

УДК 524.386-325.4

ЗАТМЕННАЯ ПЕРЕМЕННАЯ UU CAS: КРИВЫЕ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ

© 2017 С. Ю. Горда*

*Коуровская астрономическая обсерватория, Уральский федеральный университет, Екатеринбург,
620000, Россия*

Поступила в редакцию 5 мая 2017 года; принята в печать 22 июня 2017 года

Представлены результаты спектральных наблюдений UU Cas, полученные на оптоволоконном эшелле-спектрометре высокого разрешения ($R = 15\,000$) 1.2-м телескопа Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета. Впервые найдены значения лучевых скоростей вторичного, более массивного и менее яркого, компонента. Получено спектроскопическое отношение масс компонентов $q = M_1/M_2 = 0.54$. Для значения угла наклона орбиты $i \simeq 69^\circ$, приведенного в литературе, определены массы компонентов $M_1 = 9.5M_\odot$, $M_2 = 17.7M_\odot$, а также значение радиуса орбиты $A = 52.7R_\odot$. Представлены доказательства наличия диска вокруг массивного компонента и расширяющейся общей оболочки.

Ключевые слова: *двойные: затменные — двойные: тесные — звезды: индивидуальные: UU Cas*

1. ВВЕДЕНИЕ

Затменная переменная UU Cas ($P = 8^d51929$, $V = 10^m4-10^m8$) известна как тесная двойная система (ТДС) с очень массивными, порядка $30M_\odot$ и более, компонентами. Первое и вплоть до настоящего времени единственное спектральное исследование UU Cas на основе фотографического материала было проведено Сенфордом [1] еще в 30-х годах прошлого века. В полученных им спектрах присутствовали линии только одного компонента. Сенфорд определил его спектральный класс как В1. С учетом величины полуамплитуды построенной им кривой лучевых скоростей, 161 км с^{-1} , и принимая во внимание им же найденное (правильное) значение периода порядка восьми суток, Сенфорд оценил массу видимого компонента в пределах $30-100 M_\odot$. Первое значение соответствовало случаю равенства масс компонентов, второе — половинной массе вторичного компонента $q = M_2/M_1 = 0.5$. Случай меньшей массы вторичного компонента рассматривался Сенфордом, как более реалистичный, т.к. его линии в спектре не просматривались. На основе этих данных система UU Cas долгое время считалась одной из самых массивных известных ТДС.

Несколько позднее были получены визуальные и фотографические кривые блеска UU Cas, подробная библиография которых приведена в работах Антохиной и Кумсиашвили [2] и Полуши-

ной [3]. Уже первые фотографические кривые блеска показали, что компоненты значительно деформированы приливными силами (см., например, Паренаго и Кукаркин [4]). Кривая блеска соответствовала типу переменности β Lyr. Получив из решения кривой блеска отношение светимостей компонентов, Паренаго и Кукаркин [4], используя зависимость масса—светимость, получили оценку отношения масс компонентов $q = 0.68$, а также и сами значения масс $M_1 = 58 M_\odot$, $M_2 = 40 M_\odot$. Найденные результаты не противоречили выводам Стенфорда [1] о больших массах компонентов этой ТДС.

На более точных современных кривых блеска UU Cas, полученных Кумсиашвили [5] и Полушиной [3] с использованием фотоэлектронных приемников излучения, отмечались значимые (до 0^m08) отклонения блеска от средних значений. Это объяснялось наличием газовой составляющей в системе (общая оболочка, газовые струи), образующейся вследствие заполнения одним или двумя компонентами своих полостей Роша. Полученные в процессе решения кривых блеска методом синтеза (Антохина и Кумсиашвили [2]) и классическим методом Рессела—Мерила (Полушина [3]) оценки значений масс компонентов в интервале $23 M_\odot-35 M_\odot$ также не противоречили сделанным ранее выводам о том, что UU Cas является массивной ТДС.

Если фотометрические наблюдения UU Cas время от времени проводились, то детального спектрального исследования звезды со времен

*E-mail: Stanislav.Gorda@urfu.ru

Сенфорда долгое время не было сделано. Как исключение в начале 70-х годов прошлого века Мартин [6] при исследовании участка Галактического поля в районе созвездия Кассиопеи по фотографическим низкодисперсионным спектрам оценил спектральный класс UU Cas как B0.5III.

В 2008 г. на 2-м телескопе Болгарской Национальной Обсерватории была начата программа спектрального исследования UU Cas [7, 8]. В процессе ее выполнения в двух спектральных интервалах был получен ряд спектров, в которых линия $H\alpha$ наблюдалась в сильной эмиссии. Авторами было отмечено изменение формы линии с фотометрической фазой, что свидетельствовало о наличии газа в системе. Абсорбционные профили некоторых линий нейтрального гелия, особенно на фазах, близких к квадратурам, показывали двойственную структуру. При этом одна из компонент была значительно глубже. Помимо линий водорода и гелия в спектрах присутствовали более слабые линии металлов, образующиеся в фотосфере. Профили этих линий имели одиночную структуру и принадлежали одному из компонентов UU Cas. По смещениям этих линий авторами была построена кривая лучевых скоростей, аналогичная кривой Сенфорда, но с полуамплитудой на 25% больше. Кривая лучевых скоростей, построенная по более сильной компоненте линий гелия, полностью повторяла кривую металлов. Попытки построить кривую лучевых скоростей второго компонента по линиям нейтрального гелия не увенчались успехом из-за недостаточного количества спектров, полученных на фазах, где двойственность спектральных линий гелия явно проявлялась. Анализируя форму эмиссионных линий $H\alpha$, авторы предположили, что вторичный, плохо проявляющийся в спектре, компонент системы окружен толстым аккреционным диском, значительно экранирующим поток излучения от него. Модель системы UU Cas с аккреционным диском вокруг массивного компонента была представлена Джурасевичем и др. [9]. В процессе проведения упомянутых выше исследований UU Cas значения лучевых скоростей вторичного компонента не были определены, и не была построена кривая его лучевых скоростей. Следовательно, не была найдена спектроскопическая (динамическая) величина отношения масс компонентов и не определена масса вторичного компонента. По этой причине построенные модели системы являются предварительными.

