

ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В ОБОЛОЧКЕ КАРЛИКОВОЙ НОВОЙ SS Cyg. I

Н. Ф. Войханская

Изучается эмиссионный линейчатый спектр (в основном водородный). Построен бальмеровский декремент (б. д.) и прослежено его изменение с изменением блеска. В минимуме блеска наблюдается инверсия в относительных интенсивностях бальмеровских линий, и вид б. д. не зависит от фазы блеска. При возгорании вспышки характер б. д. резко меняется и изменения тем сильнее, чем больше скорость возрастания блеска во вспышке. Рассмотрены особенности в изменении декремента в зависимости от вида вспышки. Показано, что во время вспышки в оболочке увеличиваются электронная концентрация, степень возбуждения и ионизации и возрастает непрозрачность оболочки. Результаты рассматриваются с точки зрения аккреционной модели вспышки. Предлагается новый критерий для прогнозирования вспышек.

The emission line spectrum (mainly hydrogen) is studied. The Balmer decrement (BD) is constructed and its variation with brightness is traced. At the minimum of light there observed an inversion in the relative intensities of Balmer lines; the kind of the BD does not depend on the phase of light. At the initial stage of the flare the character of the BD changes sharply, and the higher the rate of the increase of light in the flare the greater the change. Peculiarities of the decrement variation are considered as dependent on the kind of flare. It is shown that during the flare the electron concentration, the degree of excitation and ionization increase in the envelope as well as its opacity. The results are considered from the point of view of the accretion flare model. A new criterion for forecasting flares is suggested.

SS Cyg — самый яркий член группы карликовых новых типа U Gem. Общепринятая сейчас модель этой системы типична для карликовых новых: это тесная двойная система, компонентами которой являются холодная звезда типа dG 5 и горячая звезда — белый карлик, окруженный дискообразной оболочкой. От холодной звезды через внутреннюю точку Лагранжа идет газовый поток к горячей звезде. При встрече этого потока с оболочкой, окружающей горячую звезду, происходит местный разогрев оболочки и возникает так называемое горячее пятно. Доказательства существования такого пятна были получены в [1].

Несмотря на то, что SS Cyg изучалась больше других карликовых новых, сведений о физических условиях в ее оболочке не достаточно, и получены они в основном из анализа фотометрических данных. В настоящей работе сообщаются результаты предварительного анализа эмиссионного (в основном водородного) спектра. Наблюдательный материал и способ перехода к интенсивностям описаны в работах автора [2,3] и поэтому здесь повторно не описываются.

Вид бальмеровского декремента (б.д.) в минимуме блеска представлен на рис. 1. Фаза 0.41 соответствует дну затмения, 0.53 — наилучшей видимости горячего пятна. Фазы считались по элементам, приведенным в [4]. Обращают на себя внимание следующие особенности декрементов, изображенных на рис. 1: 1) все декременты практически одинаковы, и зависимости от фазы не наблюдается; 2) интенсивность линии H_{γ} всегда больше, чем H_{β} , т. е. наблюдается инверсное отношение интенсивностей.

Отсутствие зависимости от фазы частично может быть объяснено тем, что спектрограммы, соответствующие разным фазам орбитального движения, получены в моменты времени, относящиеся к разным периодам. Поэтому зависимость вида б.д. от фазы может быть завуалирована непрерывно меняющимися условиями в оболочке. В течение одного периода различия, возможно, будут заметны.

По мере возгорания вспышки вид б.д. резко меняется. Он становится более пологим, и постепенно пропадает инверсное отношение интенсивностей. Общий характер изменений декремента показан на рис. 2, а. При убывании блеска на нисходящей ветви вспышки вид декремента изменяется в обратном направлении. На этом рисунке показан также вид декремента в максимуме блеска. Способ его построения излагается ниже.

