

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ V1413 Aql В СПОКОЙНОМ И АКТИВНОМ СОСТОЯНИЯХ 2012–2017 гг.

© 2020 г. А. А. Татарникова^{1*}, А. М. Татарников¹, Т. Н. Тарасова²

¹Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Россия

²Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия

Поступила в редакцию 01.09.2019 г.

После доработки 05.11.2019 г.; принята к публикации 11.11.2019 г.

Представлены результаты спектральных наблюдений классической симбиотической звезды V1413 Aql, полученных в 2012–2017 гг. В этот период система находилась как в активном, так и в редком для нее спокойном состоянии. В 2012 г. в оптическом спектре доминировало излучение вспыхнувшего горячего компонента спектрального класса F4–7III. В 2017 г. система перешла в спокойное состояние, длившееся не менее трех месяцев. В этот период в спектре появились линии ионов с высокими потенциалами ионизации, такие как HeII 4686 Å, CIV 5802 Å. Температура и светимость горячего компонента в этот период составили $T_{\text{hot}} \approx 90\,000$ К, $L_{\text{hot}} \approx 1800L_{\odot}$. Показано, что по временным и энергетическим характеристикам спокойное состояние 2017 г. мало отличается от предыдущего спокойного состояния, наблюдавшегося в 1993 г.

Ключевые слова: V1413 Aql, симбиотические звезды, спектроскопия.

DOI: 10.31857/S0320010819120064

ВВЕДЕНИЕ

Переменная V1413 Aql (= AS338 = Hen 3 – 1737 = MН α 305–6) была отнесена к классу симбиотических звезд Алленом (1984) на основе спектра, полученного в 1978 г. В этом спектре наряду с яркими эмиссионными линиями (включая и линию HeII 4686 Å), присутствовали и сильные полосы поглощения молекулы TiO. Симбиотические звезды представляют собой двойные системы, состоящие из холодного и горячего компонентов, погруженных в газовую оболочку. Холодный компонент симбиотической звезды является обычно красным гигантом, а горячий компонент похож на центральную звезду молодой планетарной туманности.

Симбиотическая система V1413 Aql состоит из холодного компонента спектрального класса M5 III, протяженной околозвездной туманности и горячего компонента, спектр которого в зависимости от фазы активности меняется от K2 III (Есипов и др., 2013) до спектра молодого ядра планетарной туманности с температурой $\sim 10^5$ К (Есипов и др., 2000). V1413 Aql является затменной системой с периодом 434^d1 (Мунари, 1992). Основываясь на

этом Сивьеро и др. (2007) получили для затменного минимума 2005 г. оценку большой полуоси орбиты системы $a = 1.7$ а.е., а также размеры компонентов $R_{RG} = 123R_{\odot}$ и $R_{\text{hot}} = 81R_{\odot}$. Близкое отношение радиусов компонентов было получено и в работе Колотилова и др. (2012) для минимума 2011 г.

Параллакс V1413 Aql согласно данным каталога Gaia (Gaia Collaboration, 2018) равен 0.1403 ± 0.0383 mas. Он согласуется со сделанной Есиповым и др. (2000) оценкой расстояния в 6 кпк. При таком расстоянии до системы, при суммарной массе компонентов $\sim 2M_{\odot}$ и при разумном отношении масс звезд холодный компонент системы будет заполнять свою полость Роша. Возможным признаком этого является наличие на ИК кривых блеска вторичного минимума, связанного с эффектом эллипсоидальности (см. работу Татарниковой и др., 2018, — далее работа I).

Форма кривой блеска во время затмения зависит от фазы активности горячего компонента: в спокойном состоянии наблюдаются почти синусоидальные колебания блеска с широкими и плавными главными минимумами (Мунари, 1992), а в активном состоянии — резкие глубокие минимумы. Затменные минимумы в активном состоянии имеют разную глубину и форму (Мунари, 1992; Сивьеро и др., 2007). Затмения могут быть неполными.

* Электронный адрес: aat@sai.msu.ru

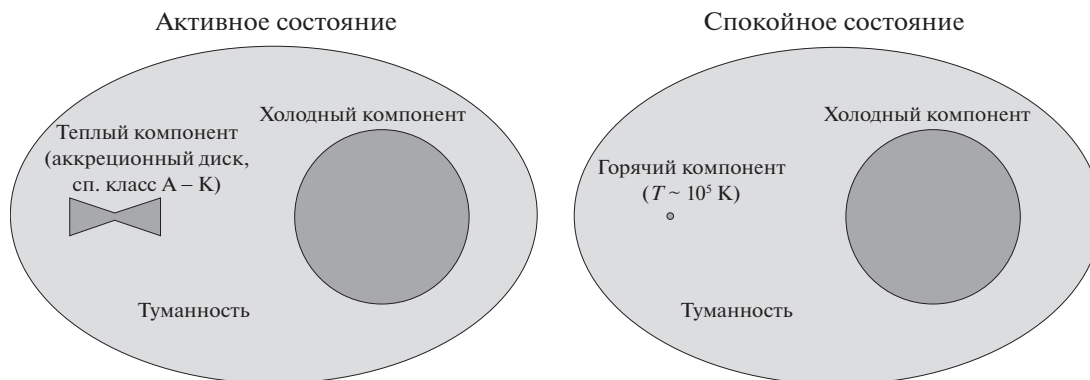


Рис. 1. Схематическое изображение системы V1413 Aql в спокойном и активном состояниях.

Например, в затмении 2011 г. (Есипов и др., 2013), несмотря на значительную глубину $\Delta V \approx 2^m$, в спектре во время минимума наблюдался слабый вклад излучения компонента спектрального класса G0.

Регулярные фотометрические наблюдения V1413 Aql проводятся с 1980-х годов (Шалте-Ладбек, 1985; Мунари, 1992; Сивьеро и др., 2007; работа I и ссылки там). За это время наблюдалось несколько вспышек, по своим характеристикам напоминающих вспышки классических симбиотических звезд. Последняя подобная вспышка наблюдалась в 2009 г. Однако, в отличие от классических симбиотических звезд, V1413 Aql проводит в активном состоянии большую часть времени. С 1983 г. подтвержденные наблюдениями спокойные состояния были зарегистрированы в 1993 и 2017 гг. Причем в обоих случаях их продолжительность не превышала нескольких месяцев (работа I).

Спектр системы в активном состоянии радикально отличается от спектра спокойного состояния. В спокойном состоянии, согласно Есипову и др. (2000), континуум в оптическом диапазоне формируется, главным образом, излучением оптически тонкой туманности и холодного компонента (излучение горячего компонента с $T_{\text{эфф}} \sim 10^5$ K заметно только в дальнем УФ-диапазоне). В активном состоянии (Есипов и др., 2013) на длинах волн 3500–6000 Å доминирует излучение источника со спектром, характерным для звезд спектральных классов A–F, а иногда даже и более поздних классов. Есипов и др. (2013) показали, что наблюдаемые особенности затмения горячего компонента лучше объясняются в рамках модели аккреционного диска. Традиционно в литературе такой источник излучения называют «вспыхнувшим горячим компонентом», мы же будем использовать термин «теплый компонент», чтобы подчеркнуть тот факт, что эффективная температура этого объекта невелика (рис. 1).

В работе I мы проанализировали фотометрические данные, полученные в 2012–2018 гг. во время активного и спокойного состояний системы. Целью настоящей работы является изучение спектральной эволюции V1413 Aql в 2012–2017 гг., а также определение физических характеристик компонентов системы. В это время система перешла из активного в редкое для нее спокойное состояние, наблюдавшееся последний раз в 1993 г.

НАБЛЮДЕНИЯ

Спектральные наблюдения проводились на 2.6-м зеркальном телескопе Шайна (ЗТШ) в КрАО с помощью щелевого спектрографа СПЭМ, установленного в фокусе Нэсмита. Приемником излучения служила ПЗС-камера SPES-10 размером 1340 × 100 элементов. Фиксированная ширина щели в 3" позволяет получать спектры с разрешением 8 Å. Дисперсия с решеткой 651 шт/мм составляла около 2 Å/пиксел. Первичная обработка спектров, включающая вычитание нуля пункта АЦП (bias), коррекцию неоднородности чувствительности поля матрицы, производилась программой SPERED, созданной С.Г. Сергеевым в Крымской астрофизической обсерватории. Последующая обработка спектров, привязка к шкале длин волн и калибровка потоков излучения в спектре были выполнены с помощью программы С.Г. Сергеева SPE. Для привязки к шкале длин волн использовался спектр неоновой лампы. Калибровка потоков излучения в спектре звезды была выполнена с помощью абсолютного распределения энергии спектрофотометрического стандарта HD176411, взятого из каталога Бурнашева (1985), точность калибровки не хуже 15% (кроме $\lambda < 3800$ Å, где точность снижается до 30%, а в затмении до 50%).

