

УДК 524.31.01-355

# ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ КАНДИДАТОВ В ГОРЯЧИЕ POST-AGB ЗВЕЗДЫ LS IV-04 1 и LB 3116

© 2018 Т. Шахин<sup>1\*</sup><sup>1</sup> Факультет науки, университет Акдениз, Анталья, 07058 Турция

Поступила в редакцию 23 ноября 2017 года; принята в печать 23 января 2018 года

Мы представляем ЛТП-анализ оптических спектров высокого разрешения горячих PAGB звезд класса В LS IV-04 1 и LB 3116 (LSE 237). Спектры этих звезд, находящихся на высоких галактических широтах, были получены на 3.9-метровом Англо-Австралийском Телескопе (ААТ) со спектрографом UCLES. Стандартный одномерный ЛТП-анализ методом моделей атмосфер с учетом покровного эффекта и спектральный синтез позволили определить фундаментальные параметры  $T_{\text{eff}} = 15\,000 \pm 1000$  К,  $\lg g = 2.5 \pm 0.2$ ,  $\xi = 5.0 \pm 1.0$  км с<sup>-1</sup>,  $[\text{M}/\text{H}] = -1.81$  dex и  $v \sin i = 5$  км с<sup>-1</sup> для LS IV-04 1 и  $T_{\text{eff}} = 16\,000 \pm 1000$  К,  $\lg g = 2.5 \pm 0.1$ ,  $v \sin i = 25$  км с<sup>-1</sup> и  $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.93$  dex для LB 3116. Были найдены химические содержания десяти разных элементов. Для LS IV-04 1 полученная модельная температура противоречит результатам предыдущего исследования. Впервые были установлены верхние пределы содержания азота и кислорода. Найдены избытки магния, кремния и кальция ( $[\text{Mg}/\text{Fe}] = 0.8$  dex,  $[\text{Si}/\text{Fe}] = 0.5$  dex,  $[\text{Ca}/\text{Fe}] = 0.9$  dex). С фотосферой, бедной металлами и скоростью локального стандарта покоя  $V_{\text{LSR}} \approx 96$  км с<sup>-1</sup>, LS IV-04 1, скорее всего, является звездой населения II и, вероятно, принадлежит к PAGB. ЛТП-содержания LB 3116 были получены впервые. Спектр этой богатой гелием звезды показывает содержание азота в 0.9 dex. Фотосфера звезды демонстрирует небольшой недостаток Mg, Si и S ( $[\text{Mg}/\text{Fe}] = -0.2$  dex,  $[\text{Si}/\text{Fe}] = -0.4$  dex,  $[\text{S}/\text{Fe}] = -0.2$  dex). Al слегка избыточен. Наблюдается переизбыток фосфора,  $[\text{P}/\text{Fe}] \approx 1.7 \pm 0.47$  dex, а значит LB 3116 может быть первым примером PAGB звезды, богатой фосфором. Высокая лучевая скорость ( $V_{\text{LSR}} = 73$  км с<sup>-1</sup>) и наблюдаемый дефицит C, Mg, Si и S указывают на то, что LB 3116, скорее всего, является горячей PAGB звездой на высокой галактической широте.

Ключевые слова: *звезды: AGB и post-AGB — звезды: индивидуальные: LS IV-04 1 — звезды: индивидуальные: LB 3116*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В стадии протопланетарной туманности (стадия PPN или пост-асимптотическая ветвь гигантов, стадия PAGB) звездной эволюции находятся сверхгиганты в области перехода от вершины асимптотической ветви гигантов (AGB) к ранним стадиям планетарных туманностей (PNe). Так как время перехода очень коротко, звезды PAGB редки. Эта относительно быстрая эволюция к треку охлаждающегося белого карлика в основном определяется потерей массы на стадии AGB, где выдуваемый газ формирует вокруг звезды околосозвездную оболочку [1]. Через несколько сотен лет [2], по мере того, как температура центральной PAGB звезды достигает примерно 30 000 К, оболочка ионизируется, и пылевая компонента становится доступной для наблюдений в форме инфракрасного (IR) избытка. Далее про звезду можно сказать, что

она находится на стадии PPN, вскоре после чего она проэволюционирует до стадии планетарной туманности с горячим белым карликом в центре.

Звезды PAGB весьма интересны тем, что по химическому содержанию таких объектов можно отследить их химическую историю на стадии AGB (т.е. ядерный синтез на AGB) и более тонкую форму PAGB вследствие потери массы. Интригует химическое разнообразие, наблюдаемое в спектрах холодных и горячих PAGB звезд, спектральные классы которых находятся в интервале от *B* до *K* [3], а типичные светимости около  $10^3$ – $10^4$   $L_{\odot}$ . Разнообразие их химического состава, а также химическая структура их околосозвездных оболочек все еще являются актуальными задачами для решения с помощью спектроскопии высокого разрешения. Например, были опубликованы работы по PAGB кандидата как с высоким, так и с низким содержанием углерода (например, MACHO 47.2496.8 с  $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.4$  dex и C/O > 2 в LMC; PG 1323-086 с  $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.3$  dex; PG 1704+222 с

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

$[\text{Fe}/\text{H}] = -1.2 \text{ dex}$ ) [4, 5]. Дефицит углерода может быть связан с отсутствием третьего процесса конвективного перемешивания на стадии AGB, или же главную роль здесь может играть процесс горения водородного слоевого источника (hot bottom burning, HBB). Кроме того, спектры некоторых PAGB звезд могут демонстрировать более высокие содержания азота, в то время как элементы s-процесса могут быть в дефиците (как в случае с LB 3116 в настоящей работе). С другой стороны, горячие высокоширотные PAGB звезды класса В составляют в некотором роде отдельную группу, которая может оказаться важным звеном между горячими и холодными группами стадии PAGB. Руководствуясь этим, в настоящей работе мы проанализировали синие оптические спектры двух подобных горячих звезд класса В: LS IV-04 I и LB 3116, находящихся на высоких галактических широтах. Эти звезды еще не были изучены достаточно детально в литературе.

### 1.1. LS IV-04 I

LS IV-04 I как звезде, входящей в список Калалого ярких звезд северного Млечного пути, был присвоен спектральный класс B7Ib [6]. В исследовании МакКосленда и др. [7] (далее MC92), посвященном отождествлению молодых высокоширотных звезд раннего типа, LS IV-04 I была отмечена как PAGB звезда на основе спектра среднего разрешения ( $\lambda\lambda 3870\text{--}4690$ , линейная дисперсия  $2 \text{ \AA mm}^{-1}$ ). Предполагая, что звезда является сверхгигантом, Килкенни и Полс [8] (далее KP90a) нашли фотометрический спектральный класс B9 I и привели диапазон расстояний до объекта от 9 до 18 кпк, с расстояниями  $z$  от 3.5 до 7 кпк. Их спектр низкого разрешения (линейное разрешение порядка  $100 \text{ \AA mm}^{-1}$ ), полученный с помощью ретикона в обсерватории SAAO, показал резкие линии бальмеровской серии. Спектр также показал наличие линии C II на  $4267 \text{ \AA}$ , тогда как линии He I на  $4026 \text{ \AA}$  и  $4471 \text{ \AA}$  обнаружены не были. Модельные параметры звезды за исключением  $v \sin i$  приводятся в таблице 1. Данные с низкой дисперсией не позволили авторам KP90a оценить  $v \sin i$ . Также была отмечена необходимость детального спектрального анализа.

### 1.2. LB 3116=LSE 237

LB 3116 — объект из каталога голубых звезд Лейтена. В исследовании, включающем в себя определение фотоэлектрических цветов (см. таблицу 2) слабых голубых звезд Южного полушария, звезде был приписан спектральный класс B4 по спектру низкого разрешения ( $170 \text{ \AA mm}^{-1}$  в

$\text{H}\gamma$  [14]). Основываясь на спектре низкого разрешения с  $30 \text{ \AA mm}^{-1}$ , Килкенни и Лайдон [10] определили параметры  $T_{\text{eff}}$  и  $\lg g$ . Последние были получены при использовании моделей Куруца [18] путем аппроксимации наблюдаемых линий водорода. Спектр звезды имеет резкие абсорбционные линии, типичные для сверхгиганта класса В. LB 3116 была определена как сверхгигант, находящийся на расстоянии 25 кпк. Авторы заключили, что это проэволюционировавшая голубая звезда населения II.

В работе [12] был проанализирован УФ-спектр низкого разрешения ( $\lambda\lambda 1150\text{--}1950 \text{ \AA}$ ) обсерватории IUE. Было показано, что LB 3116 — звезда с дефицитом металлов, находящаяся в фазе перехода между AGB и PNe. Аппроксимация ультрафиолетового распределения звезды потоками фотометрических полос *wby* системы Стремгрена дала параметры  $T_{\text{eff}} = 16000 \text{ K}$  и  $\lg g = 2.7$ . Однако на момент выполнения этой работы были доступны только модели для солнечной металличности с температурами выше  $12000 \text{ K}$ . Несмотря на это параметры находятся в точном соответствии теми, что приняты в работе [10]. Также важно отметить, что УФ-спектр звезды содержал детали, характерные по интенсивности для звезд Главной последовательности. Эти детали были значительно слабее, чем в УФ-спектрах сверхгигантов. Авторы [12] также отметили, что дальнейшее получение спектра звезды с высоким разрешением требуется для точного определения ее природы. Недавнее исследование Викерса и др. [19] направлено на определение расстояний PAGB звезд из торуньского каталога. Авторы [19] моделировали полное спектральное распределение энергии звезды, используя множественные чернотельные кривые, и определяли полный поток, зависящий от расстояния. Найденная светимость LB 3116 составила  $1700 \pm 750 L_{\odot}$ , а расстояние до звезды, полученное из оценки величины покраснения  $E(B - V) = 0.04 \pm 0.01$ , составило  $8.11 \pm 1.83 \text{ кпк}$ . Однако следует отметить, что данные, использованные для составления спектральных распределений энергии, не содержали никакой спектральной информации, а спектральные данные на рисунках [19] были включены только в иллюстративных целях.

В настоящей работе мы детально анализируем химический состав звезды LB 3116 с очень низким содержанием углерода, а также очень низкометаллической звезды LS IV-04 I с помощью оптической спектроскопии высокого разрешения. Наши данные намного превосходят те, на которых основывались предыдущие оценки содержаний. Мы представляем обновленный химический состав звезд и делаем попытку интерпретации содержаний, опираясь на утверждение о статусе этих объектов, как горячих PAGB звезд.

