

ГИБРИДНАЯ НОВАЯ V1405 CAS С КИСЛОРОДНО-НЕОНОВЫМ ИЛИ УГЛЕРОДНО-КИСЛОРОДНЫМ БЕЛЫМ КАРЛИКОМ?

© 2024 г. Т. Н. Тарасова¹

¹НИИ Крымская астрофизическая обсерватория, Научный, Россия

Поступила в редакцию: 21.02.2023 г.

После доработки 15.04.2024 г.; принята к публикации 06.05.2024 г.

На основе спектрофотометрических наблюдений исследована оболочка новой V1405 Cas. Спектрофотометрическая эволюция показала, что она принадлежит по своим спектральным характеристикам к редкому типу гибридных новых. В период оптически толстой фазы в Бальмеровских линиях профили имели форму РСуг, лучевые скорости абсорбционных компонент профилей указывали на выбросы вещества со скоростями, достигающими $RV = -1800$ км/с. Была определена максимальная скорость расширения оболочки по полуширине профилей линий на уровне континуума, доходившая до 3300 км/с по линии H α . Получены приближенные оценки электронной концентрации $N_e = 10^7$ см⁻³, температуры $T_e = 2 \times 10^4$ К и содержания некоторых элементов. Показано, что содержание неона и железа для таких значений электронной плотности и температуры может отличаться от солнечного незначительно. Низкое содержание неона не позволяет уверенно утверждать, что белый карлик у этой новой кислородно-неоновый. Оценена масса оболочки, которая составила около $6 \times 10^{-5} M_{\odot}$.

Ключевые слова: новые звезды, спектральные наблюдения, оболочки новых.

DOI: 10.31857/S0320010824050047, EDN: MYBUAS

1. ВВЕДЕНИЕ

Новая V1405 Cas была зарегистрирована 18.20-03-2021 Накамура (2021) в момент, когда она еще не достигла максимального значения блеска (около 5 зв. величин). Объект в течение нескольких часов после открытия был классифицирован Маехара и др. (2021) как классическая новая. Короткий и др. (Тагучи и др., 2021a) отождествили ее с известной затменной переменной звездой типа U UMa CzeV3217 = Gaia EDR3 2015451512907540480, расстояние до которой было определено как 1.69 ± 0.07 пк. Иконникова и Соколовский (Тагучи и др., 2021a) подтвердили, что положение новой совпадает с этим объектом.

Фотометрические и спектроскопические наблюдения V1405 Cas в оптическом и ИК-диапазонах были проведены в течение последующих 7 мес Тагучи и др. (2021a,б), Мунари и др. (2021a,б), Герц и др. (2021), Руди и др. (2021), Шоре и др. (2021a,б), Вудворд и др. (2023), Соколовский и др. (2021), Мунари и др. (2021в) зарегистрировали начало плавного падения блеска почти через 9 мес после обнаружения новой (14 декабря 2021 г.) и одновременно с падением блеска указали на появление в спектре линий с высоким потенциалом ионизации. После этого были проведены наблюдения в рентгеновском диапазоне (Пейдж и др., 2021), которые показали наличие сверхмягкого эмиссионного компонента. Ранее со спутников NuSTAR и Swift через 2.5 сут регистрировалось слабое, но более жесткое излучение от этого объекта (Соколовский

и др., 2021). Позднее с помощью радионаблюдений на телескопе VLA Соколовский и др. (2022) показали, что вокруг новой сформировалась эллипсообразная оболочка.

В спектре, полученном Мунари и Валиса (2022) 27 ноября 2022 г., присутствовали линии неона высокой интенсивности. Авторы указали на то, что новая принадлежит к редкому классу неоновых новых. Это редкий класс новых с массивным белым карликом с массой больше $1 M_{\odot}$. Известно около 20 неоновых новых (Такеда и Диаз, 2023). Позднее Валиса и Мунари (2023) представили атлас спектральных наблюдений и фотометрических данных этой новой, где были представлены наблюдения за период от начала вспышки и вплоть до 660 сут. Спектральные наблюдения были представлены в широком диапазоне от оптического до инфракрасного со средним разрешением. Это позволило авторам проследить эволюцию спектра, исследовать профили спектральных линий. Также в этой работе по фотометрическим данным новая была классифицирована как медленная и подтверждена ранее предложенная этими авторами ее спектральная классификация FeII.

В работе Тагучи и др. (2023) спектральный класс новой был определен как HeN. Авторы, опираясь на вычисленное содержание алюминия по эмиссионной линии AlII 6237, превосходящее солнечное в 40 раз, массу белого карлика $1.1 M_{\odot}$, оцененную из поведения кривой блеска, и относительно небольшую скорость расширения оболочки, пришли к выводу, что

*Электронный адрес: taya_tarasova@mail.ru

у этой новой маломассивный кислородно-неоновый белый карлик. Эти авторы указали, что это достаточно редко встречающееся явление — маломассивный кислородно-неоновый белый карлик. В то же время этими авторами было отмечено, что повышенное содержание алюминия не обязательно указывает на кислородно-неоновый белый карлик, так же, как нормальное содержание алюминия не исключает наличие кислородно-неонового белого карлика. Тагучи и др. (2023) привели в пример новую V723 Cas и подчеркнули, что необходимы дальнейшие исследования.

В настоящей работе были проведены спектрофотометрические наблюдения в диапазоне от 3400 до 7500 Å. В спектрах присутствовали линии неона и железа высоких потенциалов ионизации. Вычисление потоков в спектральных линиях позволяет напрямую оценить содержание неона с целью получения некоторых сведений об оболочке новой. На основе этих данных были оценены электронная температура и плотность, содержание гелия, неона, аргона и железа, иона кальция, а также, масса оболочки и масса белого карлика. Кроме того, по профилям спектральных линий определена скорость расширения оболочки, сброшенной во время вспышки, ее структура. Журнал спектрофотометрических наблюдений представлен в табл. 1.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Спектральные наблюдения были выполнены на 2.6-м телескопе им. Шайна (ЗТШ). Все спектры получены с помощью щелевого спектрографа СПЭМ, установленного в фокусе Нэсмита. Приемником излучения служила ПЗС-камера SPEC-10 1340×100 пиксел. Дисперсия с решеткой 651 шт./мм составляла около $2 \text{ \AA}^{-1}$ (разрешение около 1000). Первичная обработка спектров, включающая вычитание нуля пункта АЦП (bias), коррекцию неоднородности чувствительности поля матрицы, производилась программой SPERED, созданной С.И. Сергеевым в Крымской астрофизической обсерватории. Калибровка потоков излучения в спектре звезды осуществлялась с использованием абсолютного распределения энергии спектрофотометрического стандарта HR8780, взятого из каталога Бурнашев В. И. (1985). Спектрофотометрический стандарт мы наблюдали непосредственно до экспозиции исследуемой звезды или же сразу после нее и с таким же зенитным расстоянием, поэтому различие в воздушных массах стандарта и новой не учитывалось. Поскольку спектрограф щелевой, мы для контроля сравнивали звездные величины новой в фильтрах *B* и *V* со значениями показателя цветов *B* и *V*, вычисленными из прокалиброванных спектров, полученных в эти даты. Различие между вычисленными и измеренными звездными величинами составило