Поскольку набор эмиссионных линий, наблюдающийся у V1413 Aql в спокойном состоянии,

Таблица 1. Потоки в эмиссионных линиях (в единицах 10^{-14} эрг/см² с) в спектрах V1413 Aql (подробности см. в тексте)

λ , Å	29.04.12 $\varphi = 0.64$	25.07.12 $\varphi = 0.84$	13.08.12 $\varphi = 0.89$	24.09.12 $\varphi = 0.98$	20.10.12 $\varphi = 0.04$	5.11.12 $\varphi = 0.08$	08.08.13 $\varphi = 0.71$
3869 [NeIII]	N	N	N	3.0	N	N	N
3890 HI	15.2	9.9	8.7	2.8	8.2	12.4	7.5
3970 HI + [NeIII]	3.7	2.9	Y	3.1	3.9	Y	Y
4027 HeI? + FeII	3.0	2.5	3.0	0.8	2.2	Y	Y
4101 HI	27.6	15.6	11.1	4.5	13.2	24.1	20.3
4340 HI	53.8	45.8	30.0	10.0	29.1	41	42.4
4363 [OIII]	Y?	Y?	3.3	1.9?	Y?	Y?	?
4475 [FeII]	8.3	5.0	7.1	1.9	Y	Y	Y?
4640 CIII + NIII	19.4	20.9	33.6	8.4	14.8	16.5	22.0
4686 HeII	N	N	Y	N	N	N	N
4861 HI	86.3	100.2	94.6	42.6	54.8	98.3	113.2
4922 FeII + HeI	4.0	3.6	4.9	2.8	3.2	4.6	6.3
4959 [OIII]	N	N	N	Y	N	N	N
5007 [OIII] + [FeII]	13.1	11.0	10.9	11.6	9.9	13.9	15.6
5018 FeII + HeI	12.3	10.0	13.3	5.0	7.5	11.0	14.2
5876 HeI	38.0	29.6	32.9	12.8	18.5	34.3	22.6
6563 HI	733.2	632.4	933.0	445.8	508.5	667.6	764.5
6678 HeI	13.9	11.1	15.4	5.9	9.3	13.3	10.2
7065 HeI	14.2	-	16.7	10.4	11.3	17.5	19.7
<i>U</i> , mag	<13.57	<13.63	<13.63	<15.96	<14.54	<13.17	<12.81
<i>B</i> , mag	13.13	13.21	13.28	15.59	14.42	13.38	12.93
<i>V</i> , mag	12.23	12.33	12.32	14.53	13.60	12.55	12.13

достаточно сильно отличается от активного состояния, то потоки в эмиссионных линиях представлены в двух различных таблицах (табл. 1 и 2). Ошибки в их оценках для наиболее слабых линий не превышают 20% (кроме линий, образующих бленды с другими линиями, как, например, линия [OIII] $\lambda 5007$ Å, см. ниже) и связаны в основном со сложным ходом континуума вблизи линий. В тех случаях, когда линия видна, но проблематично измерить ее поток, в табл. 1 и 2 поставлен значок “Y”, если ее не видно — “N”, если нельзя с уверенностью написать ни то, ни другое — “?”. Отметим

тот факт, что согласно Есипову и др. (2000) для активного состояния V1413 Aql справедливо считать, что система заведомо (и с запасом) находится вне затмения красным гигантом горячего компонента если фаза наблюдений лежит вне диапазона $\varphi = \pm 0.1$. Таким образом, наши наблюдения были получены, как во время двух затменных минимумов 2012 и 2017 гг., так и вне затмений.

При дальнейшем моделировании все спектры исправлялись за межзвездное покраснение с величиной избытка цвета $E(B-V) = 0.5$ mag в соответствии с нормальным законом межзвездного

Таблица 2. Потоки в эмиссионных линиях (в единицах 10^{-14} эрг/см² с) в спектрах V1413 Aq1 (подробности см. в тексте)

λ , Å	29.05.17 $\varphi = 0.92$	16.06.17 $\varphi = 0.96$	30.06.17 $\varphi = 0.99$	2.07.17 $\varphi = 0.99$	30.07.17 $\varphi = 0.06$	16.08.17 $\varphi = 0.10$	26.08.17 $\varphi = 0.12$
3735 HI	2.6	2.8	2.0	2.2	Y	Y	Y
3750 HI + OIII	6.6	7.7	5.7	5.8	Y	Y	Y
3771 HI	3.5	4.2	3.3	3.0	Y	Y	Y
3798 HI	6.9	6.1	4.2	4.2	Y	8.1	Y
3820 HI	5.0	2.8	1.9	2.0	Y	Y	7
3835 HI	10.0	9.1	6.7	6.2	11.1	13.0	15.3
3869 [NeIII]	30.3	35.4	27.8	24.8	29.4	37.1	42.4
3889 HI	17.2	18.6	14.6	12.3	14.9	18.1	21.3
3970 HI + [NeIII]	18.2	20.4	16.5	15.1	16.4	22.1	24.3
4026 HeI?	2.8	2.8	2.6	2.2	2.4	3.0	3.5
4072 [SII]	4.9	5.2	4.3	3.6	4.4	5.6	6.9
4101 HI	29.6	30.5	24.2	21.9	24.6	33.9	39.2
4340 HI	42.5	43.8	36.3	32.8	36.3	53.0	52.8
4363 [OIII]	37.8	40.5	34.9	31.8	35.4	52.3	50.8
4473 HeI + [FeII]	7.2	7.6	6.4	5.7	6.4	8.2	7.9
4640 CIII + NIII	12.2	13.6	12.4	8.0	10.4	13.4	13.4
4686 HeII	13.9	9.5	8.0	5.5	14.5	18.8	20.0
4713 HeI	2.9	2.6	2.6	1.7	2.4	?	?
4861 HI	104.6	101.5	93.8	66.1	106.2	135.3	141
4905 [FeII]	3.2	3.2	Y	?	2.8	3.7	3.4
4922 HeI	3.8	4.8	3.6	2.7	4.4	5.8	6.5
4959 [OIII]	25.4	27.6	24.5	19.0	26.5	35.4	34.2
5007 [OIII]	82.9	92.3	80.9	63.0	86.3	119	120.1
5018 FeII	5.5	6.1	Y	3.9	4.7	7.0	8.9
5045 HeI	4.7	5.2	4.7	4.0	5.4	6.7	6.5
5058 FeI-iii?	2.0	2.3	Y	1.6	2.2	2.6	2.7
5236 FeII	2.9	3.2	2.7	1.7	2.6	3.4	3.4
5755 [NII]	1.4	1.7	Y	?	?	?	?
5802 CIV	7.8	4.9	2.8	1.9	3.8	4.7	3.0
5876 HeI	48.2	58.9	44.2	40.1	47.6	56.0	47.9
6563 HI	1061	1120	847.4	768.5	942	873	807
6678 HeI	20.4	22.7	16.8	14.9	19.6	18.5	16.5
7065 HeI	61.2	75.8	56.8	50.0	56.7	55.8	37.9
<i>U</i> , mag	<14.75	<14.85	<15.08	<15.32	<14.88	<14.60	<14.32
<i>B</i> , mag	14.99	15.15	15.34	15.54	15.07	14.67	14.61
<i>V</i> , mag	14.47	14.50	14.79	14.94	14.43	14.10	14.11

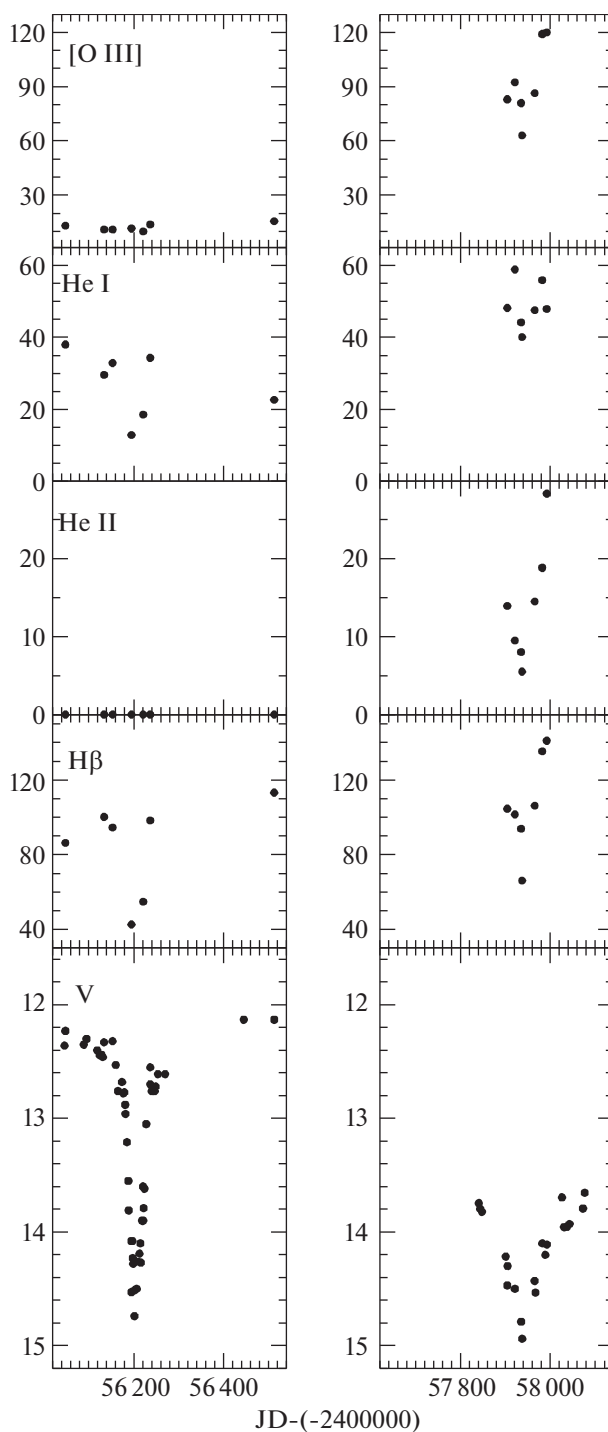


Рис. 2. Фрагменты кривой блеска V1413 Aql в фильтре V, а также потоки в линиях H β , HeII 4686, [OIII] 5007 (бленда с [FeII]), HeI 5876 в единицах 10^{-14} эрг/см 2 с для минимумов 2012 г. (левая панель) и 2017 г. (правая панель).