Изменение декремента происходит неодинаково во вспышках разной крутизны. При большой скорости возрастания блеска на восходящей ветви вспышки вид декремента изменяется очень быстро, у

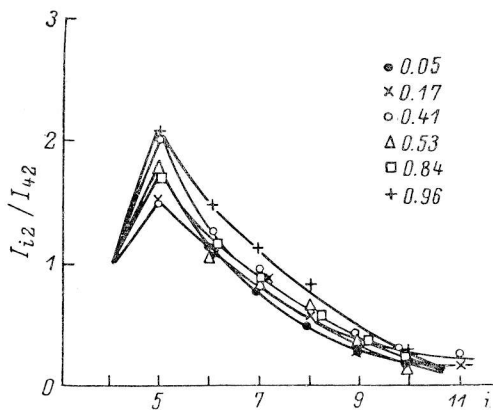


Рис. 1. Бальмеровский декремент в минимуме блеска.

Указаны фазы, вычисленные по элементам [4].

вспышек с плавным возрастанием блеска изменение декремента происходит медленнее. На рис 2, б показаны б.д. в начале вспышек крутой (№ 497, пунктирная линия) и плавной (№ 488, тонкая линия). Нумерация вспышек заимствована из публикаций AAVSO. Декремент перед началом обеих вспышек оказался одинаковым и отмечен жирной линией. Из этого рисунка видно, как велико различие в быстроте изменения декремента у вспышек с разной скоростью возрастания блеска. При одинаковом блеске вид декремента существенно разный на восходящей и нисходящей ветвях вспышки (рис. 2, в).

На нисходящей ветви вспышки № 490 произошла небольшая послевспышка. До ее начала в относительных интенсивностях бальмеровских линий наблюдалась частичная инверсия: $I_{52}/I_{42} > 1$, в момент начала послевспышки инверсия исчезла: $I_{52}/I_{42} < 1$. Таким образом, процесс энерговыделения

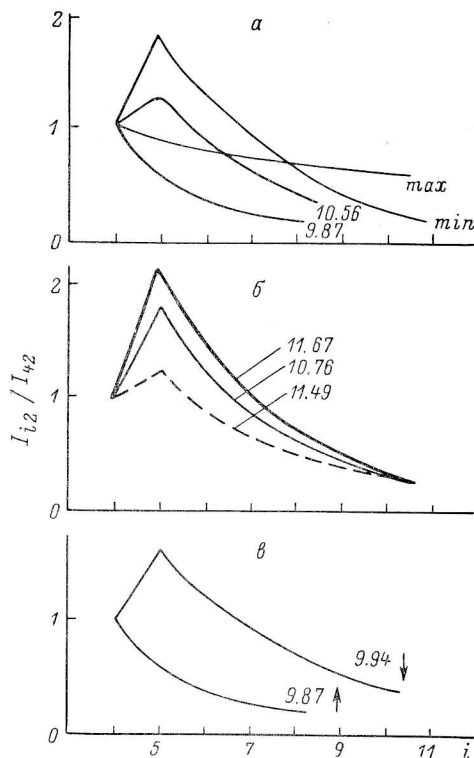


Рис. 2. Изменение бальмеровского декремента во вспышке.

Рядом с кривыми указана видимая звездная величина.

а — общий характер изменения (min — средний декремент в минимуме блеска, max — в максимуме блеска), б — изменение декремента во вспышках с разной скоростью возрастания блеска (жирная кривая — декремент перед вспышкой, тонкая — вспышка с медленным возрастанием блеска, пунктирная — с быстрым), в — различие декрементов на восходящей (↑) и нисходящей (↓) ветвях вспышки при одинаковом значении m .

связан с резким изменением вида б.д., поэтому отношение I_{52}/I_{42} можно будет использовать для прогнозирования вспышек с большей надежностью, чем блеск и показатели цвета. Например, в момент получения спектрограмм № 4798 и 4799 по блеску $m = 11.49$ нельзя еще предположить, что начинается вспышка. В то же время изменения в спектре уже настолько велики, что не могут остаться незамеченными (рис. 2, б).