Таблица 1. Журнал спектральных наблюдений новой V1405 Cas

Дата	JD (2450000+)	Сутки после максимума	Спек- тральный диапазон
01.07.2021	9397.475	105	3684–7550 Å
14.07.2021	9410.455	118	3518–7575 Å
28.07.2021	9424.384	132	3374–7575 Å
29.07.2021	9425.371	133	3403–7574 Å
14.08.2021	9441.433	149	3654–7575 Å
15.08.2021	9442.427	150	3698–7575 Å
31.08.2021	9458.369	166	3658–7575 Å
16.09.2021	9474.342	182	3570–7574 Å
27.10.2021	9515.446	223	3748–7575 Å
28.10.2021	9516.421	224	3687–7575 Å
24.11.2021	9543.374	251	3763–7575 Å
25.05.2022	9724.617	432	3300–7575 Å
26.05.2022	9725.615	433	3375–6950 Å
09.06.2022	9740.493	448	3365–7575 Å
20.07.2022	9780.513	488	3400–7575 Å
21.07.2022	9781.510	489	3511–7576 Å
21.07.2022	9782.467	490	3450–7575 Å
23.08.2022	9815.404	523	3350–7575 Å
24.08.2022	9816.434	524	3400–7575 Å
18.10.2022	9871.311	579	3244–7575 Å
19.10.2022	9872.255	580	3350–7575 Å
18.08.2023	10175.350	883	3692–7575 Å

в среднем около 0.1 зв. величины. На рис. 1 отмечены даты, когда проводились спектральные наблюдения.

3. КРИВАЯ БЛЕСКА

На протяжении фазы оптически толстой оболочки этот объект испытал около десятка хаотичных вспышек, увеличивающих блеск на 2–3 зв. величины. Кривая блеска, полученная по данным AAVSO, представлена на рис. 1. Несмотря на то, что довольно сложно оценить точно скорость падения блеска, очевидно, что эта новая является медленной. Однако в работе Валиса и Мунари (2023), был вычислен параметр $t_3 = 90$ сут как наиболее вероятный, поскольку эта величина хорошо согласуется со значением расстояния до новой, равным 1.69 ± 0.07 пк по данным Gaia.

Подробная фотометрическая эволюция новой V1405 Cas описана в работе Валиса и Мунари (2023). Эти авторы сравнили поведение кривой блеска этой новой с поведением других медленных новых V723 Cas и HR Del, обратив внимание на поразительное сходство кривых. Плавное падение блеска после поярчаний для всех трех новых подчинялось одной и той же зависимости и было пропорционально

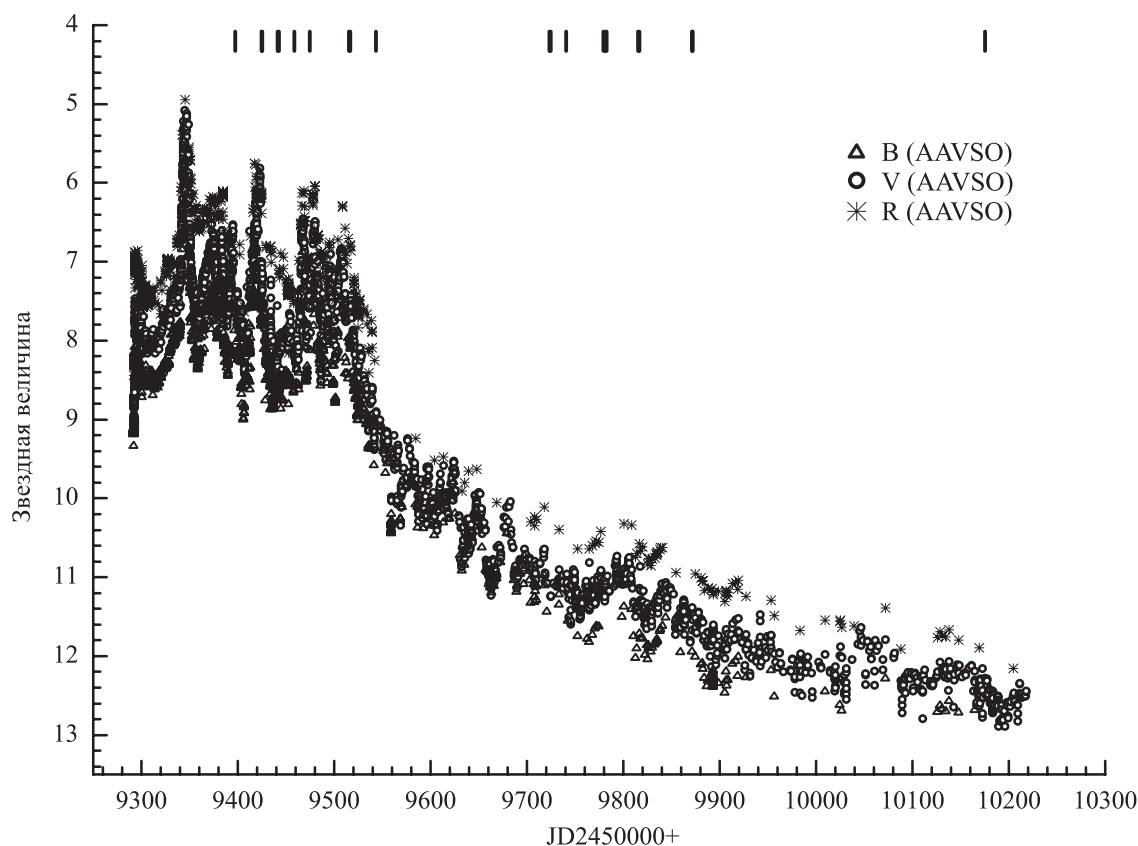


Рис. 1. Кривая блеска новой V1405 Cas, построенная по данным AAVSO. На кривой блеска отмечены моменты, когда были получены спектры.