покраснения (Есипов и др., 2000). Модельные распределения энергии в спектрах звезд различных спектральных классов были взяты из спектральных библиотек Силва и Корнелл (1992) и Валдес и др. (2004). В некоторые даты при моделировании континуума мы использовали стандартную трехкомпонентную модель и модель аккреционного

диска. Обе эти модели были описаны в работе Татарниковой и др. (2009).

На рис. 2 представлена кривая блеска V1413 Aql в полосе V, взятая из работы Татарниковой и др. (2018), а также потоки в эмиссионных линиях H β , HeII 4686, [OIII] 5007 (бленда с [FeII]), HeI 5876 из табл. 1 и 2. Орбитальные фазы

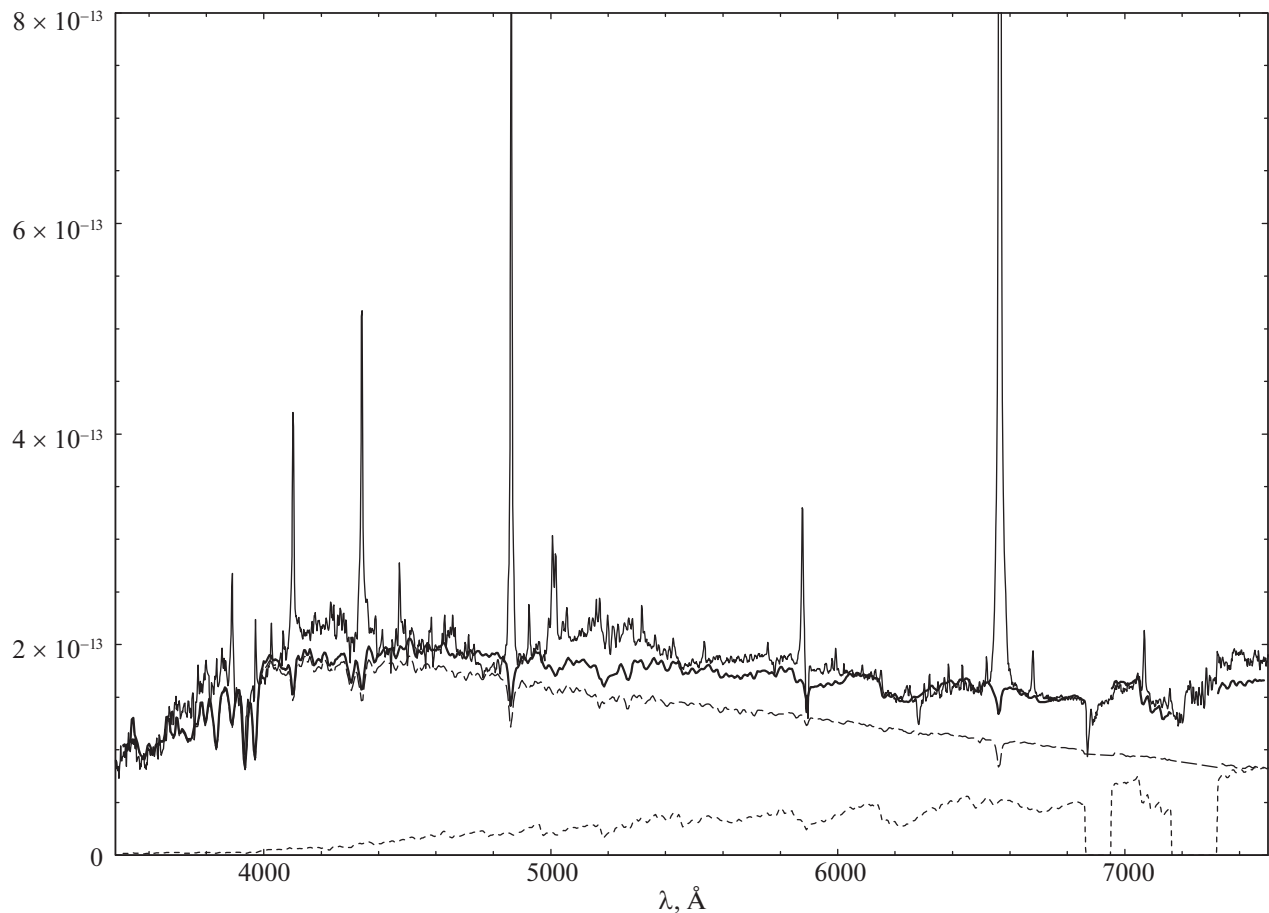


Рис. 3. Исправленный за межзвездное покраснение спектр V1413 Aql, полученный 29.04.2012 при $\varphi \approx 0.64$ (тонкая сплошная линия). Толстой линией показано модельное распределение энергии в континууме, состоящее из суммы излучений холодного компонента (M5III — пунктирная линия) и “теплого” компонента (F4-7III — штриховая линия).

были рассчитаны согласно эфемеридам из работы Мунари (1992):

$$\text{Min}(V) = 2447087 + 434^{\text{d}}1 \times E. \quad (1)$$

На рисунке видно, что форма затменных минимумов, наблюдавшихся в 2012 и 2017 гг., различна: минимум во время активного состояния 2012 г. — узкий и глубокий, а минимум спокойного состояния 2017 г. — широкий и имеет меньшую амплитуду. Как было показано в работе I, отличие формы минимумов связано с тем, что на различных этапах активности симбиотической звезды разные ее компоненты дают решающий вклад в излучение в фильтре *V*. В активном состоянии — относительно компактный “теплый компонент”, в спокойном состоянии — протяженная туманность.

ОБСУЖДЕНИЕ

Спектральная эволюция

Сравнивая спектры, полученные в 2012 и 2017 гг., можно отметить существенные различия

как в распределении энергии в континууме, так и в составе эмиссионных линий и потоках в них.

Активное состояние 2012–2013 гг. Рассмотрим подробнее спектры активного состояния. Континуум на спектрах, полученных в 2012–2013 гг., демонстрирует сильную зависимость от орбитальной фазы. Так, при фазах, далеких от полного затмения (это спектры, полученные при фазах $0.041 \leq \varphi \leq 0.885$) в визуальном диапазоне длин волн доминирует излучение активного горячего компонента (в нашей терминологии — “теплого компонента”), которое, как и в 2011 г. (Есипов и др., 2013), может быть аппроксимировано либо спектром стандартного гиганта, либо спектром аккреционного диска. Пример такого спектра приведен на рис. 3. Отметим, что, помимо абсорбций, характерных для холодного компонента, в спектре наблюдается Бальмеровский скачок в поглощении, а также некоторые абсорбционные линии: CaII(K), G-полоса, дублет NaI и др. линии, связанные с “теплым” компонентом. Молекулярные полосы холодного компонента (преимущественно TiO) в ви-