Изменение величины бальмеровского скачка с изменением блеска показано на рис. 3. В него включены результаты работы [5]. Видно, что при возрастании блеска скачок уменьшается и иногда становится положительным.

Известно, что с увеличением блеска эквивалентные ширины эмиссионных линий в спектре SS Cyg уменьшаются, и постепенно линии исчезают. Количественно этот вопрос разобран в [2]. Если от эквивалентных ширин перейти к интенсивностям, то изменение эмиссий оказывается иным (рис. 4). С увеличением блеска интенсивность первых линий бальмеровской серии не изменяется, а может быть, даже немного уменьшается, в то же время интенсивность линий высоких номеров, а также линий He I, He II и Ca II возрастает. Уменьшение эквивалентных ширин объясняется тем, что интенсивность

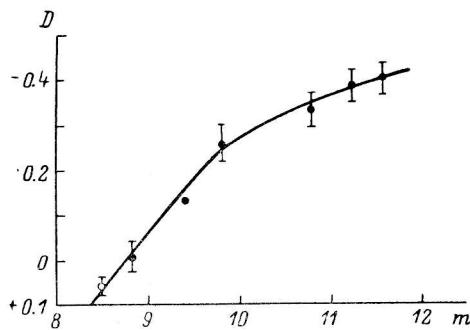


Рис. 3. Изменение бальмеровского скачка D с изменением блеска m .
Светлый кружок — данные работы [5].

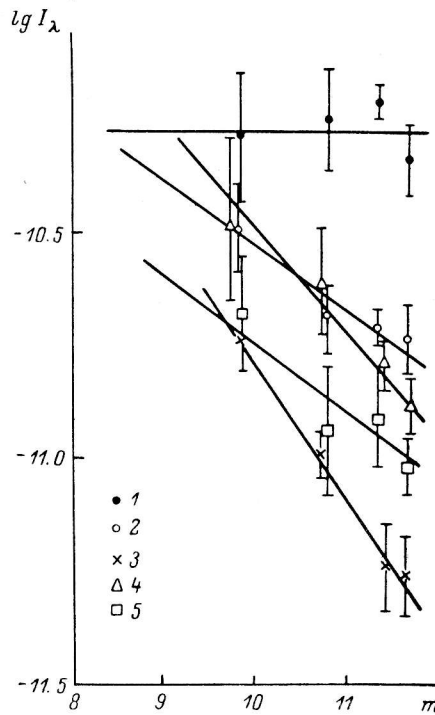


Рис. 4. Изменение интенсивности эмиссионных линий с возрастанием блеска во время вспышки.
1 — H β , 2 — H γ , 3 — He I $\lambda 4437$, 4 — He II $\lambda 4686$, 5 — Ca II $\lambda 3933$.

континуума возрастает не менее чем на порядок, а линий — не более чем в 4—5 раз.

В работе [1] было показано, что линии He I и He II образуются ближе к поверхности горячего компонента системы, чем линии водорода. Будем характеризовать возбуждение в этих более глубоких слоях оболочки отношением интенсивностей линий I_{4686} (He II) / I_{4471} (He I). В минимуме блеска ($\bar{m} = 11^m8$) оно равно 0.45, в максимуме вспышки ($\bar{m} = 8^m5$) — 2.8. Т. е. «возбуждение» возросло почти в 6 раз. Величина интенсивностей линий в максимуме блеска получалась экстраполяцией зависимостей I от m (рис. 4) к среднему значению блеска в максимуме вспышки (8^m5). Линии Ca II возникают скорее всего в самых внешних, наиболее удаленных от поверхности горячей звезды, частях оболочки. Внутренние области оболочки слишком горячи, и в них кальций будет многократно ионизован. Это значит, что при вспышке изменения происходят не только во внутренних, но и во внешних слоях оболочки.