$(t - t_0)^\alpha$, где параметр α также почти совпадал и был равен $\alpha = -2.33, 2.34$ и 2.29 для новых V1405 Cas, V723 Cas и HR Del соответственно.

4. СПЕКТРАЛЬНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ НОВОЙ V1405 CAS

Все спектральные наблюдения, которые были получены нами, представлены на рис. 2. На этом рисунке кроме даты справа приведено количество суток от даты обнаружения новой (18.03.2021). Спектры для наглядности смещены относительно первого на постоянную величину. На рис. 2 видно, что спектр кардинально изменился на 432 сут. Если в предыдущие даты в спектре присутствовали линии низких потенциалов ионизации: H I, He I, Fe II, N II и [O I], то в спектрах, полученных позже, исчезли линии Fe II и появились запрещенные линии высоких потенциалов ионизации: [Ne V], [Ne IV], [Fe VI], [Fe VII], [Ca V], [Ar V], а также линии He II. У этой звезды отсутствовала фаза небулярных и авроральных линий. Эволюция спектра этой новой подобна эволюции другой гибридной новой V458 Vul (Тарасова, 2015).

В спектрах, полученных с 105 по 224 сут, выделяются P Cug профили линий водорода Бальмеровской серии (рис. 2). Лучевые скорости абсорбционных компонент для линий H α и H β представлены в табл. 2.

Из таблицы видно, что значения скоростей достигали $RV = -1800$ км/с по линии H α и $RV = -1600$ км/с по линии H β . Одновременно на кривой блеска наблюдались хаотические появления.

Таблица 2. Лучевые скорости абсорбционных компонент профилей линий H α и H β в км/с

Дата	JD (2450000+)	H α	H β
01.07.2021	9397.475	-1173	-1179
14.07.2021	9410.457	-1259	-1183
28.07.2021	9424.384	-1141	-1095
29.07.2021	9425.371	-1211	-1235
14.08.2021	9441.433	-997	-1076
15.08.2021	9442.427	-1017	-1013
31.08.2021	9458.369	-1272	-1250
16.09.2021	9474.342	-1340	-1323
27.10.2021	9515.446	-1742	-1615
28.10.2021	9516.421	-1804	-1376
24.11.2021	9543.374	-1503	-1533

Эволюция профилей разрешенных линий, на примере линий H α и H β , представлена на рис. 3a,b, а эволюция линий высоких потенциалов ионизации — на примере запрещенной линии [Fe VII] 6087 и линии He II представлена на рис. 4a,b. Из рисунков следу-

ет, что профили линий меняли форму на протяжении всего периода наблюдений. Кроме того, профили линий не только меняли форму, но и в одну из дат, 09.06.2022 г., наблюдалось эпизодическое резкое уменьшение интенсивности всех линий (рис. 3а,б и 4а,б). Подобное изменение в интенсивности и форме профилей линий наблюдалось у другой гибридной новой V458 Vul (Тарасова, 2015).

Максимальную скорость расширения оболочки мы оценили, рассчитав полуширину профилей линий на уровне континуума для линии H α и [Fe VII] 6087. Эти данные представлены в табл. 3.

Таблица 3. Скорость расширения оболочки в км/с

Дата	JD (2450000+)	H α	[Fe VII] 6087
25.05.2022	9724.6170	3304	1915
26.05.2022	9725.6150	3279	2055
09.06.2022	9740.4930	3252	1591
20.07.2022	9780.5130	3453	1943
21.07.2022	9781.5103	3378	2061
21.07.2022	9782.4670	3230	1901
23.08.2022	9815.4040	3253	1958
24.08.2022	9816.4340	3055	1873
18.10.2022	9871.3110	3186	1548
19.10.2022	9872.2551	3181	1577
18.08.2023	10175.3500	1978	1352

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБОЛОЧКИ НОВОЙ V1405 CAS И ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для получения некоторых физических характеристик, мы рассчитали абсолютные потоки в наиболее сильных линиях, взяв величину покраснения $E(B-V)$, равную 0.53, из работы Мунари и Валиса (2022). Потоки в избранных спектральных линиях, вычисленные с учетом покраснения, представлены в табл. 4.

Блеск новой не падал плавно, наблюдались хаотические его изменения, поэтому, чтобы быть окончательно уверенным, что оболочка стала прозрачной для излучения от белого карлика, мы рассчитали отношение линий H α и H β . Для оценки электронной плотности и температуры, а также содержания химических элементов мы использовали потоки, полученные на 579 сут, так как Бальмеровский декремент только в эту дату был равным 2.8. Таким образом, только в эту дату можно было считать, что оболочка оптически тонкая в линиях и число ультрафиолетовых квантов в излучении центральной звезды за лаймановским пределом равно числу бальмеровских квантов, испущенных из туманности. На такое состояние оболочки указывают

и профили как разрешенных, так и запрещенных линий, форма которых была наиболее похожа. Поэтому мы приводим в работе оценки электронной концентрации и температуры, содержание гелия, железа, неона, аргона и иона кальция CaV 5309 только в эту дату.

Из-за отсутствия необходимых спектральных линий мы определяли электронную температуру и плотность по отношению абсолютных потоков в линиях [Fe VII] 3759 и [Fe VII] 6087, сравнив его с теоретическим, полученным в работе Нуссбаумер и Стори (1982). Однако по отношению потоков в указанных линиях нельзя определить оба параметра одновременно. Диаграмма дает две пары значений электронной концентрации и температуры. Это $N_e = 2 \times 10^6$, $T_e = 2 \times 10^4$ К и $N_e = 3.2 \times 10^7$, $T_e = 1.5 \times 10^4$ К. Для расчетов была взята электронная концентрация $N_e = 10^7$ из следующих соображений. Поскольку в спектре отсутствует линия [OIII] 5007, то электронная концентрация должна быть выше, чем критическая для этой линии (около $N_e = 10^6$). В то же время электронная концентрация должна быть меньше критической для линии [NeV] 3426 (около $N_e = 3 \times 10^7$), поскольку эта линия сильная. Поэтому электронная концентрация находится между этими величинами, а электронная температура в этом случае находится в интервале от 15 000 К до 20 000 К. Для расчетов содержания ионов химических элементов были выбраны электронная температура $T_e = 2 \times 10^4$ К и концентрация $N_e = 10^7$. Использование этих параметров упрощает расчеты, не внося дополнительных погрешностей при расчете содержания ионов железа по линиям [FeIV] 5176 и [FeVII] 6087, связанных с интерполяцией объемных коэффициентов излучения (Нуссбаумер и Стори, 1978, 1982). Следует подчеркнуть, что о разумности выбранных электронной температуры и плотности может свидетельствовать содержания железа, которое мало отличается от солнечного (2.8×10^{-5}).

