>. С теоретической точки зрения  $\xi$  должна быть одинаковой для всех элементов. Однако разброс, наблюдаемый между результатами по разным ионам и/или стадиям ионизации, иногда возможен. Мы использовали триплет Si III около 4550 Å (мультиплет номер 2) для проверки согласованности  $\xi$ . Авторы работы [48] используют тот же мультиплет для определения  $\xi$ . Мы нашли, что  $\xi = 5.0$  км с<sup>-1</sup> (Рис. 3). Таким образом, значение  $\xi = 6.0 \pm 1.0$  км с<sup>-1</sup> было использовано для вычисления наилучшей модели для HD 119608.

### 3.6. Скорость вращения ( $v \sin i$ )

Скорость вращения можно измерить, сравнивая синтетические профили линий<sup>6</sup> с наблюдаемыми. Дублет Mg II на 4481 Å является наиболее подходящим для определения проекции скорости вращения. Так как два компонента этого дублета на 4481.13 и 4481.33 Å не разрешены в спектре звезды, можно заключить, что HD 119608, скорее всего, является быстрым ротатором. Скорость вращения звезды была определена нами как  $v \sin i = 55.8 \pm 1.3$  км с<sup>-1</sup> по линиям C, O, N, Al и Fe (Таблица 5). Для проверки согласованности решения был использован мультиплет номер 9 триплета Si III около 4810 Å, где эффекты, связанные с нормировкой, минимальны. Согласие с вышеуказанным значением удовлетворительно. Это значение  $v \sin i$  также согласуется с [49]

<sup>6</sup>Синтетические профили линий были вычислены для заданных параметров модели атмосферы —  $T_{\text{eff}}$ ,  $\log g$  — и содержаний химических элементов звезды; они были свернуты с предполагаемой скоростью вращения.

**Таблица 4.** Итоговый состав, полученный с помощью опции SYNTH в программе SFIT. Фотосферные содержания HD 119608 приведены в виде  $\log n$ , нормированы на  $\log \Sigma \mu n = 12.15$  и сравнены с солнечными [45]

Элемент	Эта работа		Поп-I		(26 000, 3.0)		OB ассоц.		Солн.
	$\log \epsilon(X)$ , [dex]	[X/Fe], dex	$\log \epsilon(X)^1$ , [dex]	[X/Fe], dex	$\log \epsilon(X)$ , [dex]	[X/Fe], dex	$\log \epsilon(X)^2$ , [dex]	[X/Fe], dex	$\log \epsilon_{\odot}(X)$ , [dex]
He	$11.24 \pm 0.15$	0.15	...	...	$11.68 \pm 0.01$	-0.05	...	...	10.93
C	$8.41 \pm 0.18$	-0.18	$8.28 \pm 0.23$	-0.13	$8.72 \pm 0.01$	-0.51	$8.19 \pm 0.16$	-0.09	8.43
N	$8.03 \pm 0.10$	0.04	$7.98 \pm 0.36$	0.17	$8.53 \pm 0.01$	-0.10	$7.73 \pm 0.16$	0.05	7.83
O	$8.72 \pm 0.18$	-0.13	$8.55 \pm 0.17$	-0.12	$9.09 \pm 0.01$	-0.54	$8.59 \pm 0.12$	0.05	8.69
Mg	$7.99 \pm 0.03$	0.23	$7.56 \pm 0.26$	-0.02	$8.62 \pm 0.03$	0.22	$7.63 \pm 0.16$	0.18	7.60
Al	$6.30 \pm 0.16$	-0.31	$6.33 \pm 0.33$	-0.10	$6.90 \pm 0.02$	-0.35	$6.15 \pm 0.12$	-0.15	6.45
Si	$7.50 \pm 0.13$	-0.17	$7.37 \pm 0.19$	-0.12	$7.55 \pm 0.02$	-0.76	$7.23 \pm 0.13$	-0.13	7.51
P	$5.24 \pm 0.21$	-0.33	...	...	$5.24 \pm 0.00$	-0.97	...	...	5.41
S	$7.11 \pm 0.12$	-0.17	$7.34 \pm 0.40$	0.24	$7.40 \pm 0.02$	-0.52	$7.22 \pm 0.14$	0.25	7.12
Fe	$7.66 \pm 0.11$	0.00	$7.48 \pm 0.44$	0.00	$8.30 \pm 0.01$	0.00	$7.35 \pm 0.02$	0.00	7.50

<sup>1</sup> Отметим, что средний состав для контрольной выборки Популяции I из [11] в Таблице 7 той работы ошибочен. Скорректированные значения, вычисленные по содержанию в каждой линии, включены в соответствующую колонку таблицы выше.

<sup>2</sup> Содержания, полученные Дафлоном и др. [46] по 27 медленно вращающимся В-звездам, принадлежащим пяти OB-ассоциациям: Cyg OB3, Cyg OB7, Lac OB1, Vul OB1 и Cep OB3.

**Таблица 5.** Результаты измерений  $v \sin i$  по нескольким элементам в спектре HD 119608 программой SFIT

Тип	$v \sin i$ , км с <sup>-1</sup>	Тип	$v \sin i$ , км с <sup>-1</sup>
C	$58.4 \pm 0.5$	Si	$55.8 \pm 1.3$
N	$51.6 \pm 0.8$	P	$55.8 \pm 1.2$
O	$53.5 \pm 1.0$	Fe	$55.8 \pm 1.3$
Al	$55.8 \pm 1.2$		
Среднее: $55.8 \pm 1.3$			

и [4] (Таблица 3). Симон-Диаз и Херреро [50] нашли  $v \sin i = 46$  км с<sup>-1</sup> по синтетическим профилям, вычисленным для линии Si III 4552 Å. Следует отметить, что такой подход к поиску уширения вращением будет также зависеть от значения  $\xi$ . Влияние  $\xi$  на определение  $v \sin i$  было протестировано в программе SFIT. Фиксируя  $T_{\text{eff}}$  и  $\log g$  на определенных значениях, мы находили  $v \sin i$  и  $\xi$  одновременно. Далее,  $v \sin i$  фиксировалось для получения  $\xi$ . Та же процедура была повторена для  $v \sin i$ .