Дискообразные оболочки карликовых новых являются весьма плотными образованиями. Электронная концентрация в них $n_e \approx 10^{12} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$. В работе [6] показано, что в оболочках большой плотности столкновения электронов с водородными атомами очень существенно влияют на интенсивность бальмеровских линий, а иногда такие столкновения являются основным механизмом возбуждения водорода. Поэтому полученные б.д. были сравнены с расчетными декрементами из работы [7], где рассмотрена среда, непрозрачная в линиях, в которой возбуждение водородных атомов определяется электронными ударами. Оказалось, что наблюдаемые в минимуме блеска декременты (рис. 4) не удается представить ни одним из рассчитанных в [7] теоретических б.д. Не нашлось подобных декрементов в опубликованной несколько ранее, чем [7], работе [8]. В [8] учитывались оба вида возбуждения: радиативное и электронный удар, однако там нет расчетов для моделей, в которых роль радиативного возбуждения мала по сравнению с возбуждением электронным ударом.

Для того чтобы получить средние характеристики оболочки, мы поступали следующим образом: по данным работы [7] для каждой линии строили трех-

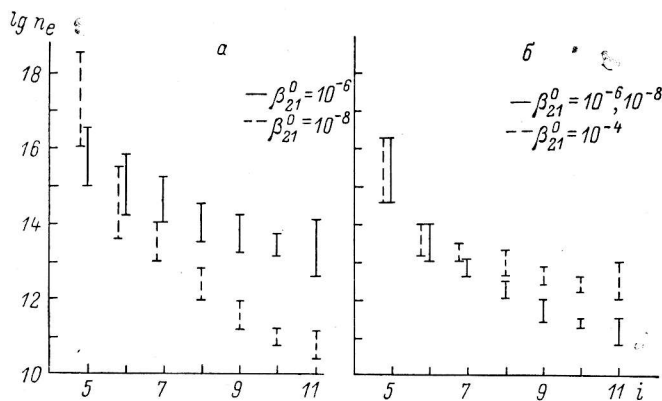


Рис. 5. Физические параметры, при которых теоретическое значение относительной интенсивности i бальмеровской линии равно наблюдаемому.

мерные зависимости в координатах $I_{i2}/I_{42} - \lg \beta_{21}^0 - \lg n_e$, где I_{i2}/I_{42} — относительная интенсивность i — линии, β_{21}^0 — вероятность выхода из оболочки L_α -квантов. Затем на поверхности получившейся фигуры находили участок, в пределах которого относительная интенсивность данной линии равна наблюдаемой. Результаты приведены на рис. 5 для значений электронных температур $T_e = 10^4$ (а) и $2.5 \cdot 10^4 \text{ K}$ (б). На этом рисунке для каждой линии при предельных значениях величины β_{21}^0 указан интервал, в котором относительная интенсивность данной линии равна наблюдаемой. Из рис. 5 видно, что в рассмотренном интервале электронных температур нельзя указать область физических параметров, которые удовлетворяли бы одновременно всем линиям. Возможно, что при более высокой температуре такая область найдется.

Некоторые из декрементов, полученных при возрастании блеска, удалось представить теоретическими из работ [7, 8]. Результаты приведены в таблице. В головке таблицы указаны блеск и номер работы, из которой были взяты теоретические бальмеровские декременты. Стрелка \uparrow означает восходящую ветвь вспышки, \downarrow — нисходящую, max — декремент в максимуме блеска. Физические параметры, указанные в первом столбце таблицы, имеют следующий смысл: T_* — температура горячей звезды в системе, n_1/n_e — степень ионизации в оболочке, K_B — величина, характеризующая

Параметры	$m_V = 9^m 87 \uparrow$			max		$m_V = 9^m 84 \downarrow$
	[7]	[7]	[8]	[7]	[8]	[7]
T_e	10^4	$2 \cdot 10^4$	$1.5 \cdot 10^4$	$1.5 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	10^4
T_*	—	—	$3 \cdot 10^4$	—	$2 \cdot 10^4$	—
n_e	10^{12}	10^{12}	10^{11}	10^{14}	10^{13}	10^{14}
$\lg \beta_{21}^0$	-6	-4	-2	-4.7	-2; -3	-6
n_1/n_e	0.82	$1.4 \cdot 10^{-3}$	—	$1.04 \cdot 10^{-2}$	—	1.03
K_B	+0.17	+0.06	—	-1.00	—	-1.44
w	—	—	$10^{-6}; 10^{-10}$	—	10^{-10}	—

непрозрачность оболочки [7], w — коэффициент дилуции в оболочке. Смысл остальных обозначений пояснен выше.