Для оценки содержания гелия мы воспользовались линиями HeI 5876 и HeII 4686. Соотношение для определения ионного содержания гелия было взято из работы Аллер (1984). Был учтен вклад ударного возбуждения метастабильного уровня $2S^2\ ^3S$ HeI (Кллег, 1987), когда вычислялось ионное содержание гелия по линии HeI 5876. Линия HeII 4686 блендирована линией [NeIV] 4721 с красной стороны профиля. Для того чтобы разделить линии в бленде, мы использовали простую процедуру. Линию гелия мы разделили по центру на две половины. Полный поток мы вычислили как удвоенный поток от неблендированной левой половины линии. Поток в линии [NeIV] 4721 мы вычислили как разность потоков между блендой и удвоенным потоком от половины линии гелия.

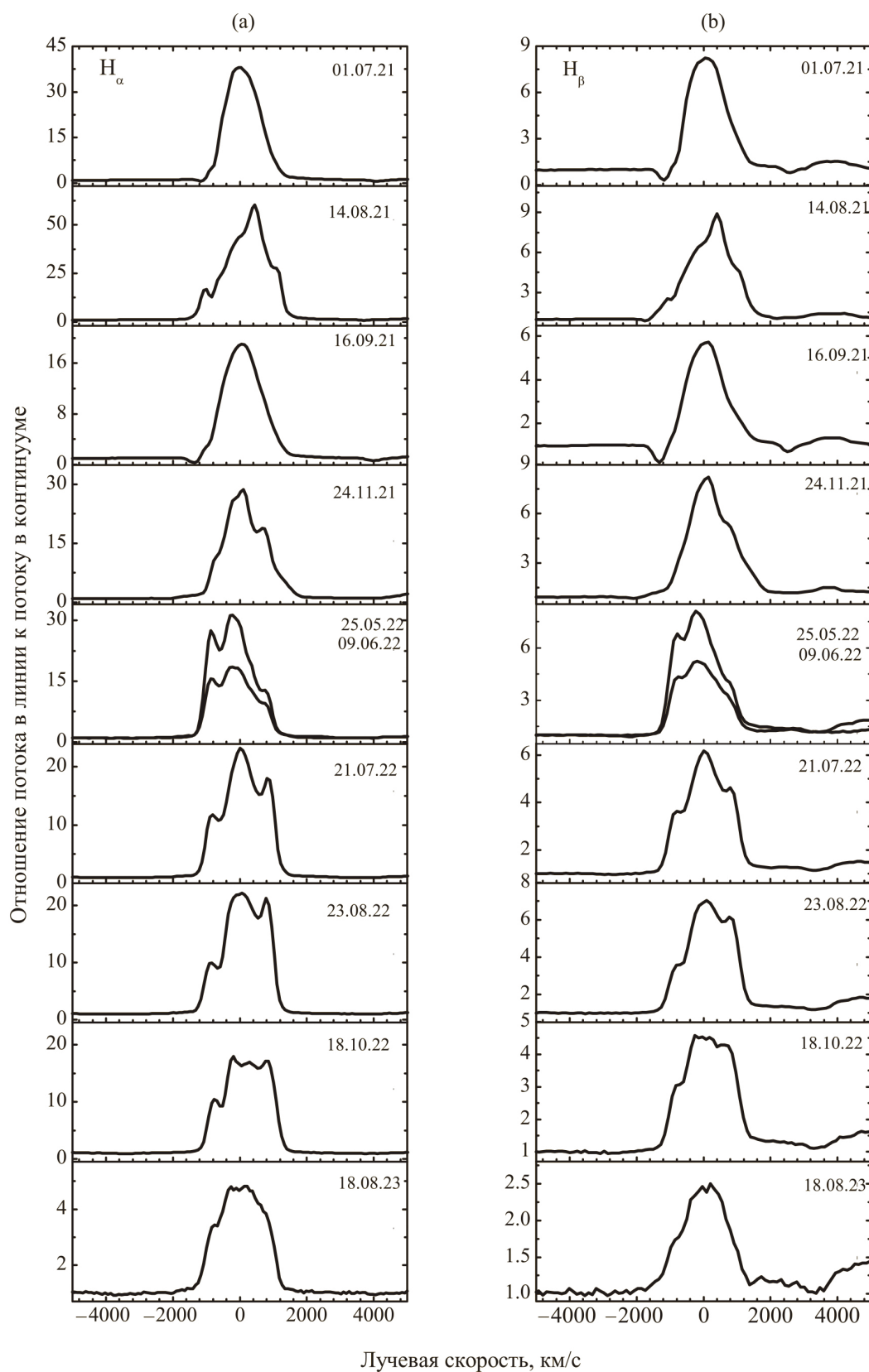


Рис. 3. (a) — Эволюция профилей спектральной линии H α новой V1405 Cas, потоки в линиях нормированы на поток в континууме; (b) — Эволюция профилей спектральной линии H β новой V1405 Cas.