### 3.7. Проверка модельных параметров: надежность аппроксимации методом $\chi^2$

Мы использовали метод  $\chi^2$ , чтобы проверить параметры  $T_{\text{eff}}$  и  $\log g$  наилучшей модели. На первом шаге для нормированного спектра HD 119608 рассчитывался синтетический с помощью опции SOLVE в программе SFIT. При этом использовался интервал эффективных температур от 16 000 до 26 000 К с шагом в 1000 К. Значения температуры фиксировались, и, в свою очередь, проверялось значение  $\log g = 3.0$  dex. Значения  $\chi^2$ , полученные в данной процедуре, наносились на график в зависимости от значений температуры на диаграмме  $T_{\text{eff}} - \chi^2$  (Рис. 4), что дало некую кривую (параболу). Минимум этой кривой дает наиболее вероятный интервал для  $T_{\text{eff}}$  (пунктирная кривая на левой панели Рис. 4). Аналогичная процедура была проделана для  $\log g$  в интервале значений от 2.5 до 3.7 dex с шагом в 0.2 dex. Значения тяготений были зафиксированы, и проверялись значение  $T_{\text{eff}} = 23\,000$  К. Этот тест дал интервал наиболее вероятных величин для  $\log g$  (пунктирная кривая на правой панели Рис. 4).

Далее мы исключили некоторые части спектра и воспользовались SFIT для расчета наилуч-

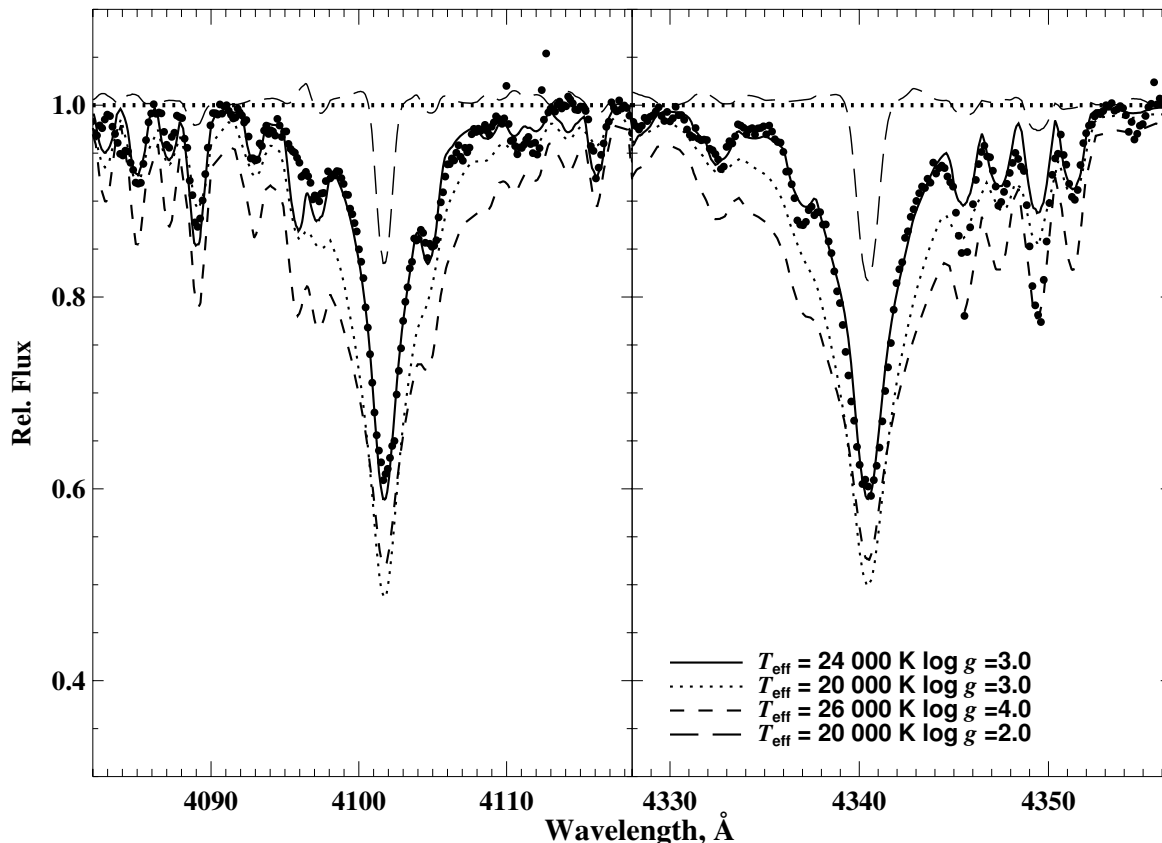


Рис. 2. Наблюдаемые и модельные профили линий Nd и N $\gamma$ . Теоретические профили для  $T_{\text{eff}} = 24\,000\text{ K}$  ( $\log g = 3.0$ ,  $\xi = 6\text{ km s}^{-1}$ ,  $v \sin i = 55\text{ km s}^{-1}$ ,  $n_{\text{He}} = 0.10$ ),  $20\,000\text{ K}$  ( $\log g = 3.0$ ,  $\xi = 16\text{ km s}^{-1}$ ,  $v \sin i = 59\text{ km s}^{-1}$ ,  $n_{\text{He}} = 0.10$ ),  $26\,000\text{ K}$  ( $\log g = 4.0$ ,  $\xi = 15\text{ km s}^{-1}$ ,  $v \sin i = 50\text{ km s}^{-1}$ ,  $n_{\text{He}} = 0.10$ ) и  $20\,000\text{ K}$  ( $\log g = 2.0$ ,  $\xi = 6\text{ km s}^{-1}$ ,  $v \sin i = 55\text{ km s}^{-1}$ ,  $n_{\text{He}} = 0.10$ ) соответственно.