Целью данной работы являлось проведение спектрального исследования UU Cas и построение кривых лучевых скоростей обоих компонентов, а также определение значения q .

Во избежание путаницы, главным компонентом системы будем считать, как это принято при решении кривых блеска, более яркий компонент,

затмеваемый в главном минимуме, массу которого будем обозначать M_1 , соответственно, через M_2 обозначим массу вторичного компонента.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА СПЕКТРОВ

Спектры UU Cas были получены автором в период с января по апрель 2017 г. на оптоволоконном эшелле-спектрометре высокого разрешения $R = 15000$ [10, 11] альт-азимутального телескопа ($D = 1.21$ м, $F = 12.0$ м) Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета [12]. В качестве светоприемного устройства в спектрометре использовалась ПЗС-камера ANDOR DZ936N-BEX2-DD (2048×2048 , 13.5 мкм), с охлаждением ПЗС-чипа до температуры -85°C .

Спектрограммы содержали по 60 перекрывающихся порядков, охватывающих спектральный интервал 4100–7500 Å. Для построения дисперсионных кривых до и после очередной серии кадров спектра звезды с экспозицией 30 минут каждый производилась съемка спектра Th–Ag лампы. Полученные в одну ночь серии кадров спектра звезды объединялись с помощью процедуры медианного усреднения для увеличения отношения сигнал-шум и устранения эффектов, вызванных действием космических частиц. Для дальнейшей обработки использовались эти суммарные кадры спектров UU Cas с эффективными временами экспозиции от 1 до 3 часов. Моменты времени, соответствующие серединам экспозиций, приведены в первом столбце таблицы 1. Экстракция спектральных порядков и дальнейшая обработка спектрограмм, включающая в себя построение дисперсионных кривых, проведение уровня континуума и нормирование спектральных порядков, производилась в пакете DECH [13].

Значение отношения сигнал-шум (S/N) в порядках спектра UU Cas, определяющее качество регистрируемых спектральных деталей и зависящее от величины экспозиции, прозрачности атмосферы и спектральной чувствительности регистрирующей ПЗС-матрицы, было максимальным в красной области спектра и значительно уменьшалось в синей области. В таблице 2 приведены минимальные, максимальные и средние значения S/N , измеренные за весь период наблюдений в порядках эшелле-спектров, в которых присутствовали спектральные линии, использованные далее в работе.

В полученных спектрах UU Cas самыми сильными являлись линии $H\alpha$ и $\text{HeI } \lambda 5875 \text{ \AA}$, а также менее глубокие линии нейтрального гелия $\lambda 6678.2 \text{ \AA}$ и $\lambda 7065.2 \text{ \AA}$. Профили линии $H\alpha$ имели

Таблица 1. Моменты наблюдений спектров, продолжительность экспозиции, фотометрические фазы и лучевые скорости компонентов UU Cas

JD(2450000+)	Total exposure time, hrs	Phase	M_1		M_2
			$V_r^{\text{NII}} \pm \sigma,$ km s ⁻¹	$V_r^{\text{HeI}} \pm \sigma,$ km s ⁻¹	$V_r^{\text{HeI}} \pm \sigma,$ km s ⁻¹
7779.2222	3	0.273	-240.9 ± 7.1	-251.4 ± 2.0	66.1 ± 6.7
7822.1542	3	0.312	-242.9 ± 3.9	-243.2 ± 5.2	78.4 ± 8.1
7827.1882	3	0.902	49.1 ± 3.7	65.5 ± 2.1	-101.9 ± 4.5
7827.5059	2	0.940	14.6 ± 2.4	32.0 ± 1.7	-83.3 ± 6.2
7828.1918	3	0.021	-101.4 ± 5.0	-127.2 ± 3.0	—
7828.5057	2	0.057	-151.7 ± 5.3	-173.9 ± 3.3	—
7829.1773	2.5	0.136	-206.7 ± 3.1	-206.4 ± 2.4	27.5 ± 4.4
7829.4939	2	0.173	-228.2 ± 2.5	-214.3 ± 3.6	57.9 ± 6.4
7832.1812	2.5	0.489	-80.2 ± 2.0	-95.4 ± 2.4	-25.2 ± 13.6
7832.4730	2	0.523	-34.0 ± 3.1	-43.6 ± 4.8	-67.6 ± 12.8
7834.1743	2	0.723	126.7 ± 4.5	118.9 ± 4.6	-137.8 ± 4.3
7834.5055	2	0.762	128.1 ± 2.6	129.9 ± 4.1	-135.3 ± 2.9
7835.1763	2	0.840	99.1 ± 3.0	100.9 ± 2.4	-111.4 ± 5.4
7835.4763	3	0.876	79.1 ± 2.3	78.9 ± 1.7	-114.7 ± 7.1
7850.4892	1	0.638	80.1 ± 7.7	87.6 ± 9.7	-102.7 ± 10.5
7855.4514	1	0.220	-248.5 ± 5.4	-233.3 ± 3.6	57.0 ± 6.5
7856.4200	1	0.334	-219.7 ± 3.1	-214.5 ± 4.7	47.7 ± 7.8
7870.3958	2	0.975	-40.1 ± 2.8	-47.9 ± 3.7	—