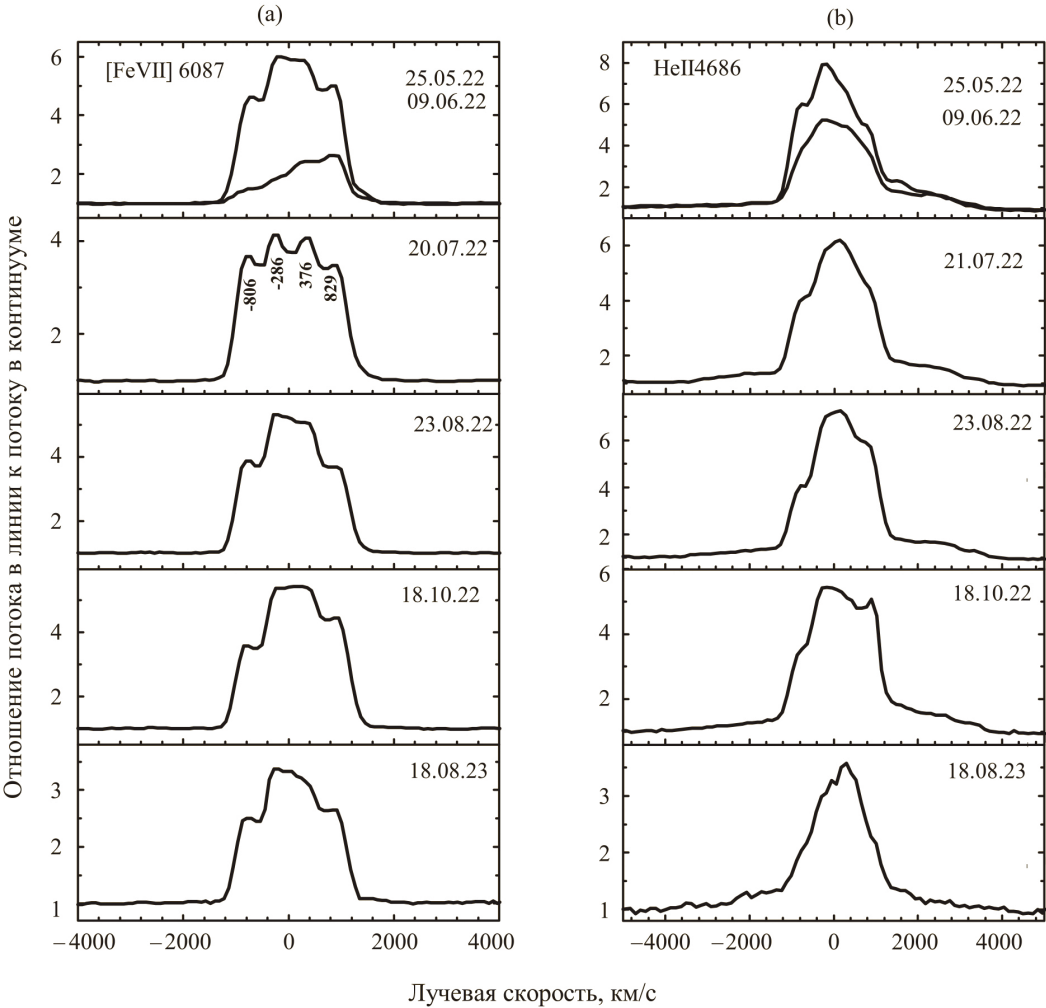


Рис. 4. (а) – Эволюция профилей спектральной линии [FeVII] 6087 новой V1405 Cas, профили представлены так же, как на рис.3. (б) – Эволюция профилей спектральной линии HeII 4686 новой V1405 Cas, профили представлены так же, как на рис. 3.

Таблица 4. Поток в некоторых эмиссионных спектральных линиях V1405 Cas с учетом покраснения $E(B - V) = 0.53$ (10^{-11} эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$)

Линия (Å)	432	433	448	488	489	490	523	524	579	580	883
[NeV] 3425.8	56.1	51.1		46.2			35.724	37.2	27.3	43.6	
[FeVII] 3759.9	13.1	13.8	4.4	8.5	7.6	7.4	9.2	8.2	5.9	5.8	1.5
[NeIII] 3868.5	9.5	9.48	10.3	10.9	9.5	8.7	8.9	8.4	3.8	3.7	0.9
HeII 4685.7	26.3	26.8	26.6	26.5	27.5	27.3	27.3	22.1	16.8	17.7	4.9
[NeIV] 4720	7.6	6.9	5.4	4.6	4.1	4.5	3.8	3.1	1.2	1.6	0.1
H β	22.7	21.9	16.0	20.1	19.6	18.9	19.7	17.3	10.5	11.2	2.2
[FeVII] 5158.0+											
[FeVI] 5177.0	8.3	7.8		7.9	5.9	6.4	5.3	6.5	4.0	5.1	0.8
[FeVI] 5279.1	8.0	7.9	6.5	1.0	6.9	0.9	6.4	0.9	5.2	5.0	0.3
[CaV] 5308.9	3.5	3.0	3.0	2.8	2.8	2.3	2.2	2.5	2.5	2.2	0.5
[FeVII] 5720.9	7.3	6.9	2.2	4.5	4.5	3.9	5.6	5.2	4.8	4.9	1.3
HeI 5875.6	1.8	1.6	1.8	1.7	1.7	1.6	1.4	1.5	0.6	0.6	
[FeVII] 6085.5	10.9	10.4	3.7	7.7	7.7	6.7	9.03	8.2	8.7	8.7	2.26
H α	46.8	44.0	37.2	34.8	36.9	34.8	36.4	35.9	29.6	28.8	3.7
[ArV] 7006.3	0.9		0.8	0.8	0.8	0.6	0.6	0.7	0.8	0.6	

Ниже приведены соотношения Аллер (1984), с помощью которых оценивалось содержание ионов гелия по линиям HeI 5876 и HeII 4686:

$$\lg \frac{N(\text{HeI})}{N(\text{HI})} = -0.133 + 0.235 \times \lg(t_e) + \lg \frac{I(5876)}{I(\text{H}\beta)}; \quad (1)$$

$$\lg \frac{N(\text{HeII})}{N(\text{HI})} = -1.077 + 0.135 \times \lg(t_e) + \frac{0.135}{t_e} + \lg \frac{I(4686)}{I(\text{H}\beta)}, \quad (2)$$

где $t_e = T_e/10^4$ K, $I(5876)$, $I(4686)$ — наблюдаемый поток в линиях HeI 5876 и HeII 4686. Полное содержание гелия было получено суммированием содержания иона HeI и HeII в предположении, что весь гелий в оболочке новой ионизирован.