шего модельного спектра для двух разных диапазонов длин волн. Первый диапазон включал в себя линии Nd и Ne и включал в себя область  $3900\text{--}4300\text{ \AA}$  (верхние сплошные кривые на обеих панелях Рис. 4). Второй диапазон включал в себя область  $4300\text{--}5010\text{ \AA}$  с линиями N $\beta$  и N $\gamma$  (нижние сплошные кривые на обеих панелях Рис. 4). Эта проверка соответствия дала  $(T_{\text{eff}}, \log g) = (23\,000, 2.9)$  для первой области и  $(T_{\text{eff}}, \log g) = (23\,500, 3.0)$  для второй.

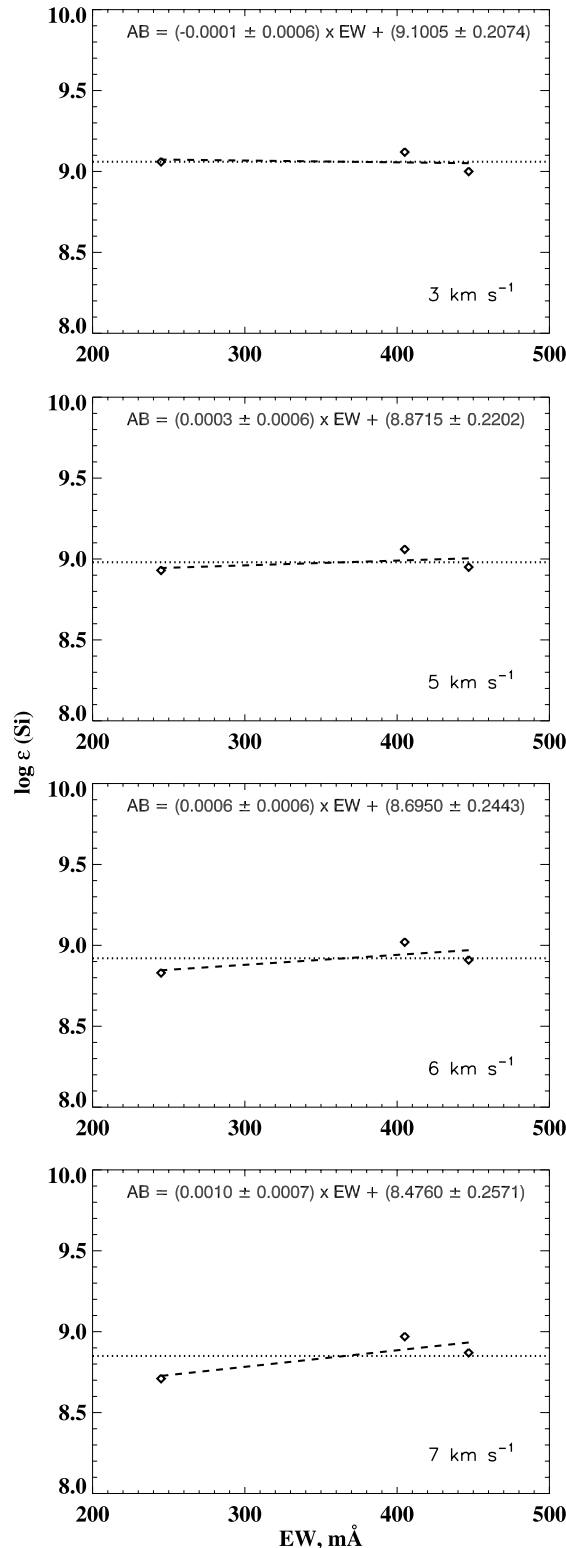
### 3.8. Проверка $T_{\text{eff}}$ : ионизационный баланс

Мы провели несколько тестов с целью проверки  $T_{\text{eff}}$  звезды по ионизационному балансу Si III/Si IV. В случае линий Si III мы использовали мультиплет номер 2 ( $4552.6, 4567.8, 4574.7\text{ \AA}$ ) и 9 ( $4813.3, 4819.7, 4829.0\text{ \AA}$ ) чтобы понять, дадут ли схожие значения температур эти два разных мультиплета. На Рис. 5 показаны результаты расчета ионизационного баланса Si III/Si IV, вычисленное

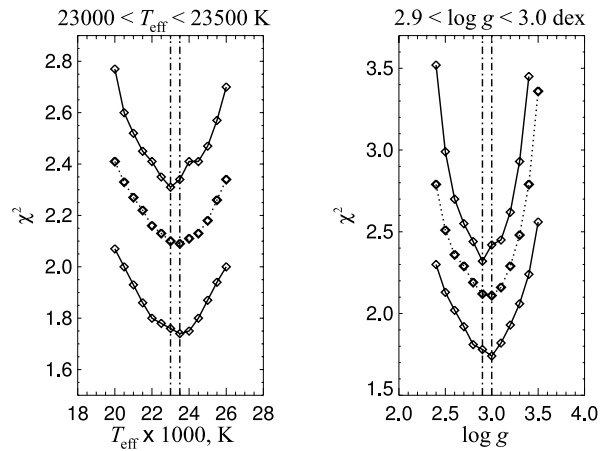
для Si III (2). Равновесие в данном случае достигается при эффективной температуре  $19\,400\text{ K}$ . Аналогичное вычисление для иона Si III (9) дает  $T_{\text{eff}} = 22\,200\text{ K}$ . Так как мультиплет номер 2 Si III подвержен влиянию не-ЛТР эффектов в нормальных В-звездах [51], мы будем использовать в дальнейшем значение  $T_{\text{eff}}$ , полученное по иону Si III (9). Линии Si III обоих мультиплетов в вычислениях ионизационного баланса Si III/Si IV дают  $T_{\text{eff}} = 20\,500\text{ K}$ .