**Таблица 1.** Параметры атмосфер LS IV-04 1 и LB 3116. Также приведены модельные параметры из предыдущих исследований

Звезда	$T_{\text{эфф}}, \text{K}$	$\lg g,$ $\text{см с}^{-2}$	$\xi$ $\text{км с}^{-1}$	$v \sin i,$ $\text{км с}^{-1}$	$V_{\text{HEL}},$ $\text{км с}^{-1}$	Ссылка
LS IV-04 1	15 000±1000	2.5±0.2	5.0±1.0	5	87.5±2.5	Данная работа
	10 000±1000	1.6±0.2	5	...	...	CJM02
	11 000±1000	2.0±0.2	15	...	...	MC92
	10 000	1.75	...	...	...	KP90a
	11 000:	<2.0?	...	0?	...	KP90b
	11 000	2.0	...	0	...	KP90c
LB 3116	16 000±1000	2.5±0.1	0	25	57.1±2.0	Данная работа
	17 379	3.2	...	...	...	NW73
	16 500±1500	2.5±0.35	...	120±25	...	KL86a
	16 000	2.7	...	125	...	KL86b
	16 000	2.7	...	...	...	QL92

CJM02: [9]; MC92: [7]; KP90a: [8], по Kiel-диаграммам;

KP90b: по модельной аппроксимации профилей линий  $H\gamma$ ; KP90c: профилей линий  $H\delta$ ;

KL86a: [10] по методу Kiel-диаграмм; KL86b: [10], по модельной аппроксимации профилей линий  $H\gamma$  и  $H\delta$ ;

NW73: [11], где дается  $E(B - V) = 0.03$ ; QL92: [12], по UV спектрам.

**Таблица 2.** Основные параметры LS IV-04 1, LB 3116 и HD 35039, включая индексы системы Стремгrena и джонсоновскую фотометрию звезд

Звезда	l	b	$m_1$	$c_1$	$(b - y)$	$E(b - y)$	Сп. класс	$V$	$B - V$	$U - B$
LS IV-04 1	14°40	22°86	-0.023 <sup>1</sup>	1.012 <sup>1</sup>	0.262 <sup>1</sup>	0.240 <sup>1</sup>	B7Ib <sup>5</sup>	12.10	0.25	...
LB 3116	331°56	-27°23	0.060 <sup>2</sup>	0.260 <sup>2</sup>	-0.038 <sup>2</sup>	0.025 <sup>8</sup>	B2/5V? <sup>6</sup>	12.55	-0.12±0.03 <sup>3</sup>	-0.71±0.03 <sup>3</sup>
HD 35039	202°63	-20°03	0.083 <sup>4</sup>	0.173 <sup>4</sup>	-0.069		B2V <sup>7</sup>	4.74	-0.16	-0.79

<sup>1</sup>: [8]; <sup>2</sup>: [13], звезде дан класс "B2?" по индексам системы Стремгrena;

<sup>3</sup>: [14], спектральный класс звезды дан как "B4."; <sup>4</sup>: [15]; <sup>5</sup>: [16]; <sup>6</sup>: [12]; <sup>7</sup>: [17];

Структура настоящей работы следующая: в разделе 2 обсуждаются оптические спектры высокого разрешения, полученные на Англо-Австралийском Телескопе и процесс обработки спектров; в разделе 3 приводится анализ химического состава, включая получение модельных параметров, используя подход полного спектра; в разделе 4 приводятся результаты и обсуждается химический состав и эволюционный статус LS IV-04 1 и LB 3116 как горячих звезд post-AGB.

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Оптические спектры высокого разрешения в синей области ( $\lambda/\Delta\lambda \approx 48\,000$ ) LS IV-04 1, HD 35039 и LB 3116 были получены с помощью эшелле спектрографа Лондонского университетского колледжа UCLES [20] на Англо-Австралийском Телескопе (AAT) 29 июля 1999 г. и 26 и 28 августа 2005 г. соответственно. При наблюдениях 1999 г. конфигурация UCLES состояла из решетки с 31.6 штр. мм<sup>-1</sup>, тонкой матрицы Tektronix (1024 × 1024, 24 мкм) и шириной щели в 0.70 мм. Центральная длина вол-

ны 4307 Å обеспечивала спектральное покрытие от 3847 до 5010 Å. Детектор с матрицей EEV2 (2048 × 4096, 13.5 мкм) использовался в наблюдениях 2005 г., спектральное разрешение составило 0.05 Å пиксель<sup>-1</sup>. Для LS IV-041 три отдельные экспозиции звезды (3 × 1800 с), а для LB 3116 — две (2 × 1500 с при качестве изображения 1''), были совмещены с экспозициями торий-аргоновой лампы (Th—Ag) для калибровки длин волн. Средняя остаточная разность длин волн по экспозициям Th—Ag лампы для обоих наблюдений были менее 0.02 Å. Кварцевая лампа непрерывного спектра была использована для получения плоских полей.

Мы использовали пакет обработки из STARLINK под названием ECHOMOP [21] для обработки наблюдений. Первичная редукция ПЗС-изображений производилась стандартным образом, включающим выделение полезной части кадра, вычитание электронной подложки, коррекцию плоского поля и удаление следов космических частиц. За определением щели последовало построение комбинированных плоских полей с вычитенной электронной подложкой, которые также использовались для моделирования каналов неба и объекта. После вычитания неба и калибровки по длинам волн двумерное изображение спектра было экстрагировано оптимальным образом для получения наилучшего отношения  $S/N$ . Для нормировки континуума и «сшивания» порядков использовалась программа LIME [22]. В связи с отсутствием резких линий металлов в спектрах обоих звезд лучевые скорости индивидуальных спектров измерялись методом кросс-корреляции с маской (например, спектром HD 35039 или синтетическим спектром) в LIME. Гелиоцентрические лучевые скорости  $V_{HEL}$  для LS IV-041 и LB 3116, измеренные по спектрам высокого разрешения, составили  $87.5 \pm 2.5 \text{ км с}^{-1}$  ( $V_{LSR} = 103.2 \text{ км с}^{-1}$ ) и  $57.1 \pm 2.0 \text{ км с}^{-1}$  ( $V_{LSR} = 55.1 \text{ км с}^{-1}$ ) соответственно. В KP90a [8] указывается гелиоцентрическая лучевая скорость  $93.0 \pm 4.0 \text{ км с}^{-1}$  для LS IV-041, полученная из спектрограммы звезды низкого разрешения (разрешение по полуширине составляло порядка 3.5 Å). MC92 [7] также нашли  $V_{LSR} = 105.0 \pm 3.0 \text{ км с}^{-1}$  по спектру звезды с низким разрешением (разрешение по полуширине составляло 0.2 Å) и низким отношением  $S/N = 25$ . По доплеровскому сдвигу сильных неблендированных линий металлов CJM02 [9] нашли  $V_{LSR} = 105.0 \pm 3.0 \text{ км с}^{-1}$ . В качестве проверки согласованности мы также извлекли из архива обсерватории Кекс<sup>1</sup> эшелле спектры LS IV-041,

полученные в [9] на 10-м телескопе Кекс I с помощью спектрографа HIRES. Эти спектры с низким отношением  $S/N$  ( $S/N$  варьировалось от 3 до 48) показали  $V_{LSR} \approx 103.0 \text{ км с}^{-1}$  методом кросс-корреляции. Следовательно, наше измерение для LS IV-041 находится в соответствии с измерениями [7–9].

Лучевая скорость, определенная для LB 3116 в настоящем исследовании, явно отличается от гелиоцентрической лучевой скорости  $24.0 \pm 9.0 \text{ км с}^{-1}$  (HJD 2445445.54), полученной в [10] по десяти спектральным линиям синего спектра низкого разрешения (разрешение по полуширине 1.0 Å и  $\lambda\lambda 3900\text{--}4400 \text{ Å}$ ), содержащего только водородные бальмеровские линии 3970, 4101 и 4340 Å и диффузные линии He I на 4009, 4026, 4143 и 4387 Å (см. таблицу 2 в работе [10]). Однако красный спектр в этой же статье (разрешение по полуширине 0.85 Å и  $\lambda\lambda 4400\text{--}4900 \text{ Å}$ ) дает лучевую скорость в  $7.0 \text{ км с}^{-1}$  (HJD 2445567.39). Это последнее измерение получено по диффузной линии He I на 4471 Å. Таким образом, несоответствие лучевых скоростей, измеренных в настоящем исследовании и в [10] для LB 3116, по всей видимости, связано с низким разрешением и низким отношением  $S/N$  использованных авторами [10] спектров.

### 3. АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА — МОДЕЛИ АТМОСФЕР, ПАРАМЕТРЫ ЗВЕЗД И СОДЕРЖАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ

С целью выяснения химического состава звезд был проведен ЛТР-анализ с учетом покровного эффекта, в котором использовалась сетка моделей атмосфер, вычисленных с помощью STERNE [23] с заданным содержанием. STERNE вычисляет ЛТР-модели в предположении плоскопараллельной атмосферы, а также гидростатического и лучистого равновесий. Также в STERNE учитывается обратный нагрев, вызванный покровным эффектом. Для вычисления синтетического спектра высокого разрешения рассчитанной модели атмосферы из STERNE в заданном диапазоне длин волн был использован код SPECTRUM [24].

При использовании подхода полного спектра для определения содержания химических элементов с помощью программ SPECTRUM и/или SFIT (см. раздел 3.3) влияние индивидуальных линий на конечный результат ожидается минимальным.

В следующих подразделах мы описываем выбор начальных модельных параметров на основе фотометрических данных и создание сетки моделей атмосфер методом минимизации  $\chi^2$  с помощью кода SFIT. Мы также анализируем спектр

<sup>1</sup>Архив КАО доступен по адресу <http://koa.ipac.caltech.edu>.

HD 35039, стандарта химического состава для раннего В класса, который был использован в качестве проверки наших моделей, а также атомные данные и метод анализа, использованный в данной работе. В разделе 4 мы представляем наши выводы о составе и эволюционном статусе LS IV-04 I и LB 3116.

### 3.1. Фотометрия

Для нахождения начальных параметров спектрального анализа была использована фотометрия звезд. Фотометрическая температура, полученная для LS IV-04 I из показателя цвета системы Стремгрена [ $u - b$ ], свободного от покраснения, путем использования калибровки [25], оказалась равной  $T_{\text{eff}} = 11\,146 \pm 334$  К. Это значение  $T_{\text{eff}}$ , несомненно, далеко от спектрально определенной эффективной температуры звезды (см. сравнение бальмеровских линий на рис. 6 для модельных профилей линий при  $T_{\text{eff}} = 10\,000$  К и  $12\,000$  К). Расхождение в  $T_{\text{eff}}$  становится еще больше, если рассматривать фотометрические данные (например, джонсоновскую фотометрию), которые требуют коррекции за покраснение. Например, с калибровками для звезды из работ [26] и [25], основанными на фотометрии Джонсона, с найденными избытками цвета  $E(B - V) = 0.394$  [27] и  $E(B - V) = 0.310$  (по пылевым картам из статьи [28]) для LS IV-04 I, получившиеся фотометрические температуры варьируются в пределах 4401–8486 К. Очевидно, эти значения нельзя использовать в качестве начальных параметров спектрального анализа звезды.