сильную эмиссионную компоненту, их форма в значительной степени изменялись с фазой. В отдельных спектрах явно присутствовали линии Na II $\lambda 6482.1$, $\lambda 5710.8 \text{ \AA}$, а также Si II $\lambda 5739.8 \text{ \AA}$ и C III $\lambda 5695.9 \text{ \AA}$, но наиболее заметной являлась серия линий N II $\lambda 5666.6$, $\lambda 5676.0$, $\lambda 5679.6$ и $\lambda 5686.2 \text{ \AA}$. Кроме звездных линий в спектре наблюдались полосы межзвездного поглощения, т.н. DIB-ы (Diffuse Interstellar Bands), линии межзвездного дублета Na I и многочисленные теллурические линии в красной области спектра. В порядках с длинами волн менее $\lambda 5500 \text{ \AA}$ из-за низкой величины отношения сигнал-шум профили линий терялись на фоне шума и были не пригодны к дальнейшей обработке. В качестве примера в последней строке таблицы 2 приведены значения S/N в порядке спектра, содержащем линию H β .

3. ПОСТРОЕНИЕ КРИВЫХ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ КОМПОНЕНТОВ UU CAS

3.1. Линии ионизованного натрия

Первоначально, как и в работах Маркова и др. [7, 8], было решено определять лучевые скорости по линиям металлов, которые скорее всего образуются в фотосферах компонентов. Во всех спектрах наиболее глубокими являлись линии N II в районе $\lambda \sim 5680 \text{ \AA}$. Все линии проявляли однокомпонентную структуру и, наиболее вероятно, принадлежали одному из компонентов UU Cas. На рис. 1 приведен участок спектрального порядка, содержащий четыре линии NII, полученный в одну из ночей с отношением $S/N = 40$. Можно заметить существенное смещение центров профилей линий относительно их лабораторных длин волн.

Определение лучевых скоростей осуществлялось в пакете DECH [13] с использованием процедуры совмещения прямых и зеркальных профилей

Таблица 2. Отношение сигнал/шум в порядках спектра, соответствующих спектральным линиям, по которым проводилось измерение лучевых скоростей, за весь период наблюдений

Спектральная линия	S/N_{\min} , %	S/N_{\max} , %	$\overline{S/N}$, %
He I $\lambda 7065$	23	44	35
He I $\lambda 6678$	26	52	38
He I $\lambda 5875$	25	44	34
H α $\lambda 6563$	25	50	38
N II $\lambda 5676$	23	44	35
H β $\lambda 4861$	10	13	11

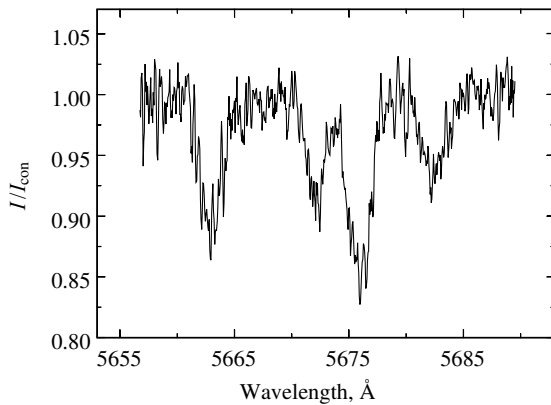


Рис. 1. Участок спектрального порядка, содержащий линии Na II $\lambda 5666.63$, $\lambda 5676.02$, $\lambda 5679.56$, $\lambda 5686.21$ Å ($S/N = 40$, $JD_{\odot} 2457829.18$).

линий. В результате для каждого спектра были найдены по четыре значения лучевых скоростей. В третьей и четвертой колонках таблицы 1 приведены полученные по ним средние значения лучевых скоростей и их среднеквадратичных ошибок.

Для построения кривой лучевых скоростей были вычислены значения фотометрических фаз. Использовалась приведенная ниже формула, которая применяется для вычисления фаз при построении кривых блеска UU Cas:

$$JD_{\odot} = 2445722^d.10557 + 8^d.51929 E.$$

Поскольку из фотометрических и полученных ранее спектральных данных следует, что орбиты компонентов круговые, аппроксимация вычисленных значений лучевых скоростей производилась функцией синус.

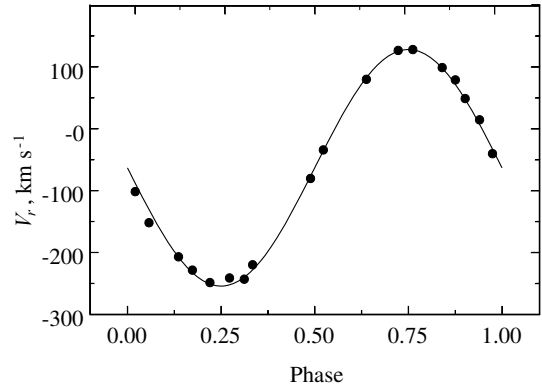


Рис. 2. Кривая лучевых скоростей (сплошная линия), построенная по усредненным значениям лучевых скоростей (точки), найденным по смещениям четырех линий Na II.