### 3.9. Проверка $\log g$ : аппроксимация линий гелия

Поверхностное ускорение силы тяжести звезды было протестировано аппроксимацией профилей водородных бальмеровских линий (N $\gamma$ , Nd; см. Рис. 1 для наилучшей модели) и диффузных линий гелия He I  $4026, 4387, 4471\text{ \AA}$  в программе SPECTRUM. В этой процедуре гравитация определяется как функция эффективной температуры. В результате этой процедуры значение  $\log g$  было определено как  $3.0\text{ dex}$ .



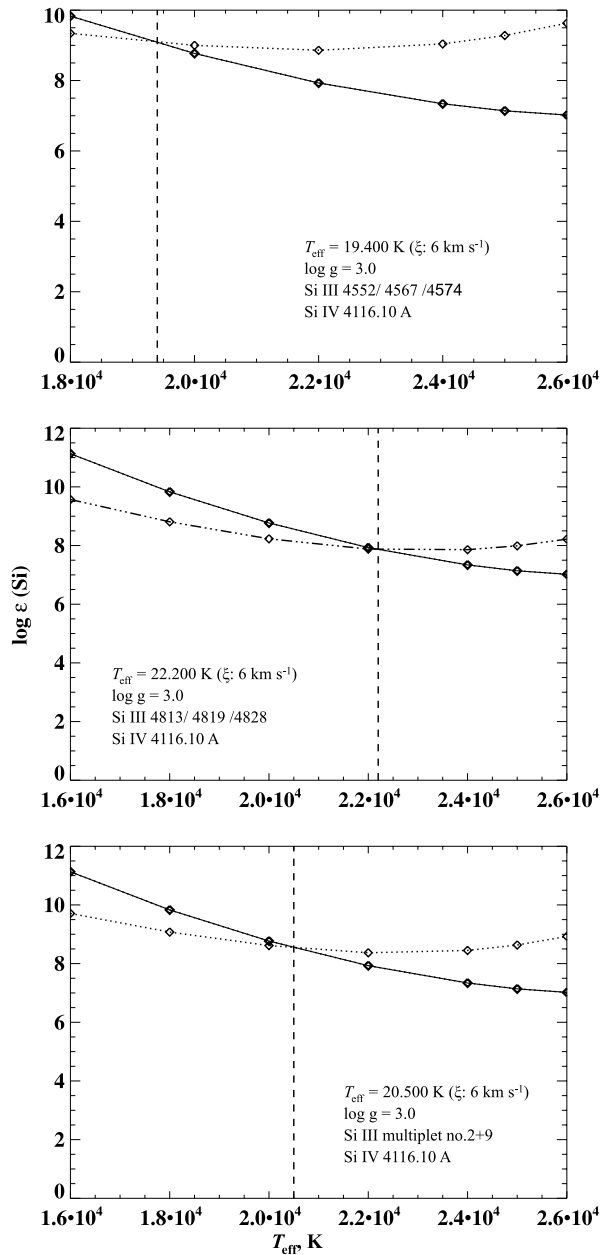
**Рис. 3.** Определение микротурбулентной скорости по Si III мультиплету номер 2 для HD 119608. Для  $V_t = 5 \text{ km s}^{-1}$ , наклон линии регрессии исчезает, как и ожидается при верном выборе  $V_t$ . Штриховая линия представляет собой аппроксимацию данных методом наименьших квадратов. Также приведены уравнения, полученные из аппроксимации методом наименьших квадратов.



**Рис. 4.** Тест  $\chi^2$  для модельных параметров HD 119608, проведенный с помощью опции SOLVE программы SFIT. Пунктирные кривые на обеих панелях представляют собой результаты для метода  $\chi^2$  в случае с использованием полного спектра. Результаты для каждой половины, когда спектр разделен на две части, представлены сплошными кривыми.

### 3.10. Проверка содержания гелия

Пользуясь опцией SYNTH в программе SFIT, мы вычислили содержание гелия, которое оказалось равно  $n_{\text{He}} = 0.09$  ( $[\text{He}] = 11.02$ ). Содержание гелия в начальной модели было равным  $n_{\text{He}} = 0.10$ . Для расчета содержания гелия использовались все линии этого элемента. Синтетический профиль He I 4009 Å не заполнил центр наблюдаемой линии при  $n_{\text{He}} = 0.09$ , а расчетные профили линий на 4026 и 4388 Å были в идеальном согласии с наблюдениями при значении  $n_{\text{He}} = 0.12$ . С другой стороны, наилучшая аппроксимация линии гелия на 4471 Å дала значение  $n_{\text{He}} = 0.19$ . Содержание гелия по линии на 4921 Å составило  $n_{\text{He}} = 0.32$ . Линии гелия 4388 Å и 4471 Å известны как менее чувствительные к микротурбулентной скорости, поэтому являются более предпочтительными при выяснении содержания гелия. Кроме того, итоговое значение содержания  $n_{\text{He}}$  должно находиться в соответствии с итоговыми модельными параметрами. Для проверки этого условия была построена новая сетка моделей, включающая в себя спектры с массовыми долями гелия 0.10 и 0.50. Вычисляя  $n_{\text{He}}$  по новой сетке, мы получили значение 0.14 ( $[\text{He}] = 11.24$ ). Далее мы заново вычислили модельные параметры, используя полученное содержание гелия, с целью проверки его влияния на  $T_{\text{eff}}$  и  $\log g$ . Полученные параметры находились в соответствии со значением  $[\text{He}]$  в пределах ошибок ( $\pm 1000 \text{ K}$  и  $\pm 0.3 \text{ dex}$ ). В итоге содержание гелия было окончательно принято то равным 11.24 dex.