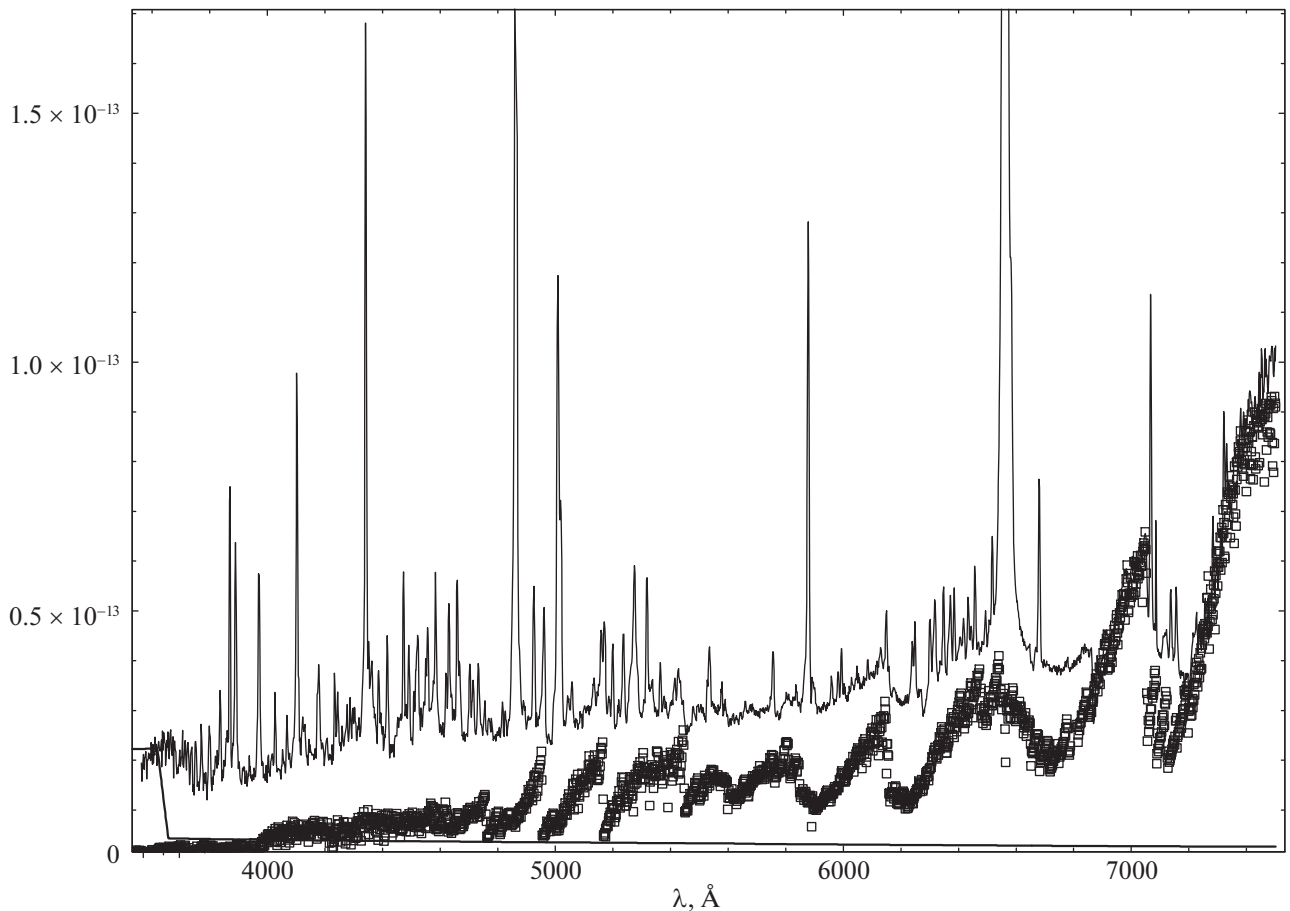


Рис. 4. Исправленный за межзвездное покраснение спектр V1413 Aql, полученный 24.09.2012 при $\varphi = 0.981$ (тонкая сплошная линия), модельное излучение в континууме оптически тонкой туманности с $T_e = 17\,000$ К (толстая линия) и модельное распределение энергии в спектре холодного компонента M5III (квадратики).

зуальном диапазоне замыты излучением “теплого” компонента и становятся заметны только ближе к $\lambda = 7000$ Å. Отметим, что распределение энергии в спектре “теплого” компонента во все даты между 29 апреля и 13 августа 2012 г. достаточно хорошо аппроксимируется распределением энергии в спектрах стандартных гигантов спектральных классов F5-F9III.

В спектре, полученном вблизи центра затмения (24.09.2012, $\varphi = 0.981$), излучение “теплого” компонента сильно ослаблено вследствие затмения его красным гигантом. Поэтому слабый Бальмеровский скачок наблюдается в эмиссии (он связан с излучением туманности), а молекулярные полосы красного гиганта стали заметны и в визуальном диапазоне (рис. 4). Но при этом нельзя утверждать, что излучение “теплого” компонента полностью отсутствует в спектре: континуум плохо моделируется суммой излучений только двух компонентов (туманности и холодного компонента). На рис. 4 видно, что модельный континуум хорошо согласуется с наблюдаемым только в области Бальмеровского скачка и в красной части спектра. Вероятно,

что дополнительный вклад в потоки в континууме вносит “теплый” компонент при неполном его затмении. И в качестве модели “теплого” компонента в этом случае более вероятной представляется модель с аккреционным диском, так как при этом его продольный размер будет больше, чем в модели со стандартным гигантом.

Поскольку в оптическом диапазоне на всех длинах волн наблюдается сумма потоков от активного горячего (“теплого”) компонента, холодного компонента и туманности (вклады всех этих компонентов могут быть переменными), то моделирование распределения энергии в континууме может приводить к неоднозначным выводам (Есипов и др., 2013). Поэтому наилучшее представление о распределении энергии в спектре затмеваемого (т.е. “теплого”) компонента дает нам разность двух спектров, полученных непосредственно до затмения и во время затмения. На рис. 5 показаны две подобные разности — полученные для минимумов 2010 и 2012 гг. (конкретные даты наблюдений приведены в подписи к рисунку). Оказалось, что форма распределения энергии в спектре затмевае-

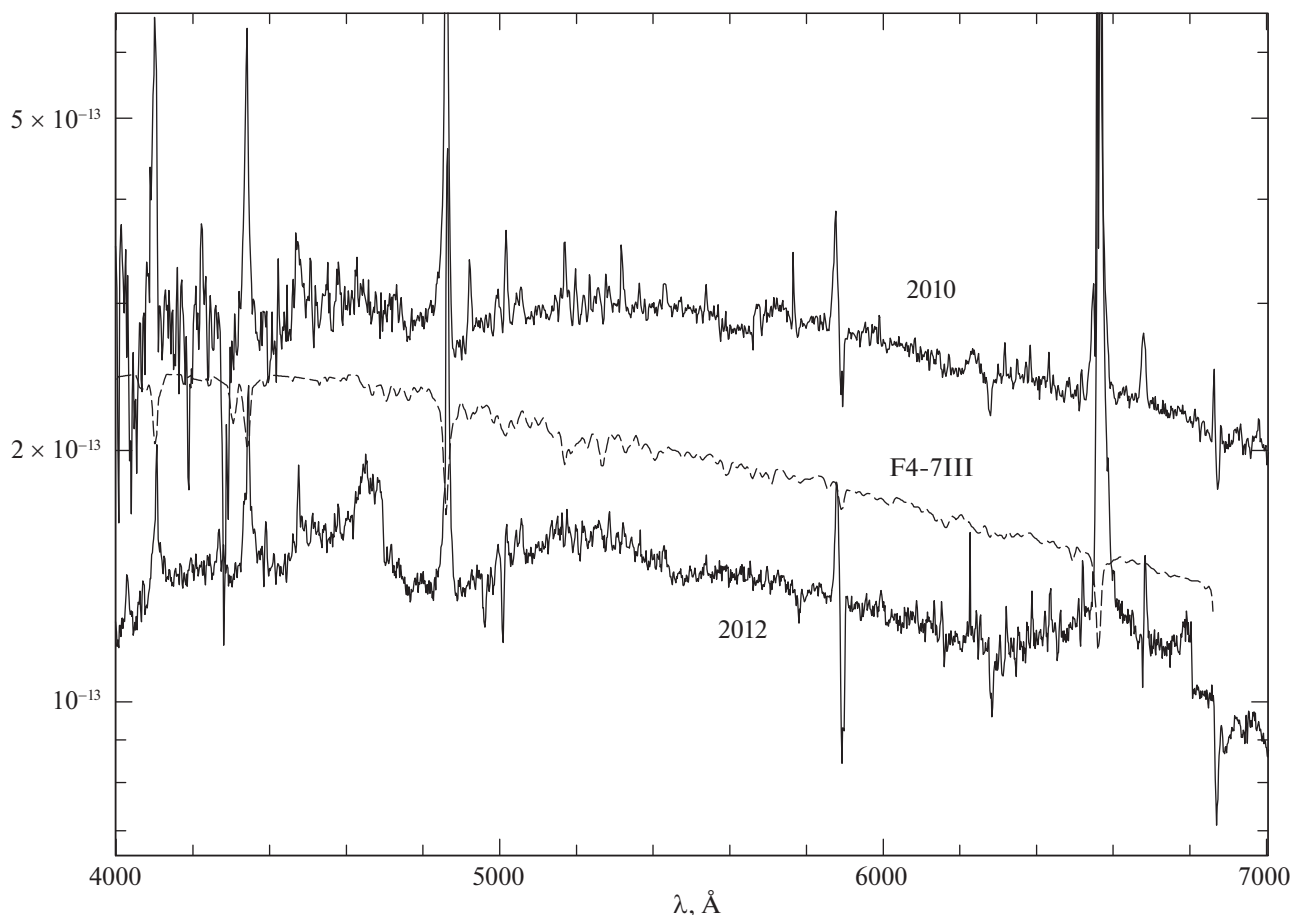


Рис. 5. Исправленные за межзвездное покраснение разности спектров V1413 Aql: нижняя кривая — разность спектров, полученных до затмения 13.08.2012 и во время затмения 24.09.2012; верхняя кривая — разность спектров, полученных после затмения 07.07.2010 и во время затмения 16.05.2010. Штриховой линией показан спектр звезды F4–7III.

мого компонента практически не поменялась за два года, при этом уровень континуума упал почти в 2 раза, что согласуется с постепенным затуханием вспышки 2009 г.