Результат аппроксимации показан на рис. 2. Форма синусоиды соответствует следующим параметрам: гамма-скорость $V_0 = -62.8 \pm 2.0$ км с⁻¹, полуамплитуда $K_1 = 191.2 \pm 2.7$ км с⁻¹. Можно видеть, что полученная кривая лучевых скоростей очень хорошо представляется функцией синус. Величина среднеквадратичной ошибки разброса точек относительно аппроксимационной функции составляет всего $\sigma = \pm 8.1$ км с⁻¹. Это подтверждает сделанный ранее вывод, что орбиты компонентов в системе UU Cas круговые.

Полученное значение полуамплитуды близко к значению 200 км с⁻¹, приведенному в работе Маркова и др. [7], и на 20% больше, чем найдено Сенфордом [1]. В тоже время величина скорости барицентра системы, полученная нами, близка к значению Сенфорда [1] $V_0 = -57$ км с⁻¹ и в полтора раза больше значения, приведенного Марковым и др. [8] $V_0 = -45$ км с⁻¹.

Полученная кривая лучевых скоростей относится к главному компоненту затменной системы UU Cas, т.к. после нулевой фазы, соответствующей главному, более глубокому, минимуму на кривой блеска, лучевая скорость компонента увеличивается в сторону отрицательных значений, т.е. он движется по своей орбите в направлении на наблюдателя и, следовательно, выходит из затмения.

3.2. Линии нейтрального гелия

В отличие от линий ионизованного азота профили линий нейтрального гелия, особенно в спектрах, полученных на фазах близких к квадратурам, показывали явную двухкомпонентную структуру. Причем один из компонентов всегда был заметно глубже другого. Поскольку в профилях линий He I практически на всех фазах превалировал

один из компонентов, было решено провести предварительное измерение лучевых скоростей этого компонента по профилям самой сильной линии в спектре He I $\lambda 5875 \text{ \AA}$ тем же методом, который был применен для линий Na II. В результате была получена кривая лучевых скоростей, повторяющая, однако со значительно большим разбросом точек, кривую лучевых скоростей, построенную по смещениям линий Na II. Таким образом, подтвердился вывод Маркова и др. [8] о том, что более сильный составляющий элемент линий He I, принадлежит главному компоненту системы UU Cas.

Для получения более точных значений лучевых скоростей главного компонента и, возможно, построения кривой лучевых скоростей вторичного компонента была проведена процедура деления профилей на компоненты. Разделение профилей спектральных линий He I проводилось методом аппроксимации гауссианами. При этом, учитывая, что в профилях линий гелия из-за наличия газовой составляющей в системе UU Cas и сравнительно низкого потенциала возбуждения атомов гелия может присутствовать эмиссионная составляющая, аппроксимация профилей линий проводилась тремя гауссианами. Как отмечено выше, использовались профили трех линий He I $\lambda 5875$, He I $\lambda 6678$ и He I $\lambda 7065 \text{ \AA}$. Профили более «синих» линий гелия были существенно зашумлены, и в работе не использовались.

На рис. 3 приведен пример деления профилей линии He I $\lambda 5875 \text{ \AA}$, полученных на фазах близких к квадратурам (0.25 и 0.75), на компоненты. Как можно видеть, профили линии хорошо разделяются на две компоненты. Гауссиана, имитирующая эмиссионную компоненту газовой составляющей, небольшая и не влияет на определение положений центров профилей абсорбционных линий гелия. В то же время она вносит значимую коррекцию в общий профиль линии, приближая его к наблюдательным данным. Такой чисто технический прием, конечно, не позволяет делать какие-либо выводы о природе и величине эмиссии, но может скорректировать положение абсорбционной линии, определяемое центром гауссианы, когда на нее налагается эмиссионная составляющая, и симметрия профиля линии нарушается. Следует отметить, что при выполнении процедуры аппроксимации для всех профилей линий эмиссионная компонента всегда была намного меньше абсорбционных составляющих и в отдельных случаях лишь в полтора раза превышала ту, что изображена на рис. 3. При аппроксимации профилей линий в спектрах, полученных на фазах 0.1–0.2, введение эмиссионной гауссианы вообще не потребовалось.

Средние значения лучевых скоростей компонентов UU Cas, определенные по трем линиям ге-

Таблица 3. Параметры кривых лучевых скоростей компонентов UU Cas (аппроксимация синусоидами)

$V_0,$ km s^{-1}	$K_1,$ km s^{-1}	$K_2,$ km s^{-1}	RMS, km s^{-1}
-60.7 ± 1.8	-190.3 ± 2.3	—	± 8.8
-36.2 ± 2.9	—	102.2 ± 2.8	± 11.4

лия, приведены в пятом и шестом столбцах таблицы 1. Кривые лучевых скоростей главного компонента путем аппроксимации функцией синус были построены с использованием лучевых скоростей, найденных по смещениям линий He I и Na II. При этом были исключены значения лучевых скоростей, на фазах 0.021 и 0.057, полученные по линиям He I, т.к. их значения отличались на $-20.. -30 \text{ km s}^{-1}$ от значений, определенных по линиям Na II. Также, при построении кривых лучевых скоростей вторичного компонента не использовались значения на фазах 0.489 и 0.523, т.к. они были определены с большой степенью неопределенности (см. последний столбец таблицы 1). Результаты аппроксимации проиллюстрированы на рис. 4, а значения соответствующих коэффициентов приведены в таблице 3.