**Рис. 5.** Верхняя панель: ионизационный баланс Si III мультиплета номер 2. Средняя панель: ионизационный баланс для Si III мультиплета номер 9. Нижняя панель: ионизационный баланс для Si III/IV по линиям мультиплетов триплета кремния номер 2 и номер 9. На рисунке представлен усредненный химический состав.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

В то время, как калибровка по фотометрическому индексу  $B - V$  дает эффективную температуру примерно  $23\,000 \text{ K}$ , температура, полученная по индексам стремгеновской системы, лежит в диапазоне  $19\,000 - 27\,000 \text{ K}$ . Женевская фотометрия дает  $T_{\text{eff}} \approx 26\,000 \text{ K}$ . Последнее значение совпадает

с верхним пределом для подобных звезд и согласуется с модельными параметрами Мартина [11], который вычислил  $T_{\text{eff}} = 26\,413 \text{ K}$  и  $\log g = 4.1 \text{ dex}$ . Наш анализ моделей атмосфер показывает, что спектр HD 119608 наилучшим образом представлен моделью с  $T_{\text{eff}} = 23\,000 \text{ K}$  и  $\log g = 3.0 \text{ dex}$ . Эта температура и поверхностное ускорение силы тяжести находятся в хорошем согласии с модельными параметрами Конлона [44], а именно  $T_{\text{eff}} = 24\,000 \text{ K}$  и  $\log g = 3.0 \text{ dex}$ .

И спектральная, и фотометрическая эффективные температуры тестировались по наблюдаемому спектру звезды. Чтобы объяснить различия между температурами, полученными по фотометрии и спектроскопии звезды, мы смещаем фокус нашего обсуждения от разницы между моделями с  $T_{\text{eff}} = 23\,000 \text{ K}$  и  $26\,000 \text{ K}$  к химическому составу. В следующем разделе мы также исследуем соответствующий эволюционный статус звезды.

#### 4.1. Некоторая критика Post-AGB-статуса HD 119608

Рациональный путь различения моделей с двумя разными значениями эффективной температуры состоит в том, чтобы сравнить соответствующие полученные содержания элементов. В модели с  $23\,000 \text{ K}$  наблюдается небольшая нехватка углерода, кислорода, кремния и серы, а содержание азота схоже с солнечным. Алюминий и фосфор также демонстрируют недостаток на  $\approx 0.3 \text{ dex}$ . Наблюдается небольшой избыток Mg ( $[\text{Mg}/\text{Fe}] \approx 0.2 \text{ dex}$ ). С другой стороны, в модели с  $26\,000 \text{ K}$  имеет место нехватка углерода и кислорода на  $0.5 \text{ dex}$ , а содержание азота примерно соответствует солнечному значению (см. колонки (6) и (7) Таблицы 4). Исключения составляют Si, P и S. Они явно отличаются друг от друга ( $[\text{Si}/\text{Fe}] \approx -0.8$ ,  $[\text{P}/\text{Fe}] \approx -1.0$ , а  $[\text{S}/\text{Fe}] = -0.5$ ). Обе модели показывают небольшой избыток Mg. В итоге это сравнение моделей дало два разных химических состава для звезды.

Что касается металличности, то модель с  $23\,000 \text{ K}$  солнечное значение, однако это измерение основано на нескольких линиях Fe III. Недостаток алюминия, кремния, фосфора и серы составляет примерно  $-0.2 \text{ dex}$ , что делает общую металличность равной  $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.2$ . С другой стороны, вторая модель дает химический состав, сверхбогатый металлами ( $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.8 \text{ dex}$ ), что, конечно, неправдоподобно для звезды гало. Становится ясно, что ни одна из моделей не дает химический состав фотосферы, который бы указывал на то, что поверхность звезды является продуктом переработки элементов CNO, который характеризуется избытком азота при недостатке содержания углерода. В свою очередь, недостаток

углерода является характерным свойством горячих *post-AGB* звезд [52], атмосфера которых также ожидаемо насыщена гелием. Однако, содержание азота в исследуемой звезде примерно солнечное. В результате, имеются две разные модели химического состава, и ни одна из них не подходит по вышеуказанным критериям для описания статуса HD 119608 как проэволюционировавшей звезды.

При изучении HD 119608, безусловно, необходимо обратить внимание на предыдущие исследования, в особенности посвященные быстро вращающимся маломассивным проэволюционировавшим звездам, чтобы понять влияние ее высокой скорости вращения на предполагаемый статус звезды как *post-AGB*. Значение  $v \sin i = 55.8 \pm 1.3 \text{ км с}^{-1}$  (полученное в данной работе) часто встречается у В-сверхгигантов: распределение  $v \sin i$  для 20 сверхгигантов ранних В классов (т.е. В0–В2) имеет пик на  $50 \text{ км с}^{-1}$  [50, 53]. Десять звезд из выборки имеют  $v \sin i < 50 \text{ км с}^{-1}$ , и только у двух звезд из 20  $v \sin i$  находится в диапазоне  $35\text{--}40 \text{ км с}^{-1}$ . У остальной выборки значения  $v \sin i$  варьируются от 60 до  $150 \text{ км с}^{-1}$ . Когда речь идет о маломассивных проэволюционировавших звездах (например, звездах *post-AGB*, ВНВ), такое высокое значение  $v \sin i$ , несомненно, является необычным. В литературе предложено несколько механизмов для объяснения такого быстрого вращения среди звезд асимптотической ветви гигантов. Например, для *AGB*-звезды V Нуа, Барнбаум, Моррис и Кахане [54] оно объясняется эволюцией двойной системы с общей оболочкой, тогда как Сахай и др. [55] и Хирано и др. [56] предполагают наличие невидимого компактного компаньона. Последний сценарий требует образования аккреционного диска и предполагается в качестве объяснения быстрого вращения К 648 — горячей *post-AGB* звезды в скоплении М 15, очень богатой углеродом [57, 58]. ZNG-1 в шаровом скоплении М 10 является другим примером *post-AGB*-звезды с очень быстрым вращением ( $170 \pm 20 \text{ км с}^{-1}$  [59]) и демонстрирует состав поверхности, обогащенный СНО, с расширяющейся оболочкой из вещества, богатого углеродом и азотом. Таким образом, можно заключить, что не существует единой структуры химического состава для всех быстро вращающихся *post-AGB* звезд, которая являлась бы эталоном для сравнения. Более того, значение  $v \sin i = 55 \text{ км с}^{-1}$  также нетипично для звезды ВНВ. Бехр [60] показал на примере выборки из 45 кандидатов в звезды горизонтальной ветви с эффективными температурами от 5000 К до 17 000 К, что большинство ВН-звезд имели  $v \sin i < 15 \text{ км с}^{-1}$ . Однако эта выборка также включала быстрые ротаторы с  $v \sin i$  до  $30\text{--}35 \text{ км с}^{-1}$ .  $v \sin i$  для HD 119608 явно выше этого верхнего предела.