Для того чтобы преобразовать индексы фотометрических систем Джонсона и Стремгрена LB 3116 в эффективные температуры, были использованы калибровки [25, 26, 29]. Фотометрия Джонсона с помощью последней калибровки дала  $T_{\text{eff}} = 15\,143$  К для  $E(B - V) = 0.042$  [28]. Калибровки [26] и [29] для фотометрического показателя Джонсона ( $B - V$ ) для LB 3116 дали температуру  $16\,829 \pm 1515$  К для  $E(B - V) = 0.042$  и  $15\,394$  К при  $\lg g = 2.4$  соответственно. Для этого индекс  $\beta$  был оценен по данным из работы [30] на основании предположения, что звезда имеет класс светимости Ib. Этот параметр был использован с  $c_0$  в статье [29] для определения  $T_{\text{eff}}$  и  $\lg g$ . Калибровка, основанная на стремгеновском индексе [ $u - b$ ], дала  $T_{\text{eff}} = 18\,711 \pm 561$  К для LB 3116.

### 3.2. $\chi^2$ -минимизация

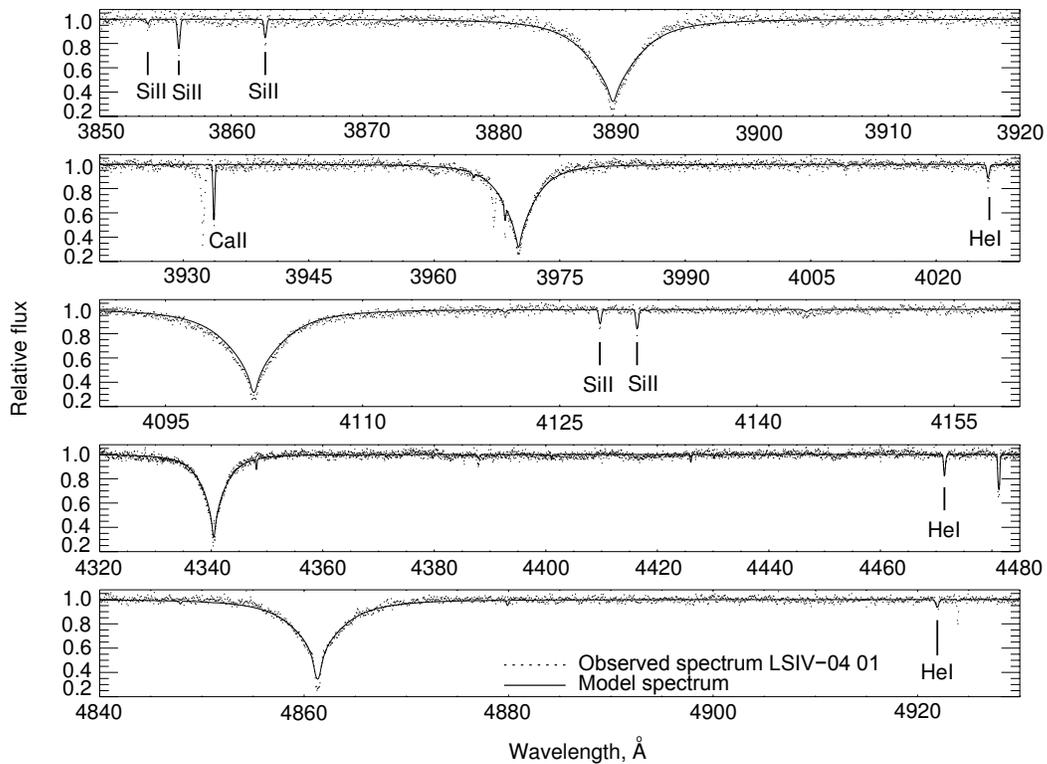
Для измерения соответствия между теоретическими и наблюдаемыми спектрами мы воспользовались методом минимизации параметра  $\chi^2$ . Для

расчетов сетки модельных спектров для анализа мы использовали программу SFIT [31]. Среди заданного набора синтетических спектров программа находит решение с наилучшим соответствием с помощью опции SOLVE, используя интерфейс минимизации  $\chi^2$ , при этом несколько областей спектра аппроксимируются одновременно. Этот итеративный процесс аппроксимации использует метод Нелдера–Мида («амеба-алгоритм») для оптимизации и одновременного определения в первом цикле таких параметров, как  $T_{\text{eff}}$ ,  $\lg g$  и  $n_{\text{He}}$  (относительное содержание гелия). Затем значение  $n_{\text{He}}$  фиксируется, а  $T_{\text{eff}}$  и  $\lg g$  подбираются вместе в финальной итерации. После чего бралась модель атмосферы с подобранными параметрами и вычислялись содержания неосновных элементов. Для определения  $T_{\text{eff}}$  SFIT измеряет относительные интенсивности линий гелия и использует условие ионизационного баланса всех элементов, представленных в спектре (например, N II/III, Si II/III/IV). Также одновременно вычисляется  $n_{\text{He}}$  по интенсивностям линий водорода и гелия.  $\lg g$  измеряется по профилям линий водорода и гелия (например, по линиям со штарковским уширением).

Подобным образом для LS IV-04 I с помощью SFIT была рассчитана стандартная сетка из 40 модельных спектров в диапазоне длин волн 3850–5010 Å с  $T_{\text{eff}} = 11\,000, 13\,000, 15\,000, 18\,000, 20\,000, 22\,000, 24\,000, 25\,000$  К,  $\lg g = 2.0(0.5)4.0$  и содержанием гелия  $n_{\text{He}} = 0.10$ . Синтетический спектр с наилучшим соответствием наблюдаемому для LS IV-04 I был рассчитан для параметров  $T_{\text{eff}} = 15\,000 \pm 1000$  К,  $\lg g = 2.5 \pm 0.3$ ,  $\xi = 5.0 \pm 1.0$  км с<sup>-1</sup> и  $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.0$  dex и приведен на рис. 1 вместе со спектром звезды, нормированным с помощью программы LIME. Полный список линий представлен в таблице 3. Содержания элементов для модели с наилучшими параметрами представлены в таблице 4.

Общая металличность звезды вычисляется по значению содержаний Si и Fe. Мы использовали средние значения  $[\text{Si}/\text{H}] = -1.56$  dex и  $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.05$  dex и получили  $[\text{M}/\text{H}] = -1.81$  dex. Для сравнения, магний и кремний находятся в дефиците почти на  $-1.3$  и  $-1.5$  dex соответственно, что соответствует общей металличности приблизительно в  $[\text{M}/\text{H}] \approx -1.5$  dex.

Процесс определения  $\xi$  для LS IV-04 I был непросто в связи с недостаточным количеством подходящих линий отдельных элементов в спектре. По этой причине МакКосленд и др. [7] приводят значение  $\xi = 15$  км с<sup>-1</sup> для этой звезды. Это согласуется со значением, приведенным в работе [33] для звезд с низкой силой тяжести. Принятое значение  $\xi$



**Рис. 1.** Спектр LS IV-04 1, полученный на AAT/UCLES (точки), и наилучшая аппроксимация:  $T_{\text{eff}} = 15000 \pm 1000$  K,  $\lg g = 2.5 \pm 0.2$ ,  $\xi = 5.0 \pm 1.0$  км с<sup>-1</sup> и  $v \sin i = 5.0$  км с<sup>-1</sup>. Данное решение было получено по сетке моделей с  $[M/H] = -1.8$  dex при помощи опции solve в коде SFIT.

**Таблица 3.** Идентификация линий для LS IV-04 1 и LB 3116

LS IV-04 1				LB 3116			
Элемент	$\lambda, \text{Å}$	Элемент	$\lambda, \text{Å}$	Элемент	$\lambda, \text{Å}$	Элемент	$\lambda, \text{Å}$
Si II	3853.66	Si II	4130.88	He I	3867.47	Si II	4128.07
Si II	3856.02	Fe II	4233.17	He I	3871.79	He I	4143.76
Si II	3862.60	H I	4340.47	H I (H8)	3889.05	He I	4168.97
H I (H8)	3889.05	He I	4471.48	He I	3926.54	H I	4340.47
Ca II	3933.66	Mg II	4481.13	He I	3964.73	He I	4387.93
He I	3964.73		4481.33	H I	3970.07	He I	4437.55
Ca II	3968.47	Fe II	4508.28	N II	3995.00	N II	4447.03
H I	3970.07	Fe II	4522.63	He I	4009.26	He I	4713.14
He I	4026.36	Fe II	4583.83	He I	4026.20	H I	4861.33
H I	4101.74	H I	4861.33	O II	4069.62	He I	4921.93
Si II	4128.05			H I	4101.74	He I	5015.68
				He I	4120.81	He I	5047.74

Заметка: Линия Si II на 3853.66 Å слабая. Линии He I на 4026.36 Å Fe II на 4508.28 и 4522.63 Å слишком слабы.