Полученное значение отношения масс менее массивного компонента к более массивному $q = M_1/M_2 = K_2/K_1 = 0.54$ существенно меньше оценок, найденных из решений кривых блеска $q = M_2/M_1 = 0.75-0.8$ [2, 3]. Кроме того, соотношение масс компонентов UU Cas, полученное по спектральным данным ($M_1 < M_2$), оказалось противоположным тому, что определялось по фотометрическим данным ($M_1 > M_2$). Таким образом из анализа кривых лучевых скоростей следует, что в системе UU Cas более массивным является менее яркий вторичный компонент.

Значения масс с точностью до множителя $\sin^3 i$, а также проекций больших полуосей орбит компонентов приведены в таблице 4, а значения масс компонентов и размера полуоси взаимной орбиты для угла наклона $i = 69^\circ$, найденного из решений кривых блеска, — в первой строке таблицы 5.

Следует отметить, что полученные из анализа спектральных данных значения масс компонентов UU Cas существенно ниже оценок, полученных ранее по фотометрическим данным с использованием фундаментальных зависимостей между параметрами звезд (см. таблицу 5).

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ, ЭВОЛЮЦИОННЫЙ СТАТУС UU CAS

Полученная по спектральным данным конфигурация компонентов UU Cas оказалась прямо про-

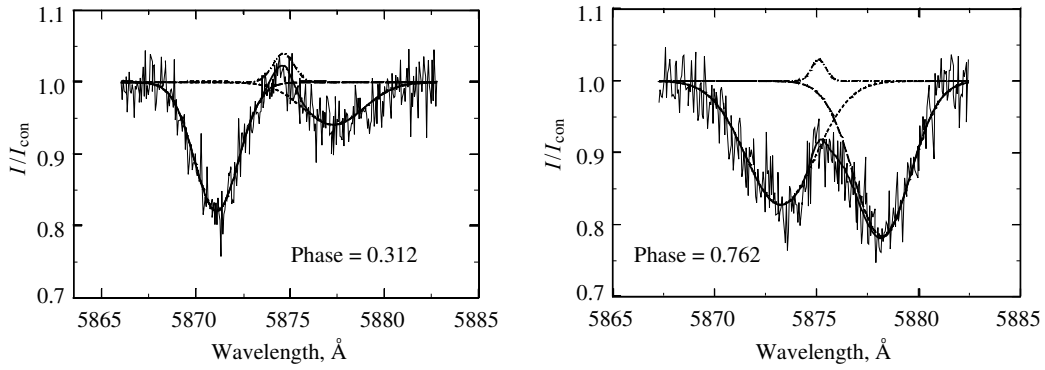


Рис. 3. Пример деления профилей линий He I $\lambda 5875 \text{ \AA}$ на компоненты методом аппроксимации тремя гауссианами; сплошная линия — наблюдательный профиль, толстая сплошная линия — аппроксимационный профиль, штриховая линия — профиль линии главного компонента (M_1), пунктирная линия — профиль линии вторичного компонента (M_2) UU Cas, штрих-пунктирная линия — эмиссионный профиль.

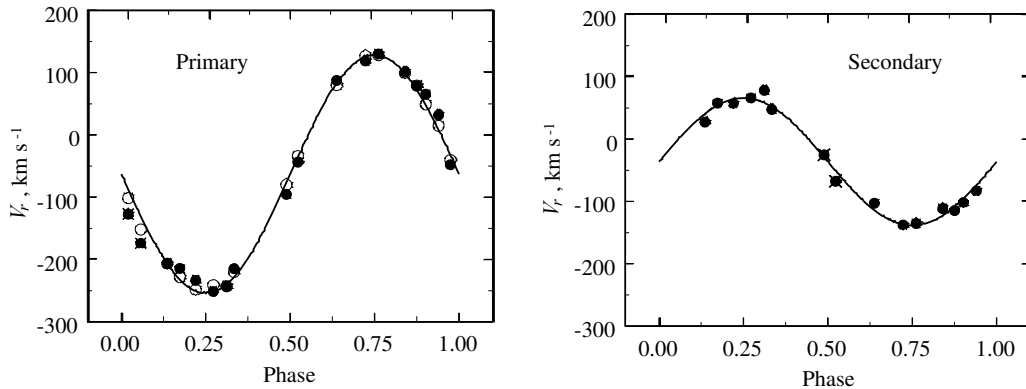


Рис. 4. Кривые лучевых скоростей компонентов UU Cas (сплошные линии): заполненные кружки — лучевые скорости, найденные по линиям He I, незаполненные кружки — по линиям N II, перечеркнутые кружки — данные, исключенные из процедуры определения кривых лучевых скоростей.