HD 119608 попадает в область, занимаемую не-ВН-кандидатами на Рис. 5 в [60] на основе модельных параметров, полученных в настоящей работе. Более того, большинство звезд горизонтальной ветви имеют спектры с повышенной металличностью и пониженным содержанием гелия [61]. Избытки, которые наблюдаются для фосфора и хрома, также следует отметить [62]. Такая структура содержания элементов, очевидно, не сопоставима с химическим составом HD 119608. Следовательно, предположение, что HD 119608 является звездой ВНВ, можно отменить.

Масса является еще одним важным параметром для выяснения, имеет ли звезда эволюционный статус *post-AGB*. Оценка массы звезды, полученная по эволюционным трекам *post-AGB* из [63] и [64], равна  $0.598 M_{\odot}$ . Значение поверхностного ускорения силы тяжести дает радиус примерно  $4116 L_{\odot}$ , или  $\log L/L_{\odot} \approx 3.6$ , если использовать  $T_{\text{эф}}$  из нашего анализа модели атмосферы. Эта светимость типична для *post-AGB* звезды. Однако высокая металличность и химический состав звезды не соответствуют предполагаемому эволюционному статусу звезды *post-AGB*.

Отсутствие ИК избытка для HD 119608 (например, [9]) также явно говорит не в пользу ее *post-AGB* природы. Например, типичная горячая *post-AGB* звезда IRAS 18062+2410 [65, 66], чей спектр идентичен спектру горячего В-сверхгиганта с эмиссионными линиями, сформированными в оболочке, показывает существенные вариации блеска в ближнем инфракрасном диапазоне (см. ссылки в [66] для дополнительных деталей).

#### 4.2. Заметки про статус населения I

В недавнем исследовании [17] HD 119608 была включена в список кандидатов в убегающие звезды класса В. Каждому объекту, приведенному в их таблице 1 соответствовала ссылка, отсылающая к каталогам ранее идентифицированных кандидатов в подобные звезды. Однако HD 119608 была отмечена как одна из *post-AGB* звезд контрольной выборки наравне с HD 18100, HD 44179, HD 105262 [11]<sup>7</sup>; эта ссылка цитируется для HD 119608 в [17].

Мартин [11] использовал содержания *post-AGB* звезд данной выборки, включая HD 119608, для выявления химического сходства высокоширотных слабых голубых звезд с близкими В-звездами населения I и получил эффективную температуру,

<sup>7</sup>На основании спектров (HJD 2450852.9904), полученных на 2.1-м рефлекторе Отто-Струве обсерватории МакДональда и эшелле спектрографе Сэндифорд [67] со спектральным диапазоном  $4590 \text{ \AA} \text{--} 4935 \text{ \AA}$ .

близкую к верхнему пределу  $T_{\text{eff}}$ , на основе фотометрической калибровки (см. Раздел 3.1 настоящей работы). Приведенные модельные параметры были следующими:  $T_{\text{eff}} = 26\,500$  К и  $\log g = 4.0$ ,  $\xi$  и  $v \sin i = 15$  км с<sup>-1</sup> (по триплету Si III 4450 Å) и 50 км с<sup>-1</sup> соответственно; эти модельные параметры для HD 119608 приводят к значительно отличающемуся химическому составу по сравнению со звездами post-AGB и населения I, хотя звезда приводится с пометкой “старая проэволюционировавшая звезда” в Таблице 8 в [11]. Модельные параметры из работы [17] для HD 119608 были определены по спектрам из архива спектрографа FEROS<sup>8</sup> и составили  $T_{\text{eff}} = 19\,900$  К,  $\log g = 2.7$  dex и  $V_t = 16$  км с<sup>-1</sup>. К сожалению, эти атмосферные параметры не дают химического состава, сравнимого с теми, что опубликованы для звезд post-AGB или В-звезд населения I. Это предполагает, что эволюционный статус звезды неясен. С другой стороны, содержания, полученные в нашей работе, и средние содержания двенадцати галактических В-звезд населения I (т.е. контрольной выборки звезд населения I) из [11] хорошо согласуются в пределах 0.2 dex (Таблица 5). Исключение составляет содержание серы, которое демонстрирует большой разброс от звезды к звезде. Более того, мы также сравнили наши содержания для HD 179821 со средними содержаниями выборки 27 В-звезд из пяти OB-ассоциаций, включая Cyg OB3, Cyg OB7, Lac OB1, Vul OB1 и Ser OB3. Отличное согласие показывают углерод, азот, магний и кремний (разность содержания  $\leq 0.1$  dex). Содержание кислорода и алюминия хорошо согласуется в пределах 0.2 dex. Следовательно, в рамках химического состава атмосферы, проанализированного в данной работе, звезда явно схожа со звездами населения I, что может подтвердить ее статус убегающей звезды.