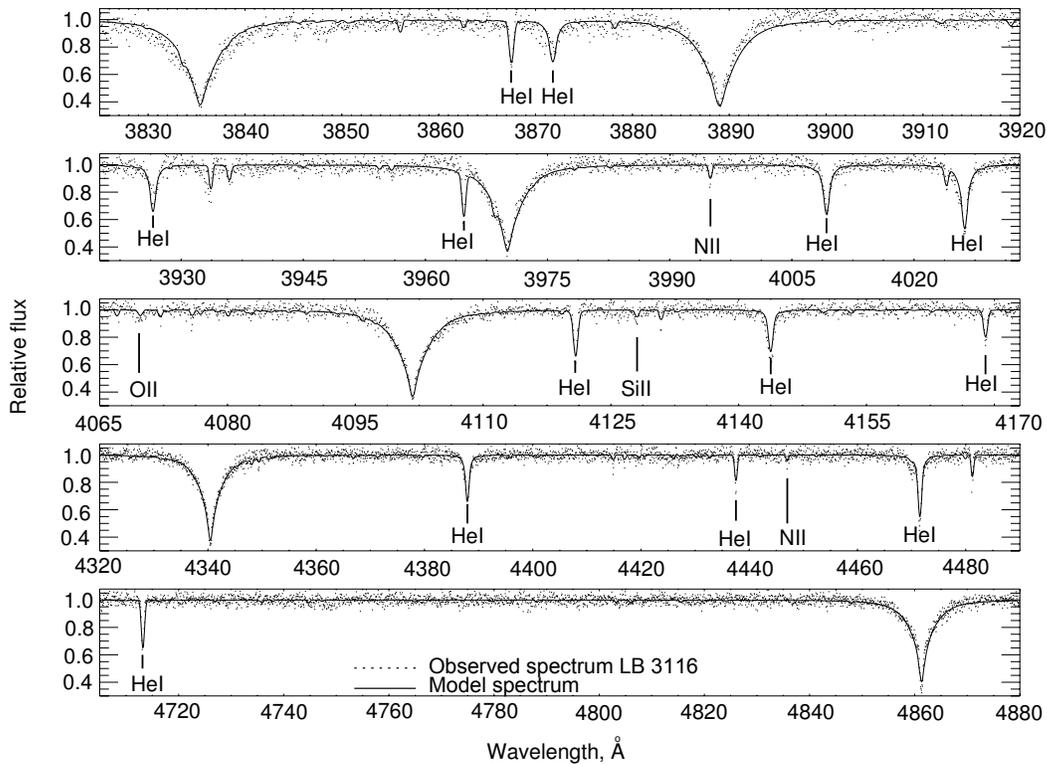


Рис. 2. Спектр LB 3116, полученный на AAT/UCLES, и наилучшая аппроксимация:  $T_{\text{eff}} = 16\,000 \pm 1000$  K,  $\lg g = 2.5 \pm 0.1$ ,  $v \sin i = 25$  км с<sup>-1</sup> и  $n_{\text{He}} = 0.06$ . Данное решение было получено по сетке моделей с  $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.0$  dex при помощи опции solve в коде SFIT.

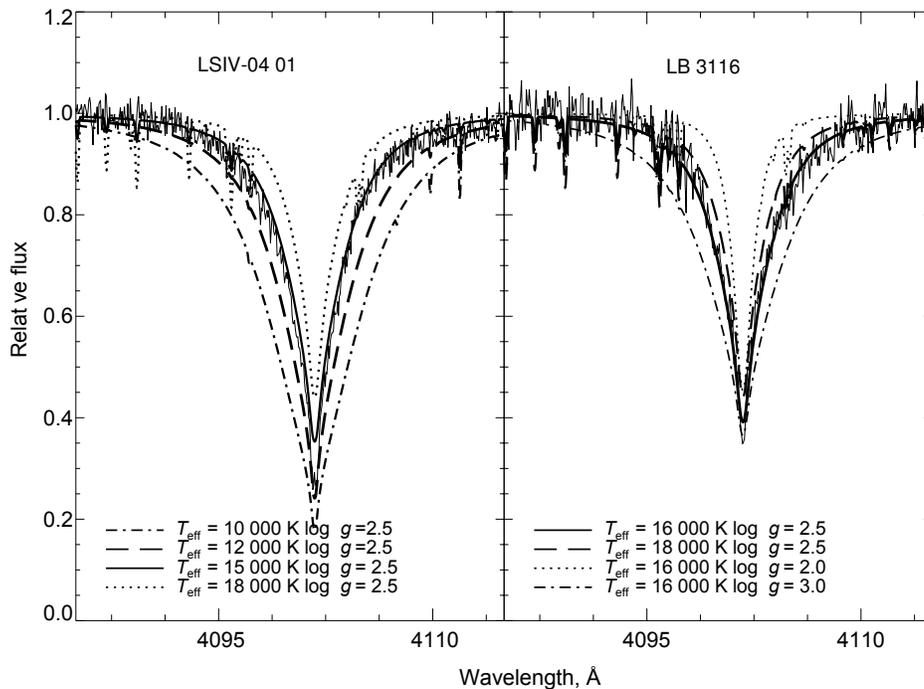


Рис. 3. Наблюдаемые и синтетические профили линии H $\delta$  для LSIV-041 (левая панель) и LB 3116 (правая панель). Синтетические профили для LSIV-041 рассчитаны для температур  $T_{\text{eff}} = 10\,000$  K,  $12\,000$  K,  $15\,000$  K, и  $18\,000$  K при  $\lg g = 2.5$ . Для LB 3116 синтетические профили рассчитывались для  $T_{\text{eff}} = 16\,000$  K и  $18\,000$  K и значениями  $\lg g = 2.0$ ,  $2.5$  и  $3.0$ . Наилучшие соответствия обозначены сплошными линиями на обеих панелях.

**Таблица 4.** Итоговые содержания, полученные в SFIT при помощи опции synth. Содержания элементов в фотосфере LS IV-04 1 и LB 3116 даны как  $\lg n$ , нормированы на  $\lg \Sigma \mu p = 12.15$ , и сравниваются с солнечным химическим составом [32]

Звезда	LB 3116		LS IV-04 1		LS IV-04 1		LS IV-04 1		Солнце
	Данная работа		Данная работа		McD92		CJM02		ASP09
Элемент	$\lg \epsilon(X)$ ,	$[X/Fe]$ ,	$\lg \epsilon(X)$ ,	$[X/Fe]$ ,	$\lg \epsilon(X)$ ,	$[X/Fe]$ ,	$\lg \epsilon(X)$ ,	$[X/Fe]$ ,	$\lg \epsilon_{\odot}(X)$ ,
	dex	dex	dex	dex	dex	dex	dex	dex	dex
He	$10.98 \pm 0.01$	0.98	$8.68 \pm 0.02$	-0.20	$10.40 \pm 0.8$	1.07	10.72	2.18	10.93
C	$6.10 \pm 0.44$	-1.40	$<5.79 \pm 0.09$	$<-0.59$	$\leq 7.20 \pm 0.10$	0.36	...	...	8.43
N	$7.84 \pm 0.17$	0.94	$<5.30 \pm 2.15$	$<-0.48$	...	...	...	...	7.83
O	$8.25 \pm 0.29$	0.49	$<5.0$	$<-1.64$	...	...	...	...	8.69
Mg	$6.50 \pm 0.01$	-0.17	$6.32 \pm 0.01$	0.77	$5.60 \pm 0.20$	-0.40	$5.32 \pm 0.18$	0.11	7.60
Al	$5.86 \pm 0.01$	0.34	...	...	...	...	...	...	6.45
Si	$6.20 \pm 0.10$	-0.38	$5.99 \pm 0.01$	0.53	$5.50 \pm 0.10$	-0.41	$5.47 \pm 0.17$	0.35	7.51
P	$6.16 \pm 0.47$	1.68	...	...	...	...	...	...	5.41
S	$5.97 \pm 0.36$	-0.22	...	...	...	...	...	...	7.12
Ca	...	...	$5.18 \pm 0.02$	0.89	3.30	-1.44	$2.80 \pm 0.03$	-1.15	6.34
Fe	$6.57 \pm 0.28$	0.00	$5.45 \pm 0.30$	0.00	$\leq 5.90 \pm 0.20$	0.00	$5.11 \pm 0.13$	0.00	7.50

McD92: содержания для LS IV-04 1 приведены в работе [7]; CJM02: [9]; ASP09: [32]

составило  $5 \text{ km s}^{-1}$ . Увеличение  $\xi$  привело бы к занижению содержаний. Действительно, при значении  $\xi$ , равном  $15 \text{ km s}^{-1}$ , анализ моделей атмосфер показал недостаток на 0.02, 0.04, 0.09 и 0.05 dex в содержаниях He, C, Mg и Si соответственно, тогда как содержание N оказалось завышенным почти на 0.2 dex, а содержание Ca стало ниже приблизительно на 0.4 dex.

Для LB 3116 сетка из 36 модельных спектров была вычислена со значениями параметров  $T_{\text{eff}} = 14000, 16000$  и  $18000 \text{ K}$ ,  $\lg g = 2.0(0.5)3.0$  и содержаниями гелия  $n_{\text{He}} = 0.001, 0.05, 0.10$  и  $0.50$  в диапазоне длин волн  $3825\text{--}5145 \text{ \AA}$  на основе интервала температур, полученного по фотометрическим калибровкам (см. раздел 3.1). В качестве начального шага использовалась модель с солнечной металличностью. SFIT SOLVE дала  $T_{\text{eff}} = 16600 \text{ K}$  и  $\lg g = 2.7$  при использовании такой сетки. Наилучшее соответствие было получено для модели с параметрами  $T_{\text{eff}} = 15000 \text{ K}$ ,  $\lg g = 2.5$  и  $n_{\text{He}} = 0.06$  (см. рис. 2). Поясним некоторые моменты полученного результата. Красное крыло линии H I на  $3889 \text{ \AA}$  аппроксимируется плохо. Синтетические спектры в линиях He I на 3926, 4009, 4026, 4121, 4144, 4169, 4388, 4438, 4471, 4713 и  $5016 \text{ \AA}$ , по всей видимости, аппроксимируются

хорошо. В спектре присутствует линия Mg II на  $4481 \text{ \AA}$ . Интересно, что не наблюдаются линии CNO. Мы установили верхний предел содержания для тех элементов, чьи линии не присутствуют в спектре, и скорректировали значения параметров в соответствии с ним. Принятые ошибки параметров модельных атмосфер составляют  $\pm 1000 \text{ K}$  для  $T_{\text{eff}}$  и  $\pm 0.1 \text{ dex}$  для  $\lg g$ . Содержания, полученные при наилучшем соответствии синтетического и наблюдаемого спектров, представлены в таблице 4.

[Fe/H] звезды составляет  $-0.93 \text{ dex}$ . Al, Si и S демонстрируют дефицит (по сравнению с Солнцем) на  $-0.6, -1.4$  и  $-1.4 \text{ dex}$  соответственно, указывая на общую металличность  $[M/H] = -1.1 \text{ dex}$ . Средняя металличность звезды, вычисленная по отношениям [Fe/H], [Al/H], [Si/H] и [S/H], составляет  $[M/H] = -1.1 \text{ dex}$ .

Сетки моделей для LS IV-04 1 и LB 3116 были рассчитаны для  $\xi$ , равного  $5.0 \text{ km s}^{-1}$ . Солнечная металличность была использована в качестве начальных условий анализа. При построении модельных спектров LS IV-04 1 и LB 3116 была использована атомная база данных LTE LINES. Это компилятивная база атомных данных для линий элементов в синем видимом диапазоне

( $\lambda\lambda$  4000–5000 Å), которая может быть использована для ЛТР-анализа звезд ранних типов [34]. Все модели, использованные в нашем анализе, были вычислены в приближении ЛТР, так как эффективные температуры исследуемых звезд ниже значения в 30 000 К, после которого могут себя проявить эффекты не-ЛТР [35].