Величина w , полученная с помощью декрементов из работы [8], представляется слишком малой. Если принять радиус белого карлика равным 10^8 см, радиус холодного компонента примерно равным R_\odot , а расстояние между центрами компонентов 10^{11} см, то наименьший ожидаемый коэффициент дилуции $w \approx 10^{-5}$. Декремент для случая $m = 9^m 87 \uparrow$ оказалось возможным представить теоретическими декрементами для среды с чисто радиативным возбуждением. Однако из-за многочисленности возможных вариантов они в таблице не приводятся.

Из сказанного выше и результатов, приведенных в таблице, можно сделать заключение, что при возрастании блеска увеличиваются электронная плотность n_e , непрозрачность в оболочке ($K_B < 0$) и степень возбуждения и ионизации в ней.

В настоящее время наиболее перспективной моделью вспышек карликовых новых является аккреционная модель. Согласно ей, началу вспышки предшествует резкое возрастание темпа переноса массы от холодного компонента системы. Это приводит к образованию вокруг горячего компонента более мощной и в первые моменты более холодной, чем обычно, оболочки. Полученные нами результаты могут быть легко поняты с точки зрения этой модели. В частности, замытие бальмеровского скачка можно объяснить увеличением излучения в континууме вследствие нескольких физических процессов, но появление положительного скачка ни один из них объяснить не может. Положительный скачок может дать только оболочка, имеющая положительный скачок соответствующей величины.

Попытка отыскать средние физические характеристики оболочки основана на предположении о ее однородности. В действительности это не так. Очень вероятно, что в такой оболочке существует стратификация физических условий. Косвенное указание на это дает отмеченный в [1] факт увеличения глубины затмения с увеличением номера линии. В пользу предположения о большой неоднородности оболочки говорит также результат, представленный на рис. 5. В дальнейшей работе будет сделана попытка учесть эту неоднородность оболочки, для того чтобы разложить наблюдаемый суммарный декремент на составляющие от отдельных слоев. После этого можно будет проводить анализ физических условий в отдельных слоях оболочки и построить ее модель.

Литература

1. В о й х а н с к а я Н. Ф. Горячее пятно в тесной двойной системе SS Cyg. — Астрон. цирк., 1973, № 801, с. 5—7.
2. В о й х а н с к а я Н. Ф. О линейчатом спектре SS Cyg. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1972, 4, с. 106—114.
3. В о й х а н с к а я Н. Ф. Спектрофотометрическое исследование SS Cyg. — Астрон. ж., 1973, 50, с. 786—791.

4. Walker M. F., Chincolini G. Image-tube spectroscopic studies of rapid variables I. Spectroscopic and photometric observations of SS Cygni. — *Astrophys. J.*, 1968, 154, p. 157—178.
5. Шалонж Д., Диван Л., Мирзоян Л. В. Спектрофотометрическое изучение нестационарных звезд. 1. Одна вспышка SS Лебедя. — *Астрофизика*, 1968, 4, с. 603—615.
6. Горбачкий В. Г. О влиянии столкновений атомов с электронами на интенсивности бальмеровских линий в спектрах движущихся оболочек звезд. — *Астрофизика*, 1965, 1, с. 129—142.
7. Гершберг Р. Е., Шноль Э. Э. Бальмеровский декремент в спектрах движущихся сред. Случай ударной ионизации и ударного возбуждения. — *Изв. Крымск. астрофиз. обс.*, 1974, 50, с. 122—151.
8. Луд Л., Ильмас М. Эмиссионные линии в спектрах звезд. Тарту, 1971, 126 с.

Октябрь 1975 г.