С другой стороны, для поддержания предполагаемого статуса звезды-беглянки в абсолютном большинстве случаев необходимы надежные данные о тригонометрическом параллаксе. Несмотря на то, что параллакс звезды, измеренный миссией HIPPARCOS, имеет большие ошибки, его координаты из базы SIMBAD и данные о собственном движении из каталога HIPPARCOS, а также лучевая скорость звезды, полученная в настоящей работе, дают следующие компоненты галактоцентрической пространственной скорости:  $(U, V, W) = (-33.4 \pm 38.5, -26.9 \pm 19.3, 50.9 \pm 18.5)$  км с<sup>-1</sup> (не исправленные за движение локального стандарта покоя). Для дополнительного подтверждения

предположения об убегающей звезде можно также вычислить галактические орбитальные параметры для HD 119608. Вычисленные апогалактические и перигалактические расстояния до звезды равны 7.6 и 6.5 кпк соответственно. Эти расстояния соответствуют среднему (радиальному) галактоцентрическому расстоянию 7.1 кпк. Максимальное расстояние (по высоте) от галактической плоскости составляет примерно 1.1 кпк, а вычисленная орбита имеет эксцентриситет 0.08. Вертикальный эксцентриситет орбиты получается равным 0.15. Вычисленный орбитальный период звезды составляет приблизительно 129 млн. лет. Следовательно, даже исходя только из компонента  $W$  пространственной скорости звезды, можно заключить, что звезда могла быть выброшена из галактической плоскости с высокой скоростью. Таким образом, результаты, полученные из кинематики звезды по ненадежному измерению параллакса спутником HIPPARCOS, не противоречат предположению о том, что она является убегающей.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы вычислили ЛТР-содержания He, C, N, O, Mg, Al, Si, P, S и Fe, полученные при анализе быстро вращающегося горячего В-сверхгиганта HD 119608, используя подход полного спектра. Полученный химический состав звезды согласуется с предсказанным составом для звезд галактического диска. Содержания углерода и кислорода приблизительно солнечные. Гелий находится в небольшом избытке. Также присутствует умеренный избыток магния. Содержание серы солнечное. Характер химического состава, полученный для звезды, не указывает на то, что атмосфера образовалась вследствие переработки элементов CNO. На основании исключительно сравнения содержания В-карликов в OB-ассоциациях и контрольной выборки звезд населения I HD 119608 по своему химическому составу атмосферы поразительно схожа на убегающие звезды.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа основана на наблюдениях полученных, на Англо-Австралийском телескопе. ТШ благодарит рецензента за ее/его комментарии, которые улучшили текст. Особая благодарность Др. Селчуку Билиру за его комментарии по пространственным скоростям HD 119608.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. W. W. Morgan, A. D. Code, and A. E. Whitford, *Astrophys. J. Suppl.* **2**, 41 (1955).

<sup>8</sup>Спектры FEROS для звезды в [17] имеют схожее разрешение со спектром AAT/UCLES использованным в данной работе.