### 3.3. Бальмеровские линии

Несмотря на то, что SFIT имеет возможность оценивать  $\lg g$  по профилям водородных и гелиевых линий, для его определения мы сравнивали наблюдаемые и теоретические профили только спектральной линии H $\delta$ , фиксируя значения  $T_{\text{eff}}$ . Диапазон  $T_{\text{eff}}$  составлял  $10\,000 < T_{\text{eff}} < 18\,000$  К. Синтетические профили вычислялись с помощью ЛТР-кода SPECTRUM. На рис. 3 сравнение синтетических и наблюдаемых линий для исследуемых звезд. Для сравнения мы также приводим синтетические спектры, рассчитанные для параметров из литературы (см. подпись к рис. 3).

### 3.4. Тестирование моделей атмосфер, атомных данных и метода анализа

Для того чтобы проверить достоверность моделей атмосфер, атомных данных и используемого в исследовании метода, мы проанализировали спектр HD 35039 (HR 1765; последующая статья в разработке), полученный на 3.9-м телескопе AAT со спектрографом UCLES.

В различных литературных источниках эта карликовая звезда раннего класса В (В2V [17]) была исследована в качестве стандарта химического состава (например, в работах [36, 37]).

Модель с наилучшей аппроксимацией, полученная для HD 35039 с помощью кода SFIT, получена со следующими параметрами:  $T_{\text{eff}} = 22\,000 \pm 1300$  К,  $\lg g = 3.5 \pm 0.3$ ,  $\xi = 6.0 \pm 3.0$  км с<sup>-1</sup>,  $v \sin i = 5.0 \pm 1.0$  км с<sup>-1</sup> и  $V_{\text{HEL}} = 27.5 \pm 1.0$  км с<sup>-1</sup>. Найденная металличность звезды составила  $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.02$  dex, что согласуется с металличностью, найденной в работе [38]:  $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.09$  dex. Модель с наилучшей аппроксимацией, а также спектр HD 35039 для бальмеровской серии водорода представлены на рис. 4 вместе со спектром звезды, нормированным в LIME. Параметры, полученные по модели, согласуются с параметрами, найденными в литературе [37–43].

После идентификации линий мы измерили эквивалентные ширины в спектре тем же методом, что и в работе [44], и сравнили со значениями, найденными LIME [22]. Результаты хорошо согласуются в пределах 5 mÅ. Сравнение эквивалентных ширин O II для HD 35039 с работой [38] не

обнаруживает никаких систематических различий между двумя наборами данных; формальное решение методом наименьших квадратов дает градиент 0.93 и разницу в нуль-пункте в 0.001 Å. Согласие со статьей [45] также удовлетворительно. Сравнение фотометрических содержаний со значениями, опубликованными в работе [36], показывает хорошее согласие в пределах ошибок.

#### 3.4.1. Тестирование параметров модели атмосферы для LS IV-04 I

Критерий  $\chi^2$  был применен для тестирования  $T_{\text{eff}}$  и  $\lg g$ . Сначала был использован интерфейс SFIT SOLVE для построения сетки синтетических спектров в интервале  $11\,000 \leq T_{\text{eff}} \leq 25\,000$  К с шагом в 1000 К. При зафиксированных значениях эффективной температуры далее была протестирована величина  $\lg g = 2.5$ . На рис. 5 показана зависимость полученных значений  $\chi^2$  от температуры. Минимум кривой на диаграмме  $T_{\text{eff}} - \chi^2$  дает наиболее вероятный интервал для  $T_{\text{eff}}$ , который в нашем случае равен  $15\,000 < T_{\text{eff}} < 17\,000$  К. Мы повторили ту же процедуру для  $\lg g$  в интервале значений от 2.0 до 4.0 dex с шагом 0.2 dex. Показатель  $\lg g$  фиксировался, после чего проверялось значение  $T_{\text{eff}} = 15\,000$  К. Этот тест дал наиболее вероятный диапазон значений для  $\lg g$ , а именно:  $2.3 < \lg g < 2.5$  dex (см. правую панель на рис. 5). Таким образом, принятые ошибки  $T_{\text{eff}}$  и  $\lg g$  составляют  $\pm 1000$  К и  $\pm 0.2$  dex соответственно.

Кроме того, мы разделили спектр звезды на две половины и использовали SFIT для построения синтетических спектров для двух разных диапазонов длин волн. Первый диапазон содержал область 3850–4300 Å (верхние сплошные кривые на обеих панелях на рис. 4). Второй диапазон содержал область 4300–4950 Å. Этот тест степени согласия подтвердил результаты, полученные по критерию  $\chi^2$  в подходе полного спектра.

#### 3.4.2. Тестирование параметров модели атмосферы для LB 3116

Метод  $\chi^2$  был также применен для тестирования  $T_{\text{eff}}$  и  $\lg g$  для LB 3116. На этот раз код SFIT был применен для построения синтетических спектров в диапазоне эффективных температур  $12\,000 \leq T_{\text{eff}} \leq 19\,000$  К с шагом в 500 К. Проверялось значение  $\lg g = 2.5$  способом, описанным выше. Вычисленные значения  $\chi^2$  были нанесены на график в зависимости от температуры рис. 6. Далее та же процедура была применена к  $\lg g$  в интервале  $1.0 \leq \lg g \leq 4.0$  dex с шагом 0.5 dex и  $T_{\text{eff}} = 15\,000$  К. Эти проверки дают наиболее вероятные значения  $T_{\text{eff}} = 15\,000$  К и  $\lg g = 2.6$ . Принятые ошибки  $T_{\text{eff}}$  и  $\lg g$  составили  $\pm 1000$  К и  $\pm 0.1$  dex соответственно.

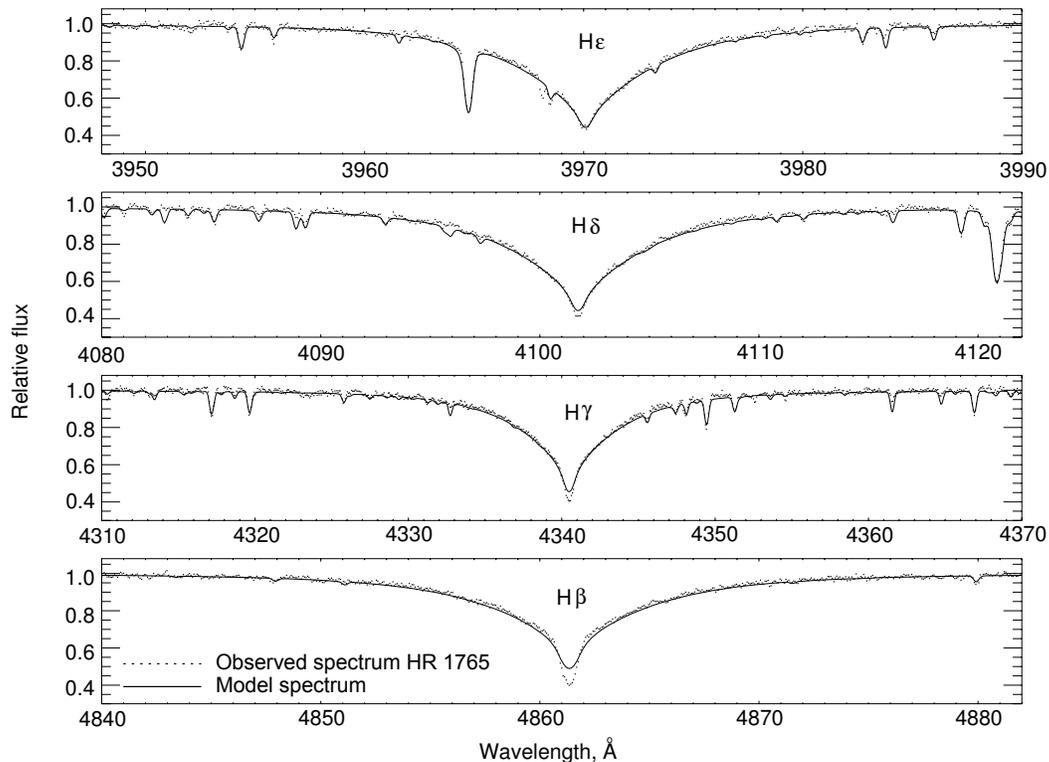


Рис. 4. Определение параметра  $\lg g$  для звезды HD 35039. Наблюдаемые профили линий He $\epsilon$ , H $\delta$ , H $\gamma$  и H $\beta$  наложены на теоретические ЛТР-спектры, вычисленные SPECTRUM (наилучшее соответствие показано сплошной линией) с параметрами  $T_{\text{eff}} = 22\,000 \pm 1300$  К,  $\lg g = 3.5 \pm 0.3$ ,  $\xi = 6.0 \pm 3.0$  км с $^{-1}$  и  $v \sin i = 5.0 \pm 1.0$  км с $^{-1}$ . Значения параметров модели получены для  $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.0$  dex с помощью опции SOLVE в программе SFIT.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

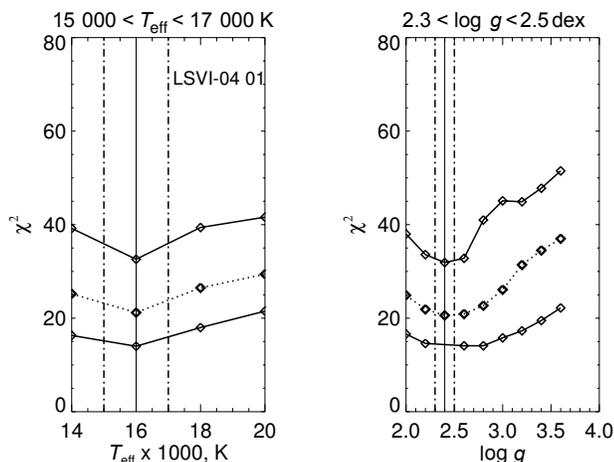
В следующих подразделах мы сделаем попытку внимательно исследовать возможную принадлежность LS IV-04 1 скоплению M 10, основываясь на полученных значениях металличности, расстояния и лучевой скорости. Мы также обсуждаем принадлежность исследуемых звезд к классу горячих PAGB в свете полученного химического состава. Кроме того, мы делаем комментарии к предыдущим исследованиям горячих PAGB звезд класса B.