Содержание ионов химических элементов относительно водорода для запрещенных линий определяется из соотношения

$$\frac{N(XI)}{N(\text{HI})} = \frac{I(\lambda)}{I(\text{H}\beta)} \frac{j(\text{H}\beta)}{j(\lambda)}, \quad (3)$$

где $I(\lambda)$, $I(\text{H}\beta)$ — потоки в спектральных линиях в наблюдаемом спектре, $j(\text{H}\beta)$, $j(\lambda)$ — объемные коэффициенты излучения для линии H β и запрещенной линии с длиной волны λ . Программа NEBULAR.IONIC (Шо и Дюфор, 1995) рассчитывает объемный коэффициент излучения для запрещенных линий и линии H β для заданной температуры и плотности, а затем вычисляет содержание ионов химических элементов относительно водорода, используя наблюдаемый поток в запрещенной линии, нормированный на поток в линии H β . Используя эту программу, мы определили содержание неона, аргона. Содержание неона определялось по линиям [NeIV] 4721 и [NeV] 3426. Отсутствие в спектре линии кислорода [OIII] указывает на то, что и линии неона [NeIII] либо очень слабы, либо этот ион полностью отсутствует в спектре, так как потенциалы ионизации соответствующих ионов близки. Поэтому оценку содержания неона мы получили как сумму содержания ионов NeIV и NeV. Содержания ионов неона, а также их сумма, равная 1.44×10^{-4} , приведены в табл. 5.

Содержание иона ArV было вычислено по линии [ArV] 7006.

Для оценки содержания ионов железа мы использовали линии [FeIV] 5176 и [FeVII] 6087. Для этих линий соотношения для объемных коэффициентов излучения были взяты из работ Нуссбаумер и Стори (1978, 1982). Подобно тому, как это было сделано в работах (Андреа и др., 1994; Сайзар и др., 1992), для получения полного содержания железа и аргона использовался ионизационный коорекционный фактор, равный

$$\text{ICF} = \frac{\text{HeI}(5876) + \text{HeII}(4686)}{\text{HeII}(4686)}. \quad (4)$$

Таблица 5. Полное содержание гелия, неона, аргона и железа, а также ионов кальция в оболочке новой V1405 Cas

Элемент	Линия, Å	Содержание относительно водорода (элемент./H)
HeI	5876	0.036
HeII	4686	0.17
He/H		0.21
NeIV	4720	0.92×10^{-4}
NeV	3426	0.51×10^{-4}
Ne/H		1.44×10^{-4}
ArV	7006	0.54×10^{-6}
Ar/H		0.66×10^{-6}
CaV	5309	0.42×10^{-6}
FeVI	5176	0.70×10^{-5}
FeVII	6087	1.94×10^{-5}
Fe/H		3.20×10^{-5}

Тогда

$$\frac{\text{Fe}}{\text{H}} = \frac{\text{FeVI}(5176) + \text{FeVII}(6087)}{\text{HI}(\text{H}\beta)} \times \text{ICF}, \quad (5)$$

$$\frac{\text{Ar}}{\text{H}} = \frac{\text{ArV}(7006)}{\text{HI}(\text{H}\beta)} \times \text{ICF}. \quad (6)$$

Кроме того, мы получили содержание иона кальция Ca³⁺ 5309. Для этого мы взяли соотношение из работы (Аллер, 1984):

$$\frac{N(\text{CaV})}{N(\text{HI})} = 2.6 \times 10^{-6} E_{4,2}^0 \sqrt{t} \times 10^{1.14/t} \frac{I(5309)}{I(\text{H}\beta)}, \quad (7)$$

где

$$E_{4,2}^0 = 1.24 \times t^{-0.87}. \quad (8)$$

Полученные содержания ионов и полное содержание химических элементов приведены в табл. 5.

Оценка массы оболочки

Массу водородной оболочки мы определили как $M = n_e m_H V$. Объем оболочки мы получили из сопоставления наблюдаемой и теоретической светимости новой: $4\pi D^2 F_{\text{H}\beta} = 4\pi \epsilon_{\text{H}\beta} V$. В результате имеем $M = 7.9 F_{\text{H}\beta} D^2 t_e^{0.85} n_e^{-1} M_\odot$, где $4\pi \epsilon_{\text{H}\beta} = 1.24 \times 10^{-25} t_e^{0.85} n_e n_{H+}$ — объемный коэффициент излучения в линии H β , $m_H = 1.64 \times 10^{-24}$ г — масса атома водорода, $F_{\text{H}\beta}$ — поток в линии H β , выраженный в единицах 10^{-11} ерг см⁻²с⁻¹, D — расстояние до новой, t_e — температура оболочки, нормированная на величину 10^4 , n_e — электронная концентрация, $M_\odot$ — масса Солнца. Значение расстояния $D = 1.69$ кпк мы взяли из работы Тагучи и др. (2021a). Масса водородной оболочки была рассчитана для данных, полученных на

579 сут. Она равна $\approx 4.3 \times 10^{-5} M_{\odot}$. Можно оценить полную массу оболочки, если принять, что только гелий вносит заметный вклад в содержание химических элементов в оболочке. В этом случае полная масса оболочки может быть вычислена как $M_{\text{tot}} = n_e m_H V (1 + 4 \times N(\text{He})/N(\text{H}))$, где $N(\text{He})/N(\text{H}) = 0.21$ — содержание гелия относительно водорода. Таким образом, $M_{\text{tot}} = 1.3 n_e m_H = 5.6 \times 10^{-5} M_{\odot}$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Спектрофотометрическая эволюция новой, исследованная в настоящей работе, показала, что она принадлежит по своим спектральным характеристикам к редкому типу гибридных новых. Это подтверждает вывод, сделанный о типе новой в работе Тагучи и др. (2023). Согласно классификации, предложенной Уильямс (2016), существуют три типа новых: Fe, HeN и гибридные. Для первого типа характерно наличие на фазе оптически толстой оболочки в спектре многочисленных эмиссионных линий FeII с PCyg профилями. Для HeN наличие эмиссионных линий HeI, HeII и бленды NIII 4640. У гибридных новых спектр перед появлением запрещенных линий превращается из FeII в HeN или наоборот. Тагучи и др. (2023) показали, что в первые 10 часов после обнаружения в спектре присутствовали линии HeI, HeII, бленда NIII 4640, позднее исчезли линии HeII и бленда NIII 4640, но остались линии HeI. Затем в спектре появились многочисленные линии ионизованного железа FeII, а перед фазой запрещенных линий в спектре вновь появились линии HeI, HeII и бленда NIII 4640. Поэтому эта новая классифицирована в этой работе как гибридная.