Таблица 4. Значения $M \sin(i)$ и проекций больших полуосей орбит компонентов UU Cas

$M_1 \sin^3(i)/M_\odot$	$M_2 \sin^3(i)/M_\odot$	$a_1 \sin(i)/R_\odot$	$a_2 \sin(i)/R_\odot$
7.7 ± 2.3	14.4 ± 2.3	32.0 ± 0.5	17.2 ± 0.4

Таблица 5. Значения масс компонентов и большой полуоси орбиты UU Cas

Источник	i	M_1/M_\odot	M_2/M_\odot	$q = M_2/M_1$	A/R_\odot
Данная работа	69°	9.5 ± 2.1	17.7 ± 2.3	1.85 ± 0.02	52.7 ± 0.5
Полушина [3]	69°	34.5 ± 1.5	25.7 ± 0.6	0.75 ± 0.3	69.0 ± 0.7
Антохина и Кумсиашвили [2]	69°	26.0	23.4	0.8	65.0

тивоположной общепринятой, которая основывалась на результатах решений кривых блеска. Согласно последней, более массивный и яркий компонент заполняет (переполняет) свою полость Роша и поставляет газ ко второму менее массивному и менее яркому компоненту. Система погружена в расширяющуюся газовую оболочку. Локальные скачки блеска, не связанные с затмениями, объяснялись неоднородностями газовой составляющей [3, 5].

Как отмечалось выше (см. Введение), Марков и др. [8] предположили, что второй компонент может быть окружен газовым диском, экранирующим поток от него. Этот вывод они сделали на основе двугорбого вида профиля линии $H\alpha$ на фазе, близкой к минимуму блеска, и плохой проявляемости линий вторичного компонента в спектре UU Cas. Несколько позже Джурасевичем и др. [9] была предложена модель системы с газовым диском.

В свете полученных в настоящей работе данных такая модель кажется вполне соответствующей действительности. Факт наличия геометрически толстого аккреционного диска или более плотной неоднородной газовой составляющей вокруг более массивного, а значит и более горячего компонента и в нашем случае подтверждается слабостью линий нейтрального гелия, принадлежащих ему, и зависимостью их глубин от фазы (см. рис. 3). Наличие газа в полости Роша более массивного компонента, поставляемого с главного и менее массивного компонента через внутреннюю точку Лагранжа L_1 , говорит о том, что система находится в стадии обмена масс. А учитывая полученное соотношение масс компонентов (масса донора в два раза меньше массы аккретора), можно предположить, что процесс идет продолжительное время и находится в установившейся стадии. Это означает, что в системе могут наблюдаться элементы взаимодействия потоков газового вещества при его движении внутри и вовне полостей Роша обоих компонентов, описанные в серии вычислительных работ по трехмерной газодинамике тесных двойных систем, выполненные группой под руководством академика А. А. Боярчука и приведенные в двух монографиях [14] и [15].

Согласно данным трехмерных газодинамических расчетов, внутри полости Роша аккретора посредством переноса массы газа со звезды донора образуется аккреционный диск и газовое гало, которое, ударяясь в струю газа, текущую через точку Лагранжа L_1 внутрь полости Роша звезды аккретора, создает так называемую горячую линию. Взаимодействие гало и диска с набегающим газом общей оболочки приводит к образованию отошедшей ударной волны, в которой газ частично

течет в направлении, обратном орбитальному движению, и через точку Лагранжа L_3 покидает звезду, подпитывая общую расширяющуюся оболочку.

Описанные выше газовые структуры проявляются в полученных спектрах в виде мощной эмиссии в линии водорода $H\alpha$, образующейся из-за переизлучения света обеих звезд газовыми составляющими в направлении наблюдателя. Форма профилей линии изменяется с фазой. В качестве иллюстрации на рис. 5 приведены профили линии $H\alpha$ для четырех ключевых фотометрических фаз вблизи квадратур и минимумов блеска. Для оценки эмиссионной составляющей профили $H\alpha$ были представлены тремя компонентами посредством аппроксимации гауссианами, как это было сделано при аппроксимации линий нейтрального гелия. За начальные положения гауссиан, представляющих абсорбционные компоненты профилей линий водорода, образуемых в фотосферах каждой из звезд системы, были приняты положения линий нейтрального гелия на таких же значениях фаз. Результат аппроксимации также приведен на рис. 5. Как можно заметить, такое чисто формальное представление профилей линий $H\alpha$ тремя гауссианами позволяет получить вполне удовлетворительные приближения наблюдаемых и аппроксимационных профилей. При этом видно, что эмиссионная составляющая имеет широкий профиль, положение которого практически не зависит от фотометрической фазы и близко к скорости барицентра системы. Таким образом, можно сделать предположение, что эмиссионная компонента образуется во всех структурах газовых течений — диске, гало, общей расширяющейся оболочке — и обнаруживается как усредненный результат их совместного действия. Для проведения более детального анализа структуры эмиссионной компоненты необходимо применение метода доплеровской томографии, что выходит за рамки данной работы.

Как отмечалось в предыдущем разделе, эмиссионная составляющая профилей линий гелия достаточно мала и «не мешает» отследить более тонкие проявления отдельных элементов газовой составляющей. На фазах непосредственно перед главным минимумом в профилях линий нейтрального гелия появляется смещенный в красную сторону неглубокий, но явно видимый абсорбционный компонент, синее крыло которого поднято небольшой эмиссией (см. рис. 6). Смещение соответствует лучевой скорости порядка 200 км с^{-1} . С другой стороны, непосредственно после главного минимума (фазы 0.021 и 0.057) профили линий нейтрального гелия, принадлежащие главному компоненту, смещены в синюю сторону относительно фотосферных линий ионизованного азота на величину порядка