##### 4.1. LS IV-04 1 как звезда в поле M 10

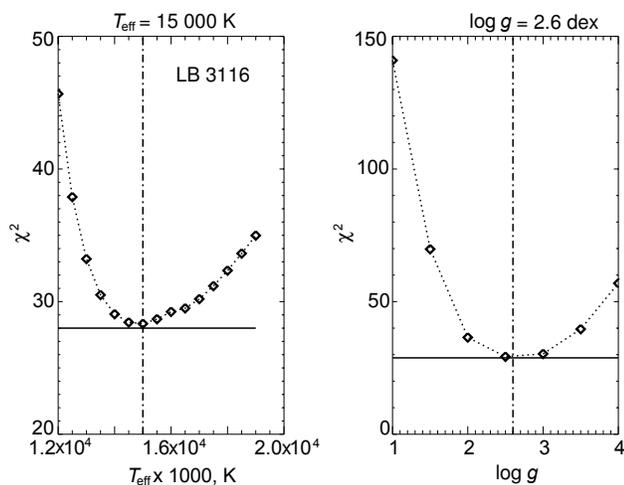
LS IV-04 1 очень низкометалличная звезда,  $[\text{M}/\text{H}] \approx -1.8$  dex, а ее спектр демонстрирует дефицит C, N, O, Mg, Si, Ca, что вероятнее всего указывает на то, что это звезда населения II, которая принадлежит классу PAGB. У звезды также наблюдается недостаток гелия примерно на 0.2 dex ( $[\text{He}/\text{Fe}] = -0.2$  dex).

Она наблюдается в поле шарового скопления M 10, находящемся на расстоянии почти 4.4 кпк [46] от Солнца. На диаграмме ГР, исходя из ее параметров атмосферы и предполагая, что она находится на стадии PAGB, масса звезды оценивается как  $0.546 M_{\odot}$  по эволюционным

трекам [47] и [48]. Формула для расстояния, полученная на основе спектрального анализа двадцати пяти PNe [49] звезд, дает для исследуемой звезды  $4.6 \pm 1.2$  кпк. Это расстояние на удивление хорошо согласуется с расстоянием до шарового скопления [46] (4.4 кпк). Отношение «тяготение—радиус»,  $g \propto M/R^2$ , было использовано для оценки радиуса, который оказался порядка  $5 \times 10^6$  км (около  $7.2 R_{\odot}$ ), что соответствует светимости порядка  $2.3 \times 10^3 L_{\odot}$ . Эта светимость была подтверждена с помощью отношения «масса ядра—светимость» [50] для звезд AGB. Масса ядра в  $0.5 M_{\odot}$  дает светимость  $2.5 \times 10^3 L_{\odot}$ , что хорошо согласуется с нашим определением светимости звезды. Однако масса ядра  $0.6 M_{\odot}$  соответствовала бы светимости  $6.8 \times 10^3 L_{\odot}$ . Похожая светимость ( $6.9 \times 10^3 L_{\odot}$ ) может быть получена из соотношения из работы [51]. Соотношение «светимость—масса ядра» из статьи [52] дает несколько более высокое значение. Светимости, принятые в работе [19] для галактического толстого диска и PAGB звезд гало торуньского каталога, варьируются в пределах  $1700\text{--}2000 L_{\odot}$ . Грубая оценка [19] для LS IV-04 1 и LB 3116,  $1700 \pm 750 L_{\odot}$ , была получена из соотношения



**Рис. 5.** Проверка критерия  $\chi^2$  для модельных параметров LS IV-04 1, выполненный с помощью опции SOLVE в программе SFIT. Пунктирные кривые на обоих панелях показывают результаты применения метода проверки  $\chi^2$  в подходе полного спектра. Результаты для каждой секции, полученные после разделения спектра на две половины, представлены черными сплошными кривыми.



**Рис. 6.** Определение критерия  $\chi^2$  для проверки параметров модели атмосферы для LB 3116. Пунктирная кривая показывает результат использования метода.

«масса ядра—светимость» из работы [53], и она согласуется со светимостью, полученной из нашего анализа моделей атмосфер ( $2.3 \times 10^3 L_{\odot}$ ).

Оценка покраснения для LS IV-04 1 из работы [19],  $E(B - V) = 0.28 \pm 0.03$ , дает расстояние в  $6.86 \pm 1.53$  кпк, нижний предел которого совпадает с вычисленным нами расстоянием для звезды ( $4.6 \pm 1.2$  кпк). С другой стороны, более слабое поверхностное ускорение силы тяжести, например, 2.0 из статьи [7], давало бы оценку расстояния в  $8.2 \pm 2.1$  кпк, исходя из формулы расстояний [49]. Кроме того, параметры модели [7] указывают на

металличность на 0.5 dex ниже, а также сильный дефицит в содержании Ca ( $[Ca/Fe] = -1.4$  dex). Авторы не указывают содержание азота и кислорода (см. таблицу 4).

Металличность M 10, оцененная в работе [46], равна  $[Fe/H] = -1.6 \pm 0.2$  dex. Крафт и др. [54] приводят содержание железа  $[Fe/H] = -1.52 \pm 0.02$  по пятнадцати ярким гигантам скопления. Однако металличности в этой выборке меняются от звезды к звезде в пределах  $-1.4 < [Fe/H] < -1.7$ , а две звезды скопления имеют  $[Fe/H] \approx -1.7$ . Следовательно, помимо расстояния, металличность  $[M/H]$  LS IV-04 1, определенная нами как  $-1.8$  dex, также сравнима с металличностью скопления.

Значение лучевой скорости для M 10, приведенное в работе [46], составляет  $V_{HEL} = 75$  км с<sup>-1</sup>. Расторгуев и Самусь [55] измерили лучевые скорости двадцати четырех звезд в скоплении. Среднее значение лучевых скоростей по двадцати четырем звездам составляет  $76 \pm 5$  км с<sup>-1</sup>, при этом лучевые скорости варьировались от звезды к звезде от 68.3 км с<sup>-1</sup> до 85.4 км с<sup>-1</sup>. Двенадцать звезд в их выборке имеют лучевые скорости, равные примерно 80 км с<sup>-1</sup>. Лучевая скорость LS IV-04 1, измеренная нами, составляет  $V_{HEL} = 87.5$  км с<sup>-1</sup> ( $V_{LSR} = 103.2$  км с<sup>-1</sup>).

#### 4.2. Сравнение с предыдущими исследованиями PAGB

Эффективная температура, приведенная для LS IV-04 1 в работе [9], по всей видимости, схожа с той, что была получена в работе [7], однако оценки ускорения силы тяжести и микротурбулентности в этих двух работах очевидно различаются. Содержания, найденные в [9], как правило на 0.5 dex ниже, чем те, что приводятся в работе [7] для Mg, Si, Ca. Разность содержания составляет  $\pm 1.1$  dex для гелия и 0.8 dex для Fe.

Наблюдения звезды, выполненные на AAT/UCLES, указывают на фотосферу, исчерпавшую такие продукты горения He как C, N, O. Следовательно, для содержания CNO мы устанавливаем только верхние пределы (см. таблицу 4). Линия C II на 4267 Å оказалась слишком слабой. Присутствие линии было отмечено в статье [8] в спектре низкого разрешения ( $100 \text{ \AA} \text{ мм}^{-1}$ ). Так как наш спектр имеет гораздо более высокое разрешение (порядка  $0.1 \text{ \AA} \text{ пиксель}^{-1}$ ), вероятно, линия была неверно отождествлена, или ее исчезновение может означать наличие реального физического процесса, который требует правдоподобного объяснения. Действительно, спектры горячих PAGB звезд, покинувших стадию AGB до третьего конвективного перемешивания, могут демонстрировать нехватку

углерода. Такой дефицит углерода, как у LS IV-041 и LB 3116, часто приводился в литературе для горячих PAGB звезд (см., например, [56]). Стоит также отметить предельные примеры в литературе. Например, PG 1323-086 показывает  $[C/H] = -2.23$  dex [5], а для PHL 174 найдено значение  $[C/H] = -2.3$  dex [57]. Кроме того, в спектрах горячих звезд PAGB также наблюдался дефицит азота [5], как в случае с LS IV-041.

LB 3116, по всей видимости, является звездой, богатой гелием. Спектр звезды обнаруживает нехватку углерода ( $[C/Fe] = -1.4$  dex). Фотосфера обогащена азотом ( $[N/Fe] = 0.94$  dex), также наблюдается небольшой избыток кислорода ( $[O/Fe] \approx 0.5$  dex). Дефицит содержания Mg, Si и S умерен. Наблюдается небольшой избыток Al ( $[Al/Fe] = 0.3$  dex). На содержание Al, скорее всего, влияет внутренний ядерный синтез. Видимое переизбыток азота можно отнести ко второму конвективному перемешиванию или к процессу HBB [58]. Первый процесс происходит сразу после истощения гелиевого ядра, когда звезда восходит на ветвь AGB. Этот процесс выводит продукты горения водорода ( ${}^4\text{He}$  и  ${}^{14}\text{N}$ ) на поверхность, одновременно понижая содержания  ${}^{12}\text{C}$  и  ${}^{16}\text{O}$  [59, 60]. Например, такой избыток азота был отмечен у CPD-61 455 ( $[N/H] = +0.38$  dex [61]). Что касается кислорода, в литературе приводились и избытки, и дефицит его содержания в горячих PAGB звездах [7]. Избыток кислорода, наблюдаемый в LB 3116, возможно, связан с процессом HBB, при котором происходит насыщение кислородом за счет углерода. В этом процессе  ${}^{12}\text{C}$  преобразуется в  ${}^{13}\text{C}$  и  ${}^{14}\text{N}$ , что предотвращает обогащение углеродом (т.е. C/O остается менее 1). С другой стороны, другие продукты процесса HBB, такие как изотопы Ne, Ca, Mg и Al, также могут быть вынесены на поверхность в периоды внутренних пульсаций [58]. Последние могут быть причиной наблюдаемых избытков Mg и Ca в спектре LS IV-041 в нашем исследовании. Содержание фосфора — наиболее интригующий результат нашего исследования. Мы нашли его переизбыток (порядка  $1.7 \pm 0.5$  dex) у LB 3116, что означает, что эта звезда может быть первым примером звезды PAGB с обогащенной фосфором фотосферой. Мы не обнаружили линий фосфора в спектре LS IV-041, а, следовательно, для этой звезды, содержание фосфора было зафиксировано на 5.45 dex, солнечном значении содержания фосфора.

Для содержания серы мы смогли установить только верхний предел, так как она не присутствует в спектре LB 3116. Опубликованные в литературе результаты показывают или нехватку, или избыток этого элемента [56]. Присутствуют несколько

слабых линий Si II, на основе которых и определяется содержание кремния. Дефицит составляет примерно 0.4 dex. Однако отсутствие линий Si III в спектре LB 3116 может означать нечто иное. Содержание Mg измеряется по линии Mg II 4481 Å путем сопоставления линии с профилем, вычисленным в программе SFIT SYNTHE. Найденное значение меньше, чем у Солнца. В действительности линия Mg II является мультиплетом с переходами на  $\lambda\lambda$  4481.126, 4481.150 и 4481.352 Å, которые блендируются с Al III.