2. H. J. Habing, *Bull. Astron. Inst. Netherlands* **20**, 120 (1968).
3. D. Kilkenny, P. W. Hill, and T. Schmidt-Kaler, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **171**, 353 (1975).
4. M. Pettini and K. A. West, *Astrophys. J.* **260**, 561 (1982).
5. P. W. Hill, D. Kilkenny, and I. G. van Breda, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **168**, 451 (1974).
6. R. J. Edgar and B. D. Savage, *Astrophys. J.* **340**, 762 (1989).
7. J. D. Fernie, *Astrophys. J. Suppl.* **52**, 7 (1983).
8. B. Hauck and M. Mermilliod, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **129**, 431 (1998).
9. E. S. Conlon, P. L. Dufton, F. P. Keenan, et al., *Astron. and Astrophys.* **272**, 243 (1993).
10. D. Kilkenny, D. O'Donoghue, C. Koen, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **287**, 867 (1997).
11. J. C. Martin, *Astron. J.* **128**, 2474 (2004).
12. T. Morel, S. V. Marchenko, A. K. Pati, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **351**, 552 (2004).
13. D. D. Walker and F. Diego, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **217**, 355 (1985).
14. D. Mills and W. Clayton, *Starlink User Note* **152** (2006).
15. T. Şahin, *Turk. J. Phys.* **41**, 367 (2017).
16. G. A. Gontcharov, *Astronomy Letters* **32**, 759 (2006).
17. C. M. McEvoy, P. L. Dufton, J. V. Smoker, et al., *Astrophys. J.* **842**, 32 (2017).
18. N. T. Behara and C. S. Jeffery, *Astron. and Astrophys.* **451**, 643 (2006).
19. G. Peach, *Memoirs R. Astron. Soc.* **73**, 1 (1970).
20. P. Feautrier, *SAO Spec. Rep.* **167**, 80 (1964).
21. L. B. Lucy, *SAO Spec. Rep.* **167**, 93 (1964).
22. C. S. Jeffery, V. M. Woolf, and D. L. Pollacco, *Astron. and Astrophys.* **376**, 497 (2001a).
23. C. R. Vidal, J. Cooper, and E. W. Smith, *Astrophys. J. Suppl.* **25**, 37 (1973).
24. M. Lemke, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **122**, 285 (1997).
25. A. J. Barnard, J. Cooper, and L. J. Shamey, *Astron. and Astrophys.* **1**, 28 (1969).
26. A. J. Barnard, J. Cooper, and E. W. Smith, *J. Quantitative Spectroscopy Radiative Transfer* **14**, 1025 (1974).
27. A. J. Barnard and D. C. Stevenson, *J. Quantitative Spectroscopy Radiative Transfer* **15**, 123 (1975).
28. H. A. Gieske and H. R. Griem, *Astrophys. J.* **157**, 963 (1969).
29. M. S. Dimitrijevic and S. Sahal-Brechot, *J. Quantitative Spectroscopy Radiative Transfer* **31**, 301 (1984).
30. T. Schoening and K. Butler, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **78**, 51 (1989).
31. N. Przybilla, M. F. Nieva, and H. Edelmann, *Baltic Astronomy* **15**, 107 (2006).
32. D. R. Gies and D. L. Lambert, *Astrophys. J.* **387**, 673 (1992).
33. J. Kilian, *Astron. and Astrophys.* **282**, 867 (1994).
34. T. Şahin, D. L. Lambert, V. G. Klochkova, and N. S. Tavolganskaya, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **410**, 612 (2011).
35. I. D. Howarth and A. P. Phillips, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **222**, 809 (1986).
36. J. Kilian, O. Montenbruck, and P. E. Nissen, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **88**, 101 (1991).
37. C. E. Moore, *Contr. Princeton Univ. Obs.* **20**, 1 (1945).
38. R. Coluzzi, *VizieR Online Data Catalog* **6071** (1999).
39. R. K. Gulati, M. L. Malagnini, and C. Morossi, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **80**, 73 (1989).
40. R. Napiwotzki, D. Schoenberner, and V. Wenske, *Astron. and Astrophys.* **268**, 653 (1993).
41. T. T. Moon, *Stellar Parameters from Strömgren Photometry: Fortran Programs* (University College London, London, 1985).
42. M. Kunzli, P. North, R. L. Kurucz, and B. Nicolet, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **122**, 51 (1997).
43. A. Ahmad and C. S. Jeffery, *Astron. and Astrophys.* **402**, 335 (2003).
44. E. S. Conlon, P. L. Dufton, F. P. Keenan, et al., *Astrophys. J.* **400**, 273 (1992).
45. M. Asplund, N. Grevesse, A. J. Sauval, and P. Scott, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **47**, 481 (2009).
46. S. Daflon, K. Cunha, S. R. Becker, and V. V. Smith, *Astrophys. J.* **552**, 309 (2001).
47. C. S. Jeffery, *Daresbury Laboratory Newsletter on "Analysis of Astronomical Spectra"* **16**, 17 (1991).
48. N. D. McErlean, D. J. Lennon, and P. L. Dufton, *Astron. and Astrophys.* **329**, 613 (1998).
49. A. Uesugi and I. Fukuda, *Memoirs Faculty Sci. Univ. Kyoto* **33**, 205 (1970).
50. S. Simón-Díaz, A. Herrero, C. Sabin-Sanjulián, et al., *Astron. and Astrophys.* **570**, L6 (2014).
51. S. R. Becker and K. Butler, *Astron. and Astrophys.* **235**, 326 (1990).
52. H. van Winckel, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **41**, 391 (2003).
53. I. D. Howarth, K. W. Siebert, G. A. J. Hussain, and R. K. Prinja, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **284**, 265 (1997).
54. C. Barnbaum, M. Morris, and C. Kahane, *Astrophys. J.* **450**, 862 (1995).
55. R. Sahai, M. Morris, G. R. Knapp, et al., *Nature* **426**, 261 (2003).
56. N. Hirano, H. Shinnaga, Dinh-V-Trung, et al., *Astrophys. J. Lett.* **616**, L43 (2004).
57. U. Heber, S. Dreizler, and K. Werner, *Acta Astronomica* **43**, 337 (1993).
58. D. R. Alves, H. E. Bond, and M. Livio, *Astron. J.* **120**, 2044 (2000).
59. W. V. D. Dixon, T. M. Brown, and W. B. Landsman, *Astrophys. J. Lett.* **600**, L43 (2004).
60. B. B. Behr, *Astrophys. J. Suppl.* **149**, 101 (2003).
61. J. W. Glaspey, G. Michaud, A. F. J. Moffat, and S. Demers, *Astrophys. J.* **339**, 926 (1989).
62. B. B. Behr, J. G. Cohen, J. K. McCarthy, and S. G. Djorgovski, *Astrophys. J. Lett.* **517**, L135 (1999).
63. D. Schoenberner, *Astrophys. J.* **272**, 708 (1983).
64. D. Schonberner, *IAU Symp. No. 131*, 463 (1989).
65. V. P. Arhipova, V. G. Klochkova, and G. V. Sokol, *Astronomy Letters* **27**, 99 (2001).

66. V. P. Arkhipova, V. F. Esipov, N. P. Ikonnikova, et al., *Astronomy Letters* **33**, 604 (2007). 67. J. K. McCarthy, B. A. Sandiford, D. Boyd, and J. Booth, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **105**, 881 (1993).

## High Resolution Optical Spectroscopy of an Intriguing High-Latitude B-Type Star HD 119608

T. Şahin

We present an LTE analysis of high resolution echelle optical spectra obtained with the 3.9-m Anglo-Australian Telescope (AAT) and the UCLES spectrograph for a B1Ib high galactic latitude supergiant HD 119608. A fresh determination of the atmospheric parameters using line-blanketed LTE model atmospheres and spectral synthesis provided  $T_{\text{eff}} = 23\,300 \pm 1000$  K,  $\log g = 3.0 \pm 0.3$ , and the microturbulent velocity  $\xi = 6.0 \pm 1.0$  km s<sup>-1</sup> and  $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.16$ . The rotational velocity of the star was derived from C, O, N, Al, and Fe lines as  $v \sin i = 55.8 \pm 1.3$  km s<sup>-1</sup>. Elemental abundances were obtained for 10 different species. He, Al, and P abundances of the star were determined for the first time. In the spectra, hot post-AGB status as well as the Pop I characteristics of the star were examined. The approximately solar carbon and oxygen abundances, along with mild excess in helium and nitrogen abundances do not stipulate a CNO processed surface composition, hence a hot post-AGB status. The LTE abundances analysis also indicates solar sulphur and moderately enriched magnesium abundances. The average abundances of B dwarfs of well studied OB associations and Population I stars show a striking resemblance to abundances obtained for HD 119608 in this study. This may imply a runaway status for the star.

Keywords: *stars: magnetic field—stars: chemically peculiar—stars: individual: HD 119608*