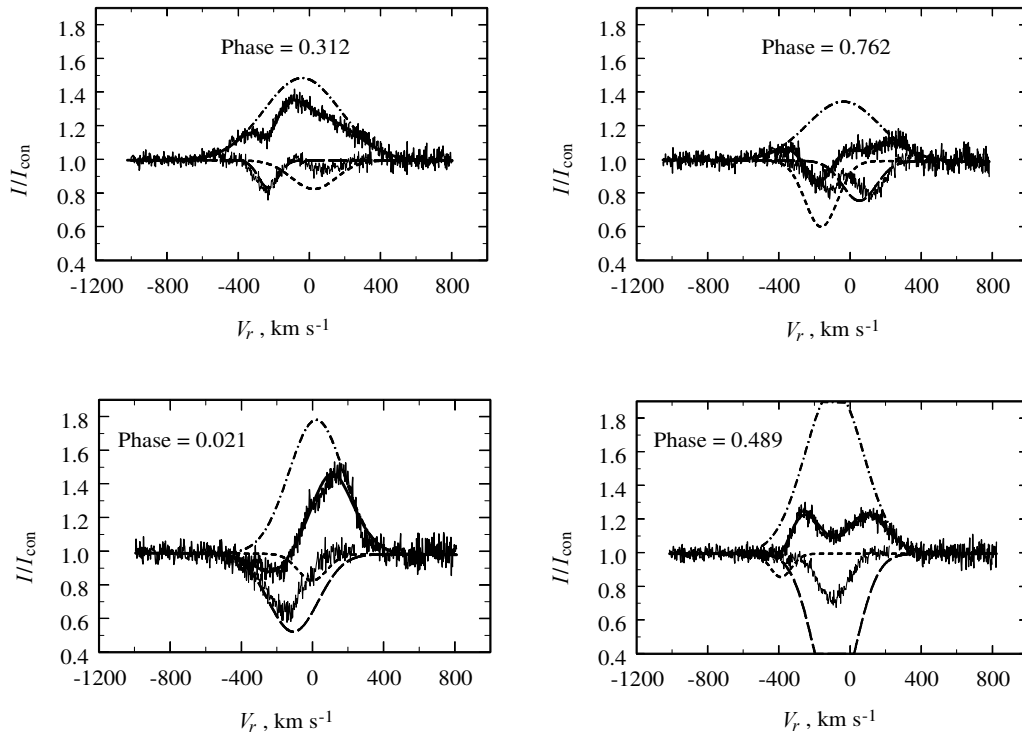


Рис. 5. Аппроксимация профилей линий $H\alpha$ тремя гауссианами, соответствующих одному эмиссионному и двум абсорбционным компонентам; обозначения те же, что и на рис. 3; тонкая сплошная линия — профиль линии $He\ I\ \lambda 5875\ \text{\AA}$ на соответствующих фазах.

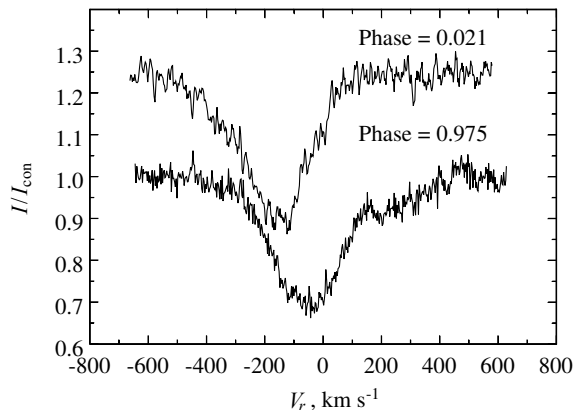


Рис. 6. Вид профилей линии $He\ I\ \lambda 5875\ \text{\AA}$ в районе главного минимума $UU\ Cas$; абсорбционная компонента справа от основного профиля (фаза 0.975) образована предположительно в аккреционном диске.

$-30\ \text{km s}^{-1}$, в шесть раз превышающую ошибку измерения (см. таблицу 1, рис. 4 и рис. 6).

Данные эффекты могут быть проявлениями аккреционного диска, существующего вокруг вторичного компонента $UU\ Cas$. Они связаны с частичной его проекцией со стороны наблюдателя на являющийся гигантом главный, заполняющий свою полость Роша, компонент системы на фазах вблизи

главного затмения. Образование дополнительного абсорбционного компонента в линиях $He\ I$ можно объяснить просвечиванием излучением главной звезды части вращающегося с кеплеровой скоростью диска, проецируемой на нее. На фазах непосредственно перед главным минимумом на главный компонент в основном проектируется часть диска, имеющая скорость от наблюдателя. Это приводит к образованию смещенной в красную область дополнительной абсорбционной компоненты. После главного минимума наблюдается обратная ситуация. Абсорбционная компонента диска, накладываясь на профиль линии $He\ I$, образованной в фотосфере звезды и имеющей на данной фазе уже отрицательную скорость, смещает ее дополнительно в синюю сторону. Эффект может усиливаться еще и смещенной в синюю сторону компонентой, которая образуется в струе газа, текущей на данной фазе в сторону наблюдателя через точку L_1 и проецирующейся на звезду донор.