При нанесении LB 3116 на диаграмму ГР с найденными параметрами атмосферы эта звезда ложится рядом с треком  $0.565 M_{\odot}$ , взятым из работы [47]. Светимость, принятая для LB 3116 в статье [19], составляла  $1700 \pm 750 L_{\odot}$ . Отношение «светимость—масса» дает светимость почти  $2.9 \times 10^3 L_{\odot}$ . Спектральное распределение энергии, основанное на исследовании [19], дает расстояние до объекта в  $8.11 \pm 1.83$  кпк с учетом покраснения  $E(B - V) = 0.04$ . Соотношение «светимость—масса ядра» из работы [52] дает  $L/L_{\odot} \approx 5.7 \times 10^3$ , а соотношение из статьи [51] дает  $L/L_{\odot} = 4.8 \times 10^3$  для массы ядра в  $0.565 M_{\odot}$ .

В спектрах LS IV-041 и LB 3116 нет каких-либо очевидных эмиссионных деталей, однако уплощенная форма ядер H $\beta$  и H $\delta$  была обнаружена в спектрах AAT/UCLES у LS IV-041. Кроме того, по данным IRAS, у звезд отсутствуют инфракрасные потоки. Хотя эти два упомянутых выше свойства обычно принимают за признаки эволюционных фаз PNe и post-AGB соответственно, горячая звезда-кандидат в post-AGB из литературы привлекла наше внимание. LSE 148 (HD 177566) — низкометаллический горячий кандидат в post-AGB без эмиссионных линий в спектре и с гораздо более высокой температурой фотосферы и тяготением по сравнению с нашими двумя звездами. У звезды полностью отсутствует инфракрасный избыток. В спектре LSE 148 обнаружили такую же уплощенную форму ядер в профилях H $\alpha$  и H $\beta$ , как и в случае LS IV-041 [62], а также отсутствие линий C III 4647 Å и N II 3995 Å, тогда как наличие этих линий было отмечено в [63]. Оценка массы звезды [63] составляет  $0.55 M_{\odot}$ . Следовательно, околозвездная оболочка такой звезды могла диссипировать уже во время стадии post-AGB. Следует отметить, что звезда массой  $0.55 M_{\odot}$  может провести в фазе post-AGB  $10^4$ – $10^5$  лет, и этот факт безусловно мог бы объяснить отсутствие эмиссионных линий не только в наблюдаемом спектре LSE 148, но и в спектрах LS IV-041 и LB 3116.

Другие варианты эволюционного статуса исследуемых звезд также заслуживают обсуждения и

более тщательного исследования. Горячие субкарлики класса O (sdO) являются проэволюционировавшими объектами со светимостями, сравнимыми со звездами PAGB, но без больших поверхностных тяготений (в пределах 5.0–6.0 dex [64]), а также в некоторых случаях со спектрами, богатыми гелием. LS IV-04 I демонстрирует умеренный дефицит содержания гелия, но у LB 3116 содержание гелия высоко (см. таблицу 4). Однако тяготение обеих звезд гораздо ниже по сравнению со значениями для звезд sdO. На рис. 7 для примера представлена диаграмма  $\lg T_{\text{eff}} - \lg g$  для выборки звезд sdOB из работы [67]. LS IV-04 I и LB 3116 явно расположены на удалении от них. Фактически выборка звезд sdOB из работы [31] совпадает с post-НВ треками из статьи [65]. LSE 148 и LS IV-04 I близки к post-AGB треку с  $0.55 M_{\odot}$ . Хебер и Кудритцки [67] также отмечают существование sdO звезд, эволюционирующих прямо из стадии AGB, со значениями  $\lg g$  меньшими, чем у типичных sdOB, которые находились ранее на экстремальной горизонтальной ветви. Более того, некоторые звезды могут эволюционировать прямо в стадию белого карлика (т.е. это несостоявшиеся AGB звезды) не испытывая тепловых пульсаций [65], характерных для ранних post-AGB звезд. В сравнении с истинными post-AGB-звездами ранние звезды post-AGB — менее яркие объекты со значениями светимости  $\lg(L/L_{\odot}) \leq 3$  [65]. Однако зависимость «светимость–масса ядра» из работы [51] для обеих наших звезд указывает на гораздо большие светимости, чем у ранних post-AGB.

Горячие post-AGB звезды также имеют отличительные свойства в ультрафиолете. Эти звезды могут демонстрировать линии C II 1335 Å, Si IV 1394 Å и C IV 1550 Å УФ-спектрах. Спектр IUE, полученный с камерой SWP для LB 3116, имеет покрытие длин волн от 1150 Å до 1950 Å. Кроме линий Si II 1300 Å и Si IV 1400 Å УФ-спектр звезды имеет относительно сильные переходы C II и C IV на 1335 Å и 1550 Å соответственно. К сожалению, для LS IV-04 I УФ-спектр отсутствует. Еще одним и последним замечанием к ультрафиолетовым свойствам LB 3116 может стать распределение УФ-энергии этого объекта.

Эффективная температура и поверхностное тяготение LB 3116 также могут быть использованы для проверки природы звезды. Следуя рассуждениям [12], конвертация углового диаметра LB 3116, найденного [12] из анализа спектрального распределения энергии звезды, в значение радиуса для нескольких расстояний дало бы более точный вариант соотношения  $M-L$  (см., например, рис. 4а в [12]). Вычисленные таким образом значения радиуса затем можно использовать в соотношениях

$L \propto R^2 T_{\text{eff}}^4$  и  $g \propto M/R^2$  для составления отношения  $M-L$ . Если соотношение  $M-L$  для звезды нанести на график совместно с треками разных стадий звездной эволюции, таких как post-AGB, НВ и post-НВ, можно получить грубую оценку эволюционного статуса объекта. В [12] были использованы треки post-AGB из работы [52], однако в нашем исследовании мы предпочитаем пользоваться треками из статьи [51]. Такая оценка статуса звезды, конечно, зависит от того, насколько точно измерен ее диаметр. Поэтому, пользуясь тем же методом, что и в [12], но с набором параметров, полученным нами в данной работе, и используя более новые эволюционные треки post-AGB, мы видим, что значения  $M-L$  пересекают треки для фазы post-AGB на расстоянии в 6.5 кпк, что в пределах ошибок согласуется со значением расстояния, полученным для звезды в статье [19].

Еще один альтернативный метод, который может дать дополнительную информацию о природе изучаемых звезд — это их кинематика. У звезд отсутствуют параллаксы в базе данных HIPPARCOS. Координаты из базы SIMBAD, данные о собственном движении из работы [68] и расстояние из исследования [19] вкупе с лучевой скоростью звезды LS IV-04 I, полученной в настоящей работе, дают следующие галактоцентрические компоненты пространственной скорости:  $(U, V, W) = -155.2 \pm 12.2, -60.7 \pm 26.9, -78.3 \pm 31.1$  км с<sup>-1</sup> (не исправлено за движение ЛСП). Вычисленные апогалактическое и перигалактическое расстояния звезды составляют 5.7 кпк и 3.0 кпк соответственно. Эти расстояния дают среднее (лучевое) галактоцентрическое расстояние в 4.4 кпк. Максимальное удаление от галактической плоскости составляет порядка 4.0 кпк. Вычисленная орбита звезды имеет эксцентриситет 0.3. Для LB 3116 пространственные скорости имеют гораздо большие ошибки. Недавние данные о собственном движении [69] и расстояние [19] дают апогалактическое расстояние в 11.8 кпк и перигалактическое расстояние в 1.3 кпк. Среднее галактоцентрическое расстояние звезды составляет около 6.5 кпк. Максимальное удаление от плоскости Галактики для LB 3116 равно 11.6 кпк. Следовательно, в свете вышеупомянутых результатов, учитывая большую лучевую скорость ( $V_{\text{LSR}} = 96.2$  км с<sup>-1</sup>) и фотосферу с дефицитом CNO-элементов, PAGB статус LS IV-04 I выглядит наиболее вероятным. Однако, эта звезда также может рассматриваться в статусе ранней стадии post-AGB.

С другой стороны, будучи звездой с большой лучевой скоростью и находящейся на большой галактической широте, а также с наблюдаемым недостатком C, Mg, Si и S, LB 3116, скорее всего, яв-

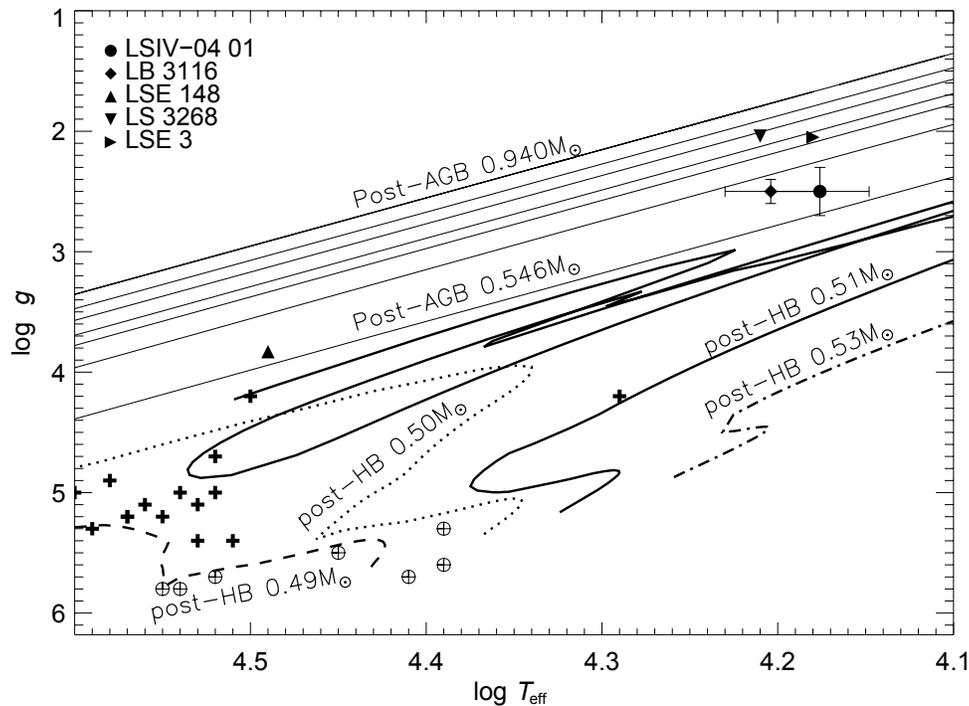


Рис. 7. Положения LB 3116 и LS IV-04 1 на диаграмме  $T_{\text{eff}}-\lg g$ . Также показаны эволюционные треки post-HB для масс ядер звезд 0.49, 0.50, 0.51 и 0.53  $M_{\odot}$  из работы [65], эволюционные треки post-AGB для масс ядер 0.546 и 0.565  $M_{\odot}$  из статьи [47] и для масс ядер 0.605, 0.625, 0.696, 0.836 и 0.940  $M_{\odot}$  из работы [66]. Мы также включили звезды sdOB из исследований [67] (кружки с крестиками) и [31] (жирные крестики).