К сожалению, во время минимума 2012 г. наши спектральные наблюдения недостаточно плотно покрывают кривую затмения. Поэтому мы не можем сделать вывод о температурном профиле вспыхнувшего горячего компонента. Но из рис. 5 видно, что распределение энергии в спектре затмеваемой части горячего компонента плохо моделируется спектрами стандартных гигантов. Это является еще одним косвенным доказательством наличия в системе аккреционного диска.

Теперь рассмотрим, как менялся эмиссионный линейчатый спектр V1413 Aql во время минимума 2012 г. (см. табл. 1 и рис. 2). Так же, как и в 2010–2011 гг., в спектрах практически отсутствовала линия HeII 4686, что по спектральному критерию (Есипов и др., 2000) означает, что система находилась в активном состоянии. Слабая и широкая бленда CIII+NIII, 4640 наблюдалась во все даты

2012 г., хотя она и сильно ослабла во время минимума. Поскольку в спектрах отсутствует линия [OIII] 4959, можно с уверенностью утверждать, что основной вклад в эмиссию, наблюдавшуюся около 5006 Å, дает линия [FeII] 5006.7, а не [OIII] 5007. Яркие эмиссионные линии HII и HeI наблюдались во все даты, причем потоки в этих линиях демонстрируют явную фазовую зависимость (рис. 2). Таким образом, в активном состоянии V1413 Aql демонстрирует достаточно бедный эмиссионный линейчатый спектр, в котором отсутствуют линии ионов с высокими потенциалами ионизации. Такое поведение характерно для классических симбиотических звезд (КСЗ) в активном состоянии.

Спокойное состояние 2017 г. В работе I нами было показано, что согласно фотометрическому критерию ($B-V = 0.6^m \pm 0.08^m$) система перешла в спокойное состояние в мае 2017 г. Причем это состояние длилось не дольше пяти месяцев (но и не меньше трех). Рассмотрим спектральную эволюцию в этот период времени.

Наш первый спектр спокойного состояния был

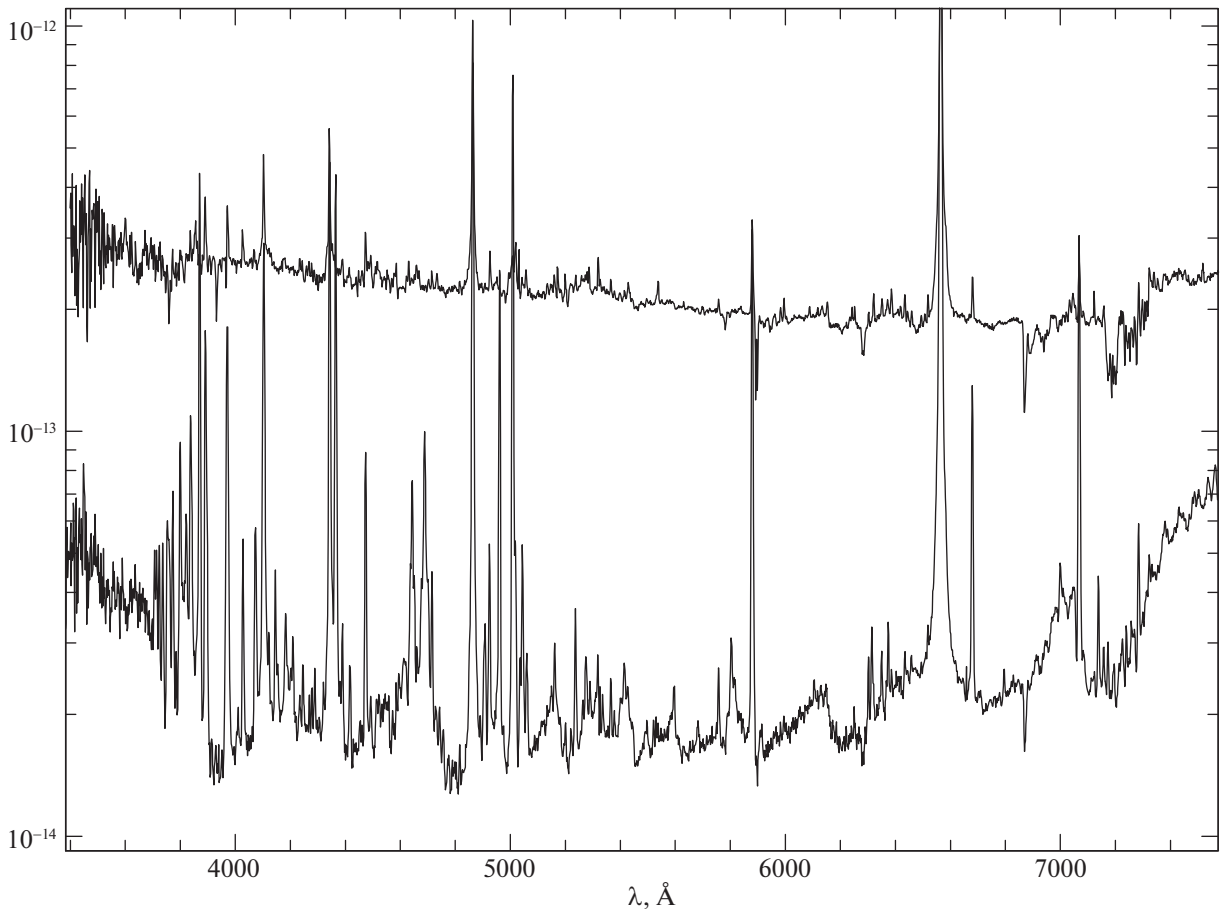


Рис. 6. Исправленные за межзвездное покраснение спектры V1413 Aql: нижняя кривая — спектр спокойного состояния, полученный 29.05.2017; верхняя кривая — спектр активного состояния, полученный 08.08.2013.

получен 29.05.2017 при орбитальной фазе $\varphi \approx 0.92$. Он радикально отличается от спектров активного состояния (см. рис. 6, на котором для сравнения приведен спектр активного состояния, полученный 08.08.2013). В спектре наблюдается Бальмеровский скачок в эмиссии, появились яркие запрещенные линии [OIII] и [NeIII], а также стала заметна линия HeII 4686 Å. Таким образом, и по спектральному критерию система V1413 Aql в конце мая 2017 г. находилась в спокойном состоянии. Отметим, что наличие в спектре линий ионизованного гелия свидетельствует о том, что в системе стал проявлять себя горячий компонент, причем его собственное излучение в оптическом диапазоне практически незаметно на фоне излучения туманности. За всю историю наблюдений V1413 Aql только один раз удалось зарегистрировать непрерывный спектр от горячего компонента. Это случилось 14 июня 1993 г., когда дата УФ-наблюдений (спутник IUE) случайно пришлась на начало предыдущего спокойного состояния (Есипов и др., 2000).

Все остальные спектры, полученные в 2017 г.,

также свидетельствовали о том, что система находилась в спокойном состоянии. Последний такой спектр был получен 26.08.2017. Таким образом, согласно спектральным данным, спокойное состояние продлилось как минимум три месяца. Отметим, что на кривой блеска в фильтре *B* в это время наблюдался плавный затменный минимум глубиной не более 1^m , в отличие от резких и глубоких (амплитуда около 2.5^m) минимумов активного состояния. Подробнее фотометрические характеристики минимума 2017 г. были разобраны в работе I.

Рассмотрим спектр, полученный 02.07.2017 (рис. 7) практически в центре затмения 2017 г. ($\varphi \approx 0.99$). В отличие от минимума 2012 г. (рис. 4) распределение энергии в непрерывном спектре в эту дату может быть достаточно хорошо представлено в виде суммы излучений красного гиганта спектрального класса M6III и оптически тонкой туманности с температурой $T_e = 17\,000$ К. Таким образом, никаких следов дополнительного “теплого” компонента в эту дату не наблюдалось.