У этой новой, по нашим данным, отсутствовала фаза небулярных линий. На 432 сут в спектре появились запрещенные линии высоких потенциалов ионизации, а именно, [NeIV], [NeV], [FeIV], [FeVII], [CaV], [ArV]. Кроме того, наблюдались достаточно большие скорости расширения оболочки около 3300 км/с по линии H α . На кривой блеска наблюдались хаотические колебания, а профили бальмеровских линий в это время приобретали форму PCyg. Все это указывало на истечение вещества со скоростями, достигающими $RV = -1800$ км/с. Поэтому, по видимому, сброшенная оболочка новой стала полностью прозрачной для излучения от белого карлика только на 579 сут после вспышки.

В настоящей работе на основе спектрофотометрических наблюдений были оценены некоторые физические характеристики оболочки новой: электронная температура и концентрация, а также содержание гелия, неона, аргона, железа и иона кальция. Оценка электронной концентрации и температуры была получена по диаграмме, взятой из работы Нуссбаумер и

Стори (1982). Величина отношения потоков, по линиям железа не дает точной оценки. Было показано, что при электронной температуре 2×10^4 К и плотности 10^7 см $^{-3}$ содержание гелия превосходит солнечное в два раза, содержание аргона ниже солнечного, а содержание неона и железа близко к солнечному.

Полученные в нашей работе некоторые физические характеристики приведены без погрешностей. Поэтому важно обсудить, насколько значимым является это превышение. Очевидно, что используя только один спектр, мы можем оценить только верхний предел погрешностей. Погрешности в определении содержания химических элементов связаны как с погрешностями, получаемыми при работе с наблюдательным материалом, так и с некоторыми допущениями при расчете содержания. Например, для линий, которые имеют более низкие потенциалы ионизации (HeI, [FeVI], [NeIV]), чем линии [FeVII], температура и плотность газовой оболочки могут быть отличными от той, по которой мы их определяли. В частности, в содержание неона основной вклад при нашей температуре и плотности вносит линия [NeIV] 4721. Действительно, если предположить, что температура в оболочке составляет, как принято считать 11 000 градусов, то содержание будет значительно больше, увеличится более чем на порядок величины и по нашим данным составит 41.4×10^{-4} , т.е. в десятки раз будет превосходить солнечное. Однако отсутствие небулярных и ароральных линий указывает на то, что температура значительно выше. Поэтому более вероятным нам представляется содержание, которое вычислено для температуры 20 000 К.

Погрешности, связанные с наблюдениями, преимущественно определяются тем, насколько точно откалиброваны потоки. Погрешности, связанные с потерей потока, как правило, не превышают 10–20%. Эти погрешности мы сводим до минимума, наблюдая почти одновременно со звездой спектрофотометрический стандарт. Далее мы сравниваем зв. величины, вычисленные из спектрофотометрических данных с фотометрическими наблюдениями, доступными в литературе. Кроме того, погрешности при вычислении потоков в спектральных линиях зависят от того, насколько однозначно определяется уровень континуума не всегда он очевиден. Обычно такие погрешности для достаточно сильных линий, которые участвуют в определении содержания химических элементов, составляют до 20%. Кроме того, точность определения уровня континуума зависит от шумов, которые в нашем случае зависят от спектральной области. ПЗС-матрица наиболее чувствительна в красной области и теряет чувствительность до 50% в синей области. Таким образом, максимальные погрешности наблюдений могут достигать 50%. Точность определения потока в линии зависит от того блендирована ли-

ния или нет. Как правило, из-за больших скоростей расширения оболочки, значительная часть линий — это бленды. Но мы стараемся, по-возможности, использовать наиболее сильные линии, со слабыми сателлитами в бленде. Поэтому верхний предел погрешности в наших расчетах определяем как 50%. Таким образом, полученная оценка содержания неона представляется нам незначительно отличающейся от солнечной.

Сильные линии неона указывали на то, что эта новая является неоновой новой (Мунари и Валиса, 2022). Однако содержание в оболочке неона превышает солнечное (1×10^{-4}) менее, чем в полтора раза. Для новых с кислородно-неоновым белым карликом — это незначительное превышение, так как обычно содержание неона у таких звезд превышает солнечное, по крайней мере, в разы. Кроме того, мы взяли потоки в линиях [NeIV] 4721 и [NeV] 3426, полученные Мунари и Валиса (2022) на 618 сут после вспышки, и рассчитали по ним содержание неона. Оно было равно 1.77×10^{-4} , т.е. в пределах указанного верхнего предела наших погрешностей не отличается от наших оценок. К сожалению, авторы не приводят никаких значений погрешностей в определении потоков. Поэтому, опираясь только на наши оценки, мы не можем уверенно утверждать, что новая содержит кислородно-неоновый белый карлик.

К тому же оценки массы белого карлика, как показано ниже, указывают на то, что она несколько меньше, чем должна быть у кислородно-неонового белого карлика. По нашим оценкам, она равна приблизительно $0.9 M_{\odot}$, т.е. меньше предельной массы ONe белого карлика, равной $1.0\text{--}1.1 M_{\odot}$. Масса белого карлика была получена из соотношения, предложенного Ливьо (1992):

$$M_B^{\max} \sim M_V^{\max} = -8.3 - 10 \lg \frac{M_{wd}}{M_{\odot}}, \quad (9)$$

где

$$M_V^{\max} = m_V^{\max} - 5 \lg d + 5 - A_v, \quad (10)$$

$m_V^{\max} = 5.113$ (JD2459346.401) было взято из данных AAVSO.

Массу белого карлика, полученную из этого соотношения, конечно нельзя считать точной. Но следует отметить, что Тагучи и др. (2023) получили близкую массу белого карлика, равную $1.1 M_{\odot}$.

Валиса и Мунари (2023), исходя из того факта, что в спектре присутствуют сильные линии неона, потоки в которых сравнимы с линиями H α , пришли к выводу, что новая содержит кислородно-неоновый белый карлик. Более аргументированное утверждение было сделано Тагучи и др. (2023). Эти авторы также указали на то, что новая содержит маломассивный кислородно-неоновый белый карлик. Вывод о хими-

ческом составе белого карлика был сделан по содержанию алюминия. Авторы, используя эмиссионную линию H Π 6237, получили содержание алюминия, которое в 40 раз превосходило солнечное. Но в то же время Тагучи и др. (2023) отметили, что масса белого карлика, равная $1.1 M_{\odot}$, полученная ими из изучения поведения кривой блеска и относительно небольшой скорости расширения оболочки, мала для новых такого типа. Эти авторы также отметили, что повышенное содержание алюминия не дает возможности однозначно утверждать, что белый карлик — кислородно-неоновый, и необходимы дальнейшие исследования.