ляется горячей PAGB звездой. Необходимы точные определения расстояний для обеих программных звезд.

### БЛАГОДАРНОСТИ

В работе используются наблюдения, полученные на Англо-Австралийском Телескопе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Renzini and F. Fusi Pecci, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **26**, 199 (1988).
2. R. D. Oudmaijer, *Astron. and Astrophys.* **306**, 823 (1996).
3. T. Bloeker, *Astron. and Astrophys.* **299**, 755 (1995).
4. M. Reyniers, G. C. van de Steene, P. A. M. van Hoof, and H. van Winckel, *Astron. and Astrophys.* **471**, 247 (2007).
5. S. Moehler and U. Heber, *Astron. and Astrophys.* **335**, 985 (1998).
6. J. J. Nassau and C. B. Stephenson, *Hamburger Sternw. Warner Swasey Obs.* (1963).
7. R. J. H. McCausland, E. S. Conlon, P. L. Dufton, and F. P. Keenan, *Astrophys. J.* **394**, 298 (1992).
8. D. Kilkeny and L. Pauls, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **244**, 133 (1990).
9. C. J. Mooney, W. R. J. Rolleston, F. P. Keenan, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **337**, 851 (2002).
10. D. Kilkeny and J. Lydon, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **218**, 279 (1986).
11. E. B. Newell, *Astrophys. J. Suppl.* **26**, 37 (1973).
12. D. A. Quin and H. J. G. L. M. Lamers, *Astron. and Astrophys.* **260**, 261 (1992).
13. D. Kilkeny, P. W. Hill, and A. Brown, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **178**, 123 (1977).
14. P. W. Hill and S. R. Hill, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **133**, 205 (1966).
15. B. Hauck and M. Mermilliod, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **129**, 431 (1998).
16. J. Hardorp, K. Rohlfis, A. Slettebak, and J. Stock, *Hamburger Sternw. Warner Swasey Obs.* (1959).
17. N. Houk and A. P. Cowley, *University of Michigan Catalogue of two-dimensional spectral types for the HD stars, Vol. 1: Declinations -90 to -53.0.* (Univ. Michigan, Ann Arbor, 1975).
18. R. L. Kurucz, *Astrophys. J. Suppl.* **40**, 1 (1979).
19. S. B. Vickers, D. J. Frew, Q. A. Parker, and I. S. Bojičić, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **447**, 1673 (2015).
20. D. D. Walker and F. Diego, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **217**, 355 (1985).
21. D. Mills, J. Webb, and M. Clayton, *Starlink User Note* **152** (2003).
22. T. Şahin, *Turk J. Phys* **41**, 367 (2017).

23. N. T. Behara and C. S. Jeffery, *Astron. and Astrophys.* **451**, 643 (2006).
24. C. S. Jeffery, V. M. Woolf, and D. L. Pollacco, *Astron. and Astrophys.* **376**, 497 (2001).
25. R. Napiwotzki, D. Schoenberger, and V. Wenske, *Astron. and Astrophys.* **268**, 653 (1993).
26. R. K. Gulati, M. L. Malagnini, and C. Morossi, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **80**, 73 (1989).
27. D. Kilkeny, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **211**, 969 (1984).
28. D. J. Schlegel, D. P. Finkbeiner, and M. Davis, *Astrophys. J.* **500**, 525 (1998).
29. L. A. Balona, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **268**, 119 (1994).
30. T. T. Moon, *Communn. Univ. London Obs.*, No. 78 (1985).
31. A. Ahmad and C. S. Jeffery, *Astron. and Astrophys.* **402**, 335 (2003).
32. M. Asplund, N. Grevesse, A. J. Sauval, and P. Scott, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **47**, 481 (2009).
33. A. B. Underhill and R. P. Fahey, *Astrophys. J. Suppl.* **25**, 463 (1973).
34. C. S. Jeffery, *Newslett. on Analysis of Astronomical Spectra*, **16**, 17 (1991).
35. R. Napiwotzki, *Astron. and Astrophys.* **322**, 256 (1997).
36. N. C. Hambly, W. R. J. Rolleston, F. P. Keenan, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **111**, 419 (1997).
37. K. E. Munn, P. L. Dufton, S. J. Smartt, and N. C. Hambly, *Astron. and Astrophys.* **419**, 713 (2004).
38. K. Cunha and D. L. Lambert, *Astrophys. J.* **426**, 170 (1994).
39. S. C. Wolff and J. N. Heasley, *Astrophys. J.* **292**, 589 (1985).
40. F. P. Keenan, B. Bates, P. L. Dufton, et al., *Astrophys. J.* **348**, 322 (1990).
41. D. R. Gies and D. L. Lambert, *Astrophys. J.* **387**, 673 (1992).
42. S. Simón-Díaz, *Astron. and Astrophys.* **510**, A22 (2010).
43. M.-F. Nieva, *Astron. and Astrophys.* **550**, A26 (2013).
44. T. Şahin, D. L. Lambert, V. G. Klochkova, and N. S. Tavolganskaya, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.*, **410**, 612 (2011).
45. F. Leone and A. C. Lanzafame, *Astron. and Astrophys.* **330**, 306 (1998).
46. W. E. Harris, *Astron. J.* **112**, 1487 (1996).
47. D. Schoenberger, *Astrophys. J.* **272**, 708 (1983).
48. D. Schonberger, *IAU Symp.* **131**, 463 (1989).
49. R. H. Mendez, R. P. Kudritzki, A. Herrero, et al., *Astron. and Astrophys.* **190**, 113 (1988).
50. C. S. Jeffery, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **235**, 1287 (1988).
51. T. Bloeker, *Acta Astronomica* **43**, 305 (1993).
52. A. I. Boothroyd and I.-J. Sackmann, *Astrophys. J.* **328**, 671 (1988).
53. E. Vassiliadis and P. R. Wood, *Astrophys. J. Suppl.* **92**, 125 (1994).
54. R. P. Kraft, C. Sneden, G. E. Langer, et al., *Astron. J.* **109**, 2586 (1995).
55. A. S. Rastorguev and N. N. Samus, *Soviet Astron. Lett.* **17**, 388 (1991).
56. H. van Winckel, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **41**, 391 (2003).
57. E. S. Conlon, P. L. Dufton, F. P. Keenan, and R. J. H. McCausland, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **248**, 820 (1991).
58. F. Herwig, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **43**, 435 (2005).
59. A. I. Boothroyd and I.-J. Sackmann, *Astrophys. J.* **510**, 232 (1999).
60. S. Kwok, *Protoplanetary Nebulae* (Inst. Phys. Publ., Bristol, 2001), p. 5200.
61. N. C. Hambly, P. L. Dufton, F. P. Keenan, and S. L. Lumsden, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **278**, 811 (1996).
62. D. R. C. Mello, S. Daflon, C. B. Pereira, and I. Hubeny, *Astron. and Astrophys.* **543**, A11 (2012).
63. T. R. Kendall, P. J. F. Brown, E. S. Conlon, et al., *Astron. and Astrophys.* **291**, 851 (1994).
64. U. Heber, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **47**, 211 (2009).
65. B. Dorman, R. T. Rood, and R. W. O'Connell, *Astrophys. J.* **419**, 596 (1993).
66. T. Bloeker, *Astron. and Astrophys.* **299**, 755 (1995).
67. U. Heber and R. P. Kudritzki, *Astron. and Astrophys.* **169**, 244 (1986).
68. L. Chen, M. Geffert, J. J. Wang, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **145**, 223 (2000).
69. N. Zacharias, C. T. Finch, T. M. Girard, et al., *Astron. J.* **145**, 44 (2013).

## High Resolution Optical Spectroscopy of Hot Post-AGB Star Candidates LS IV-04 1 and LB 3116

T. Şahin

We present LTE analysis of high resolution optical spectra for B-type hot PAGB stars LS IV-041 and LB 3116 (LSE 237). The spectra of these high Galactic latitude stars were obtained with the 3.9-m Anglo-Australian Telescope (AAT) and the UCLES spectrograph. The standard 1D LTE analysis with line-blanketed LTE model atmospheres and spectral synthesis provided fundamental atmospheric parameters of  $T_{\text{eff}} = 15\,000 \pm 1000$  K,  $\log g = 2.5 \pm 0.2$ ,  $\xi = 5.0 \pm 1.0$  km s<sup>-1</sup>,  $[M/H] = -1.81$  dex, and  $v \sin i = 5$  km s<sup>-1</sup> for LS IV-041 and  $T_{\text{eff}} = 16\,000 \pm 1000$  K,  $\log g = 2.5 \pm 0.1$ ,  $v \sin i = 25$  km s<sup>-1</sup>, and  $[Fe/H] = -0.93$  dex for LB 3116. Chemical abundances of ten different elements were obtained. For LS IV-041, its derived model temperature contradicts with previous analysis results. The upper limits for its nitrogen and oxygen abundances were reported for the first time. The magnesium, silicon and calcium were overabundant (i.e.  $[Mg/Fe] = 0.8$  dex,  $[Si/Fe] = 0.5$  dex,  $[Ca/Fe] = 0.9$  dex). With its metal-poor photosphere and  $V_{\text{LSR}} \approx 96$  km s<sup>-1</sup>, LS IV-041 is likely a population II star and most probably a PAGB star. LTE abundances of LB 3116 were reported for the first time. The spectrum of this helium rich star shows 0.9 dex enhancement in the nitrogen. The photosphere of the star is slightly deficient in Mg, Si, and S. (i.e.  $[Mg/Fe] = -0.2$  dex,  $[Si/Fe] = -0.4$  dex,  $[S/Fe] = -0.2$  dex). The Al is slightly enhanced. The phosphorus is overabundant, i.e.  $[P/Fe] \approx 1.7 \pm 0.47$  dex, hence LB 3116 may be the first example of a PAGB star which is rich in phosphorus. With its high radial velocity (i.e.  $V_{\text{LSR}} = 73$  km s<sup>-1</sup>), and the deficiencies observed in C, Mg, Si, and S indicate that LB 3116 is likely a hot PAGB star at high galactic latitude.

Keywords: *stars: AGB and post-AGB—stars: individual: LS IV-04 1—stars: individual: LB 3116*