Однако при выходе системы из затмения в распределении энергии снова стал виден “теплый”

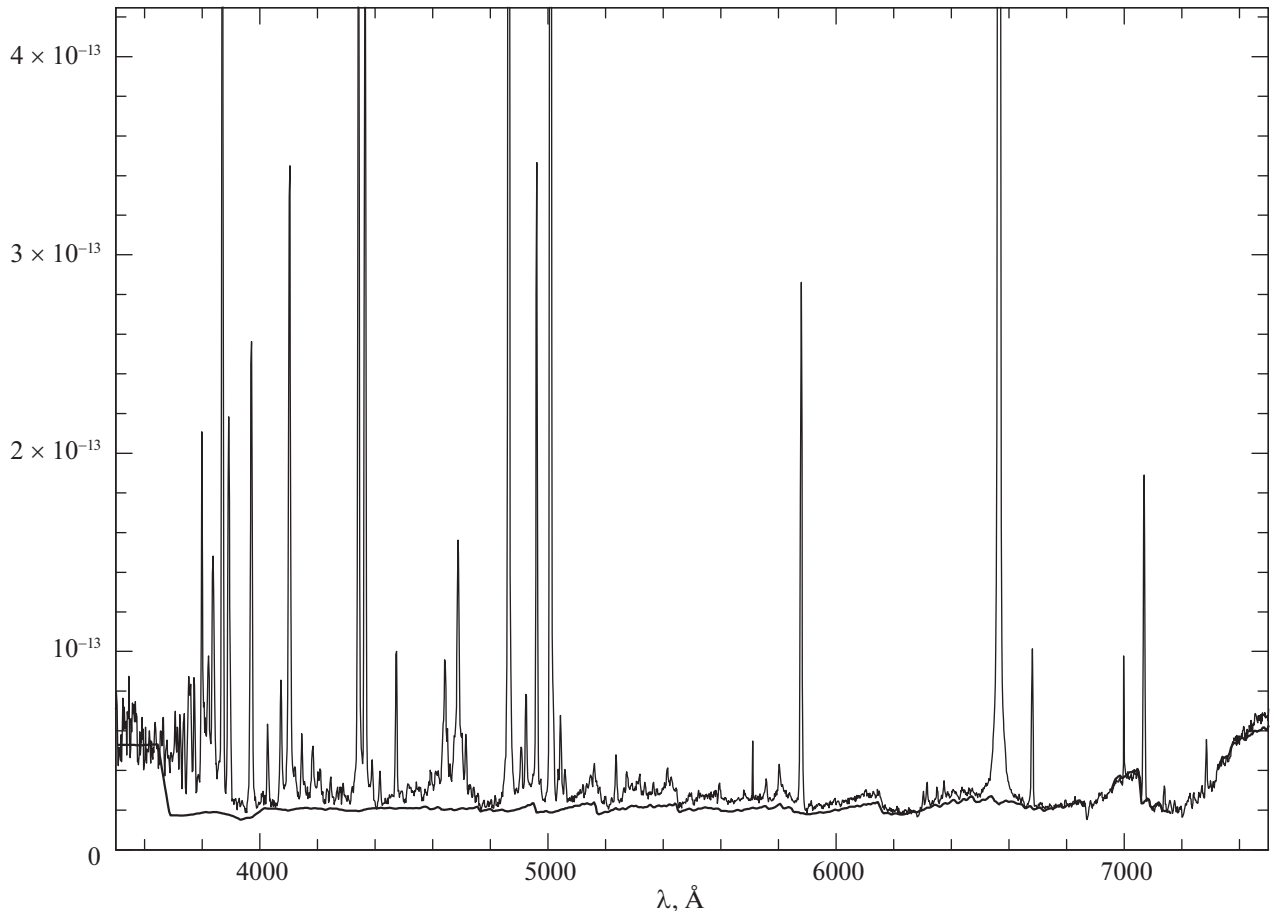


Рис. 7. Исправленный за межзвездное покраснение спектр V1413 Aql, полученный 02.07.2017 при $\varphi \approx 0.99$ (тонкая линия). Толстой линией показана модельная кривая распределения энергии в континууме, состоящая из суммы излучений звезды M6III и оптически тонкой туманности с температурой $T_e = 17\,000$ К.

компонент, пусть и сильно ослабленный (примерно в 20 раз) по сравнению с активным состоянием 2012 г. Самые быстрые изменения в спектре наблюдались между датами 30.07.2017 и 16.08.2017. Рассмотрим разность этих спектров (рис. 8). Она достаточно хорошо соответствует стандартному распределению энергии у звезд со спектральными классами F4–7III. Отметим, что красный гигант в системе V1413 Aql является переменной звездой (см., например, Татарникова и др., 2009). Однако за рассматриваемый интервал времени (17 дней) холодный компонент изменился мало. Тогда как, если мы возьмем разность спектров, полученных на выходе из минимума (26.08.2017) и вблизи центра затмения (02.07.2017), то на ней будут присутствовать остаточные молекулярные полосы, характерные для M-гигантов. Это свидетельствует о том, что холодный компонент заметно изменился между этими датами и этот факт необходимо учитывать при моделировании.

Как и у многих симбиотических звезд (Шмид,

Шилд, 1990), у V1413 Aql ни в одну из дат отношение потоков в линиях H α и H β не соответствует случаю В небулярной рекомбинации (~ 2.8 , см. Остерброк, 1989). С учетом межзвездного покраснения из табл. 1 и 2 можно получить диапазон изменения отношения потоков в этих линиях: от 3.4 до 7. Отклонения от случая В связаны как с эффектами самопоглощения в линиях, так и с влиянием ударных процессов на населенности уровней. Поэтому для оценки меры эмиссии туманности используется поток в континууме за Бальмеровским скачком, в случае, если этот поток формируется оптически тонкой туманностью. При расстоянии 7 кпк (Gaia Collaboration, 2018) для спектра, полученного 26.08.2017 на фазе $\varphi = 0.12$, мера эмиссии, оцененная по небулярному континууму $ME = 8.8 \times 10^{59} \text{ см}^{-3}$, а по потоку в линии H β — $ME = 3.5 \times 10^{59} \text{ см}^{-3}$.

Отметим, что в минимуме 2017 г. (02.07.2017, $\varphi = 0.99$) поток за Бальмеровским скачком был примерно таким же, как на выходе из затмения 26.08.2017. При этом он был как минимум в 2.5 ра-

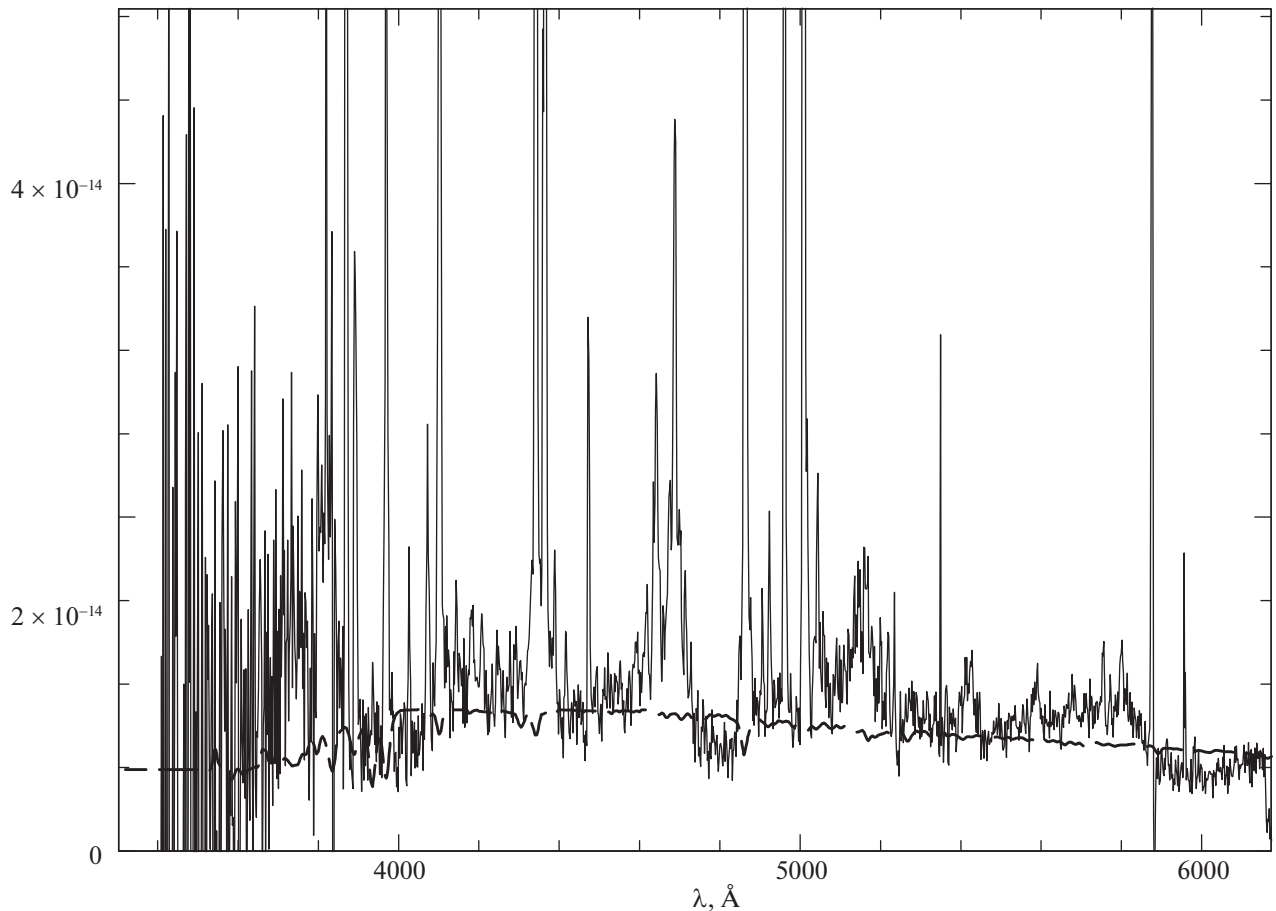


Рис. 8. Разность исправленных за межзвездное покраснение спектров V1413 Aql, полученных 30.07.2017 и 16.08.2017 (тонкая линия). Штриховой линией показано распределение энергии в спектре звезды F4–7III.