Содержание неона, вычисленное по данным, представленным в настоящей работе, не слишком отличается от солнечного и указывает на то, что белый карлик у этой новой может и не быть кислородно-неоновым. Поддерживает это предположение масса белого карлика, которая, по-видимому, не превышает предельную для такого типа карлика ($1\text{--}1.1 M_{\odot}$).

Следует отметить, что в работе не учтен вклад других ионов, в частности, в инфракрасной области не учитывались линии, принадлежащие NeII. Поэтому для окончательных выводов нужны дальнейшие исследования.

В настоящей работе также получена оценка массы водородной оболочки, равная $4.3 \times 10^{-5} M_{\odot}$, и полная масса оболочки, равная $5.6 \times 10^{-5} M_{\odot}$. Оценка полной массы оболочки была получена с учетом только содержание гелия.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаю благодарность всем наблюдателям переменных звезд, которые внесли вклад в создание всемирной базы данных AAVSO за использование их наблюдений в нашей работе. Кроме того, выражаю благодарность анонимному рецензенту за важные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аллер (L.H. Aller), *Physics of Thermal Gaseous Nebulae*. (Dordrecht: D. Reidel Publ. Co, 1984).
2. Андреа и др. (J. Andrea, H. Drechsel, and S. Starrfield), *Astron. Astrophys.* **291**, 869 (1994).
3. Бурнашев (V.I. Burnashev), *Бюлл. Абастуманск. астрофиз. обсерв.* **59**, 83 (1995).
4. Валиса и Мунари (P. Valisa and U. Munari), arXiv:2302.04656v1 (2023).
5. Вудворд и др. (C.E. Woodward, R.M. Wagner, I. Ilyin, and S. Starrfield), *Astron. Telegram.* 16089 (2023).
6. Клегг (R.E.S. Clegg), *MNRAS* **229**, 31 (1987).
7. Ливьо (M. Livio), *Astrophys. J.* **393**, 516 (1992).
8. Маехара и др. (H. Maehara, K. Taguchi, Y. Tampo, N. Kojiguchi, and K. Isogai), *Astron. Telegram.* 14471 (2021).
9. Мунари и Валиса (U. Munari and P. Valisa), *Astron.. Telegram.* 15796 (2022).

10. Мунари и др. (U. Munari, P. Valisa, and S. Dallaporta), *Astron. Telegram*. 14476 (2021a).
11. Мунари и др. (U. Munari, P. Valisa, and S. Dallaporta), *Astron. Telegram*. 15614 (2021b).
12. Мунари и др. (U. Munari, P. Valisa, S. Dallaporta, and A. Maitan), *Astron. Telegram*. 15093 (2021b).
13. Накамура (Y. Nakamura), *СВЕТ* 4945 (2021).
14. Нуссбаумер и Стори (H. Nussbaumer and P. Storey), *Astron. Astrophys.* **70**, 37 (1978).
15. Нуссбаумер и Стори (H. Nussbaumer and P. Storey), *Astron. Astrophys.* **113**, 21 (1982).
16. Пейдж и др. (K.L. Page, S. Starrfield, U. Munari, C.E. Woodward, and R.M. Wagner), *Astron. Telegram*. 15111 (2021).
17. Руди и др. (R. Rudy, J. Subasavage, A. Bayless, and R. Russell), *Astron. Telegram*. 14482 (2021).
18. Сайзар и др. (P. Saizar, S. Starrfield, G.J. Ferland, R.M. Wagner, J.W. Truran, S.J. Kenyon, W.M. Sparks, R.E. Williams, and L.L. Stryker), *Astrophys. J.* **398**, 651 (1992).
19. Соколовский и др. (K.V. Sokolovsky, E. Aydi, L. Chomiuk, A. Kawash, J. Strader, K. Mukai, K.-L. Li, A.-N. Babul, J.L. Sokoloski, J. Linford, N. Ikonnikova, K.E. Atapin, A.A. Belinski, A.V. Dodin, N.A. Maslennikova, K.A. Postnov, S.A. Potanin, B.S. Safonov, N.I. Shatsky, A.M. Tatarnikov, K.L. Page, and O.V. Maryeva), *Astron. Telegram*. 14530 (2021).
20. Соколовский и др. (K.V. Sokolovsky, E. Aydi, L. Chomiuk, A. Kawash, J. Strader, A.-N. Babul, J. Sokoloski, J. Linford, K. Mukai, and K.-L. Li), *Astron. Telegram*. 15540 (2022).
21. Тагучи и др. (K. Taguchi, H. Maehara, K. Isogai, N. Kojiguchi, T. Kato, and D. Nogami), *Astron. Telegram*. 14472 (2021a).
22. Тагучи и др. (K. Taguchi, K. Isogai, M. Shibata, Y. Tampo, N. Kojiguchi, and H. Maehara), *Astron. Telegram*. 14478 (2021b).
23. Тагучи и др. (K. Taguchi, K. Maeda, H. Maehara, A. Tajitsu, M. Yamanaka, A. Arai, K. Isogai, M. Shibata, Y. Tampo, N. Kojiguchi, D. Nogami, and T. Kato), *Astrophys. J.* **958**, 156 (2023).
24. Такеда и Диаз (L. Takeda and M. Diaz), *PASP* **131**, 054205 (2019).
25. Тарасова Т.Н. (T.N. Tarasova), *Астрон. журн.* **92**, 800 (2015).
26. Тарасова Т.Н., Скопал А. (T.N. Tarasova and A. Skopal), *Письма в Астрон. журн.* **42**, 13 (2016).
27. Уильямс (R.E. Williams), *Astrophys. J.* **104**, 725 (1992).
28. Шо и Дюфур (R.A. Shaw and R.J. Dufour), *PASP* **107**, 896 (1995).
29. Shore и др. (S.N. Shore, C. Buil, P. Dubovsky, P. Berardi, M. Bajer, C. Boussin, J. Guarro, F. Teyssier, E. Bertrand, J.M. Viannet, D. Boyd, F. Boubault, H. Allen, M. Le Lain, P. Le Du, P. Cazzato, J. Coffin, K. Shank, E. Bryssinck, O. Garde, K. Gurney, and R. Leadbeater), *Astron. Telegram*. 14577 (2021a).
30. Shore и др. (S.N. Shore, F. Teyssier, O. Garde, S. Charbonnel, M. Bajer, C. Boussin, and H. Allen), *Astron. Telegram*. 14622 (2021b).