за выше, чем в минимуме 2012 г. на фазе $\varphi = 0.981$. Это свидетельствует о том, что в спокойном состоянии как минимум в 2.5 раза по сравнению с активным выросла мера эмиссии незатмеваемой части туманности. На остальных спектрах активного состояния оценить меру эмиссии туманности по потоку за Бальмеровским скачком не представляется возможным, так как в спектре в этом диапазоне доминирует “теплый” компонент.

Так как для оценки температуры горячего компонента мы используем модифицированный метод Занстра (Татарникова и др., 2000), в основе которого лежит отношение потока в линии HeII, 4686 Å к потоку в континууме на 3600 Å, нам важно, чтобы горячий компонент и туманность не испытывали затмения со стороны красного гиганта. В активном состоянии при орбитальных фазах $\varphi \geq 0.1$ мы гарантированно избегаем эффектов, связанных с затмением. Однако в спокойном состоянии ситуация может быть другой — туманность имеет большие размеры и часть ее может затмеваться холодным компонентом. В этом случае наша оценка температуры горячего компонен-

та $T_{\text{hot}} \approx 90\,000$ К, полученная для спектра от 26.08.2017 г. при $\varphi = 0.12$, является лишь верхней оценкой. Это связано с тем, что, применяя метода Занстра, мы основываемся на предположении о полном поглощении Lc-квантов в туманности. Тогда как и неполное поглощение Lc-квантов, и частичное затмение туманности холодным компонентом при фазах, близких к минимуму, будут давать одинаковый эффект. В результате чего модифицированная эквивалентная ширина линии HeII $F(\text{HeII}, 4686)/F_{\text{cont}}(3600)$ будет увеличиваться, а значит, и получаемая из нее оценка температуры будет расти.

Отдельно подчеркнем два момента, влияющих на точность определения температуры горячего компонента по модифицированному методу Занстра. Во-первых, при фазе $\varphi \approx 0.12$ (26.08.2017) горячий компонент несомненно вышел из затмения и, скорее всего, полностью перестала затмеваться расположенная рядом с горячим компонентом область дважды ионизованного гелия, в которой формируется излучение в линии HeII, 4686 Å. Во-вторых, влияние излучения, как холодного, так

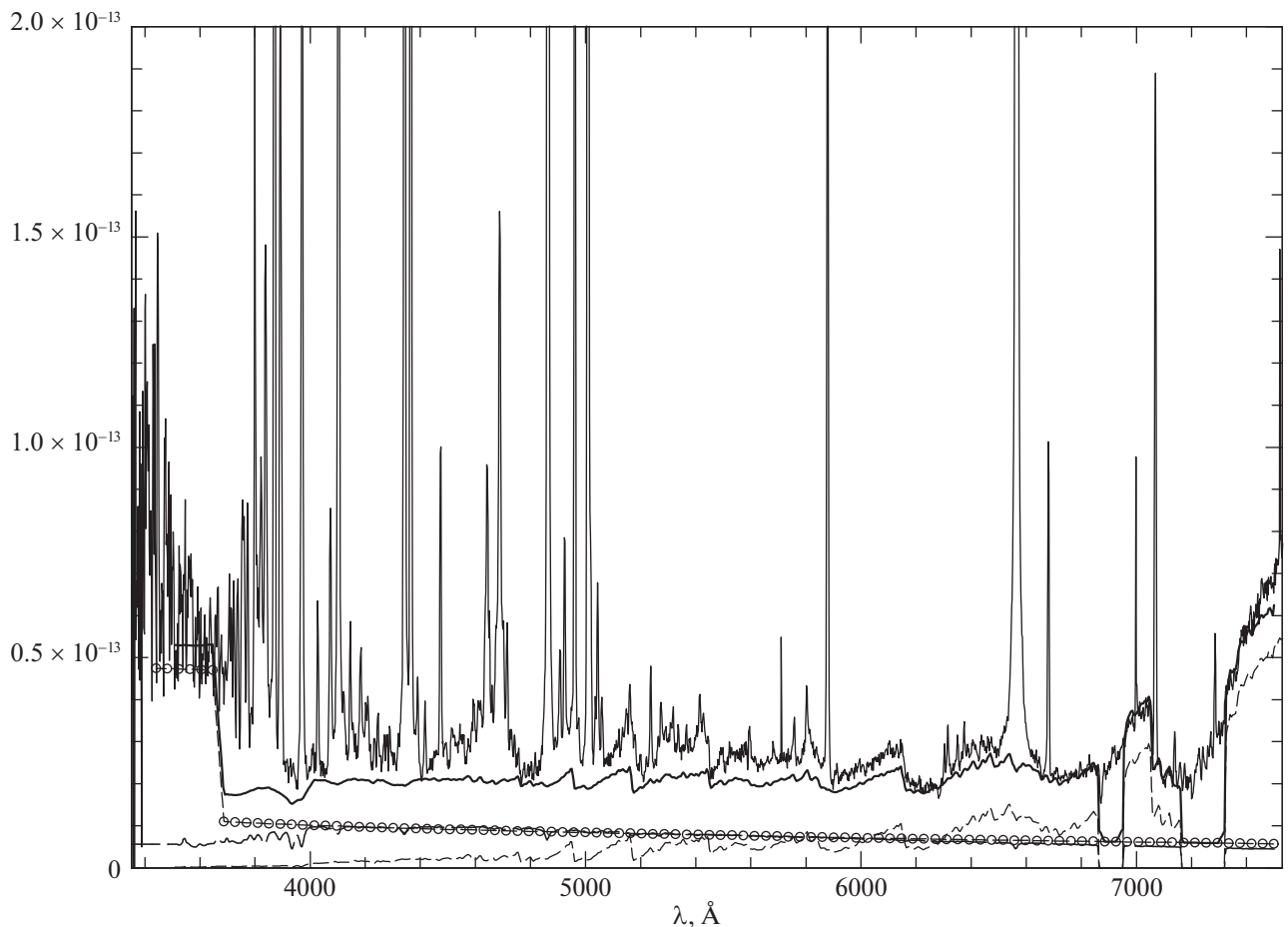


Рис. 9. Исправленный за межзвездное покраснение спектр V1413 Aql, полученный 26.08.2017 при $\varphi \approx 0.12$ (тонкая сплошная линия). Толстой линией показана модельная кривая распределения энергии в континууме, состоящая из суммы излучений отдельных компонентов: звезды M6III (тонкая штриховая линия), туманности с температурой $T_e = 17\,000\text{ K}$ + горячего компонента с $T_{\text{hot}} = 90\,000\text{ K}$ (кружки) и звезды F4–7III (толстая штриховая линия).

и “теплого” компонентов на суммарный поток в континууме на длине волны $\lambda = 3600\text{ \AA}$ ничтожно мало (см. разложение континуума на отдельные компоненты на рис. 9). Так же принимаемая величина электронной температуры туманности в диапазоне $T_e = 15\,000\text{--}20\,000\text{ K}$ мало влияет на оценку температуры горячего компонента (Есипов и др., 2000).

Сравнение со спокойным состоянием 1993 г.

Предыдущее спокойное состояние у системы V1413 Aql наблюдалось в 1993 г. Его длительность, согласно спектральным наблюдениям, составила не менее 102 сут (но не более 371 сут, если учитывать и спектральные, и фотометрические наблюдения). Подтвержденная спектральными наблюдениями длительность спокойного состояния в 2017 г. составляет 88 дней, а учитывая и фотометрические наблюдения, можно установить, что оно длилось не более пяти месяцев (см. статья I). Таким образом,

оба эти периода спокойного состояния схожи по длительности. Еще одна общая особенность заключается в том, что оба раза спокойное состояние наблюдалось вблизи затменного минимума. Но ни в 1993 г., ни в 2017 г. спокойное состояние не длилось целый орбитальный период. Поэтому характерная для спокойного состояния у КСЗ синусоидальная форма кривой блеска в случае V1413 Aql наблюдалась лишь в 1960-х годах (Мунари, 1992).

Обращает на себя внимание тот факт, что характеристики горячего компонента во время этих двух периодов спокойного состояния были схожи. Причем в 1993 г. оценка температуры горячего компонента в $T_{\text{hot}} \approx 90\,000\text{ K}$, полученная по данным оптической спектроскопии, была подтверждена данными УФ-наблюдений (по эквивалентной ширине линии HeII 1640 Å). В 2017 г. болометрический поток от горячего компонента был немного ниже, чем в 1993 г. ($1.2 \times 10^{-9}\text{ эрг/см}^2\text{ с}$ и $2 \times 10^{-9}\text{ эрг/см}^2\text{ с}$ соответственно).

Набор эмиссионных линий и потоки в них также были практически одинаковы во время спокойных состояний 1993 и 2017 гг. Средние отношения небулярных линий в 2017 г. $R1 = [\text{OIII}](\lambda 5007 + \lambda 4959)/[\text{OIII}](\lambda 4363) = 2.31$ и $R2 = [\text{OIII}](\lambda 5007 + \lambda 4959)/[\text{NeIII}](\lambda 3869) = 2.33$. При отношении содержаний $\text{O}/\text{Ne} = 7$ (что соответствует среднекосмическому значению) такие величины $R1$ и $R2$ соответствуют значениям $n_e = 5 \times 10^7 \text{ см}^{-3}$ и $T_e = 12000 \text{ К}$ для той области туманности, в которой формируются эти линии. Эти оценки физических характеристик туманности практически совпадают с теми, что были получены исходя из спектра от 26.06.1993 г. (Татарникова и др., 2009). С другой стороны, они довольно сильно отличаются от того, что было получено в 2009 и 2011 гг. (когда в спектре V1413 Aql стали снова наблюдаться запрещенные линии, но система при этом все еще находилась в активном состоянии).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы рассмотрели два состояния симбиотической звезды V1413 Aql. Состояние 2012 г. относится к постепенному затуханию вспышки 2009 г. Ранее Есиповым и др. (2013) было показано, что во время затмения различные затмеваемые области вспыхнувшего компонента могут иметь различную эффективную температуру. Этот факт рассматривался как еще один аргумент в пользу того, что во время вспышки вокруг горячего компонента формируется аккреционный диск (мы его называем “теплым” компонентом системы, а в литературных источниках — вспыхнувшим горячим компонентом), который дает основной вклад в излучение в континууме в оптическом диапазоне длин волн. Однако в этот раз анализ спектральных данных, полученных во время минимума 2012 г., не позволил выявить распределение температуры по диску затмеваемого “теплого” компонента. Возможно, это связано не только с ослаблением активности у V1413 Aql, но и с недостаточным количеством спектральных данных, полученных при фазах, близких к затмению. Можно с уверенностью утверждать, что по сравнению с минимумом 2010 г. болометрический поток “теплого” компонента упал в 2 раза, при этом форма распределения энергии в континууме не поменялась, и система все еще находилась в активном состоянии.

V1413 Aql перешла в крайне редкое для этой системы спокойное состояние в мае 2017 г. Характеристики горячего компонента во время спокойного состояния 2017 г. были схожи с нашими оценками, полученными во время предыдущего спокойного состояния, наблюдавшегося в 1993 г. (Есипов и др., 2000). Температура горячего компонента и в 2017 г., и в 1993 г. составляла примерно 90 000 К.

А его светимость при расстоянии до системы $d = 7 \text{ кпк}$ (Gaia Collaboration et al., 2018) составляла 1800 и 3200 L_\odot в 2017 г. и 1993 г. соответственно. Такие светимости и температуры характерны для горячих компонентов классических симбиотических звезд (КСЗ) во время спокойного состояния. В активном состоянии светимость вспыхнувшего горячего (“теплого”) компонента несколько выше. Так, в максимуме вспышки 2009 г. согласно модельным расчетам, приведенным в работе Есипова и др. (2013), она достигла 6700 L_\odot . Эта величина так же типична для вспыхнувших горячих компонентов КСЗ. Основное отличие системы V1413 Aql от КСЗ заключается в обратном соотношении длительности активного и спокойного состояний.

Однако к настоящему моменту наблюдения показывают, что некоторые КСЗ (например, BF Cyg, см. Томов и др., 2019), демонстрировавшие ранее вспышки, разделенные несколькими десятилетиями спокойного состояния, могут переходить в состояние “постоянной” вспышки, схожее по типу активности с V1413 Aql.

Все ранее наблюдавшиеся вспышки у V1413 Aql происходили по “холодному” сценарию. Это означает, что во время вспышки в оптическом и ближнем УФ-диапазонах вместо излучения горячего ($T_{\text{hot}} = 90\,000 \text{ К}$) компонента и туманности доминирует излучение, характерное для звезд спектральных классов А–F, а в случае V1413 Aql даже и более поздних спектральных классов (Есипов и др., 2013). Таким образом, Бальмеровский скачок наблюдался в поглощении, линии ионов с высокими потенциалами ионизации сильно ослабевали (вплоть до полного исчезновения). В случаях, когда КСЗ с такими типами вспышек наблюдались и в дальнем УФ-диапазоне, становилось понятно, что у подобных систем повышение блеска в оптическом диапазоне сопровождалось падением блеска в далеком УФ-диапазоне (см., например, анализ вспышки BF Cyg в 1989 и 2006 гг. Миколаевска и др., 1989; Томов и др., 2019). Таким образом, в энергетическом смысле это не вспышка, а перераспределение энергии.

С другой стороны, у КСЗ-наблюдались и “горячие” вспышки, во время которых в оптическом и ближнем УФ-диапазонах по-прежнему доминировало излучение туманности. Бальмеровский скачок наблюдался в эмиссии, линий ионов с высокими потенциалами ионизации не только не пропадали, но потоки в них возрастали. При этом в распределении энергии мог наблюдаться некий дополнительный “теплый” компонент, с эффективной температурой, характерной для звезд спектральных классов А–F, но его вклад в континуум не был доминирующим (см. YY Her, Мунари и др., 1997).

Поскольку орбитальные периоды систем, демонстрирующих эти два типа вспышек, примерно одинаковы, холодные и горячие компоненты в спокойном состоянии у этих систем существенно не отличаются, можно было бы предположить, что отличия систем с “горячей” вспышкой от систем с “холодной” вспышкой кроются в угле наклона орбиты к лучу зрения.

Для окончательного установления природы “теплого” компонента необходимы наблюдения в широком спектральном диапазоне, прежде всего в УФ-диапазоне, включая спутниковые наблюдения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа А.М. Татарникова поддержана грантом Программы развития МГУ “Ведущая научная школа “Физика звезд, релятивистских объектов и галактик”. А.А. Татарникова выражает благодарность за финансовую поддержку Российскому Научному Фонду (грант 17-12-01241, Постановка задачи, анализ спектральных данных).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аллен (D.A. Allen), Proc. Astron. Soc. Australia **5**, 369 (1984).
2. Бурнашѐв В.И., Бюлл. Абастуманск. астрофиз. обсерв. **59**, 83 (1985).
3. Валдес и др. (F. Valdes, R. Gupta, J.A. Rose, et al.), Astrophys. J. Suppl. Ser. **152**, 251 (2004).
4. Есипов В.Ф., Таранова О.Г., Юдин Б.Ф., Астрофизика **29**, 285 (1988).
5. Есипов В.Ф., Колотилов Е.А., Николаевска И. и др., Письма в Астрон. журн. **26**, 200 (2000) [V.F. Esipov, E.A. Kolotilov, I. Mikolajewska, et al., Astron. Lett. **26**, 162 (2000)].
6. Есипов В.Ф., Тарасова Т.Н., Татарников А.М., Татарникова А.А., Письма в Астрон. журн. **39**, 521 (2013) [V.F. Esipov, T.N. Tarasova, A.M. Tatarnikov, A.A. Tatarnikova, Astron. Lett. **39**, 458 (2013)].
7. Есипов и др. (V.F. Esipov, E.A. Kolotilov, G.V. Komissarova, et al.), Contrib. Astron. Observ. Skalnat Pleso **43**, 485, (2014).
8. Колотилов Е.А., Комиссарова Г.В., Татарникова А.А., Татарников А.М., Шенаврин В.И., Письма в Астрон. журн. **38**, 530 (2012) [E.A. Kolotilov, G.V. Komissarova, A.A. Tatarnikova, A.M. Tatarnikov, V.I. Shenavrin, Astron. Lett. **38**, 468 (2012)].
9. Николаевска и др. (J. Mikolajewska, M. Mikolajewski, and S.J. Kenyon), Astron. J. **98**, 1427 (1989).
10. Мунари (U. Munari), Astron. Astrophys. **257**, 163 (1992).
11. Мунари и др. (Мунари У., Колотилов Е.А., Попова А.А., Юдин Б.Ф.), Астрон. журнал **74**, 898 (1997) [U. Munari, E.A. Kolotilov, A.A. Popova, B.F. Yudin, Astron. Rep. **41**, 802 (1997)].
12. Остерброк (D.E. Osterbrock), *Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei* (Univ. Sci. Book, Mill Valley, California, 1989).
13. Силва, Корнелл (D.R. Silva and M.E. Cornell), Astrophys. J. Suppl. Ser. **81**, 865 (1992).
14. Татарникова А.А., Татарников А.М., Есипов В.Ф. и др., Письма в Астрон. журн. **35**, 206 (2009) [A.A. Tatarnikova, A.M. Tatarnikov, V.F. Esipov, et al., Astron. Lett. **35**, 182 (2009)].
15. Татарникова и др. (Татарникова А.А., Речкуба М., Бусон Л.М. и др.), Астрон. журн. **77**, 220 (2000) [A.A. Tatarnikova, M. Rejkuba, L.M. Buson, E.A. Kolotilov, U. Munari, B. F. Yudin, Astron. Rep. **44**, 190 (2000)].
16. Томов и др. (N.A. Tomov, M.T. Tomova, and D.V. Bisikalo), Bulgarian Astron. J. **30**, 60 (2019).
17. Шалте-Ладбек (R. Schulte-Ladbeck), Messenger **39**, 3 (1985).
18. Шмид, Шилд (H.M. Schmid and H. Schild), MNRAS **246**, 84 (1990).
19. Gaia Collaboration (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, et al.), Astron. Astrophys. **616**, 22, (2018).