Еще одним моментом, требующим обсуждения, является достаточно большая разность скоростей барицентра системы $\Delta V_0 \sim 24\ \text{km s}^{-1}$, полученных по лучевым скоростям главного и вторичного компонентов $UU\ Cas$. За верное значение скорости барицентра системы без сомнения следует принять величину $V_0 = -60.7\ \text{km s}^{-1}$, найденную по

лучевым скоростям главного, не окруженного аккреционным диском, компонента (см. таблицу 3). Гораздо меньшее значение $V_0 = -36.2 \text{ км с}^{-1}$, полученное по лучевым скоростям вторичного компонента UU Cas, можно объяснить влиянием газовых составляющих на формирование профилей линий гелия посредством экранирования или высвечивания излучения, идущего от разных частей диска, окружающего эту звезду. Так, например, на фазах в районе второй квадратуры излучение горячей линии могло привести к смещению положения центра яркости видимого диска вторичного компонента в сторону барицентра системы. В результате положение центра профиля линии, сформированного от всей поверхности звезды, могло сместиться в сторону меньших абсолютных значений лучевых скоростей (более положительных величин). Это в свою очередь могло привести к уменьшению значения полуамплитуды соответствующей кривой лучевых скоростей и более положительному значению V_0 .

Анализ спектров UU Cas, полученных с большим спектральным разрешением с использованием более крупных телескопов, может помочь в уточнении массы вторичного компонента посредством более детального изучения структуры профилей линий нейтрального гелия и водорода. Вполне вероятно, что найденное в этом случае значение отношения масс компонентов $q = M_1/M_2$ может оказаться на 10–20% больше.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного спектрального исследования затменной переменной UU Cas впервые были построены кривые лучевых скоростей обоих компонентов этой ТДС. На основе полученных значений масс компонентов показано, что система не является такой массивной, как считалось ранее, исходя из данных фотографической спектроскопии и анализа кривых блеска. Соотношение масс компонентов, полученное в данной работе, оказалось прямо противоположным тому, что определялось по фотометрическим данным. А именно, более горячий, заполняющий свою полость Роша, главный компонент имеет вдвое меньшую массу, чем менее яркий вторичный. Это обстоятельство значительно изменяет взгляд на эволюционный статус системы UU Cas. По всей видимости она находится в приближающейся к завершению стадии перемены ролей. На это обстоятельство указывает наличие общей расширяющейся оболочки, проявляющейся в значительной эмиссии в линии $\text{H}\alpha$, а также существование аккреционного диска, обнаруживаемого в появлении дополнительной компоненты в линиях нейтрального гелия на фазах главного минимума.

Для более детального анализа элементов газовых структур, уточнения отношения масс компонентов UU Cas, а также ее эволюционного статуса, необходимо проведение спектральных исследований с разрешением порядка $R = 30\,000$ и более на телескопах с диаметром больше метра. Полученные результаты в совокупности с новыми высокоточными фотометрическими данными позволяют уточнить параметры компонентов UU Cas при совместном решении кривых блеска и кривых лучевых скоростей.

БЛАГОДАРНОСТИ

Часть работ проведена при финансовой поддержке государства в лице Министерства образования и науки Российской Федерации (базовая часть гос. задания, РК АААА-А17-117030310283-7), а также при финансовой поддержке постановления 211 Правительства Российской Федерации, контракт 02.А03.21.0006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. F. Sanford, *Astrophys. J.* **79**, 84 (1934).
2. E. A. Antokhina and M. I. Kumsiashvili, *Sov. Astron.* **36**, 25 (1992).
3. T. S. Polushina, *Astronomy Reports* **46**, 900 (2002).
4. P. P. Parenago and B. V. Kukarkin, *Peremen. Zvezdy* **5**, 287 (1940).
5. M. I. Kumsiashvili and K. B. Chargeishvili, arXiv:0907.1047 (2009).
6. N. Martin, *Astron. and Astrophys.* **17**, 253 (1972).
7. H. Markov, I. Vince, N. Markova, and G. Djurasevic, *Publications de l'Observatoire Astronomique de Beograd* **90**, 159 (2010).
8. H. Markov, N. Markova, I. Vince, and G. Jurasevich, *Bulgarian Astronomical Journal* **15**, 87 (2011).
9. G. R. Djurašević, I. Vince, and O. Atanacković, *ASP Conf. Ser.* **435**, 301 (2010).
10. V. E. Panchuk, M. V. Yushkin, and M. V. Yakopov, *Astrophysical Bulletin* **66**, 355 (2011).
11. V. V. Krushinsky, A. A. Popov, and A. F. Punanova, *Astrophysical Bulletin* **69**, 497 (2014).
12. S. Y. Gorda, P. E. Zakharova, V. V. Krushinskii, and E. D. Kuznetsov, in *40th Student Sci. Conf. on Physics of Space* (Ural Federal University, Ekaterinburg, 2011), p. 110.
13. G. A. Galazutdinov, Preprint of the Special Astrophysical Obs. RAS N92, (Nizhnii Arkhyz, 1992).
14. A. A. Boyarchuk, D. V. Bisikalo, O. A. Kuznetsov, and V. M. Chechetkin, *Mass transfer in close binary stars* (2002).
15. D. V. Bisikalo and A. G. Zhilkin, *Gazodinamika tesnykh dvoynykh system* (FIZMATLIT, Moscow, 2013).

Eclipsing Binary UU Cas: Radial-Velocity Curves

S. Yu. Gorda

This paper reports the results of spectroscopic observations of UU Cas obtained with the high-resolution ($R = 15\,000$) fiber-fed echelle spectrometer of the 1.2-m telescope of Kourovka Astronomical Observatory of Ural Federal University. The radial velocities of the secondary, more massive and fainter component are measured for the first time. The component mass ratio is found to be $q = M_1/M_2 = 0.54$. The component masses, $M_1 = 9.5M_\odot$ and $M_2 = 17.7M_\odot$, and the radius of the orbit, $A = 52.7R_\odot$, are computed for the published orbital inclination of $i \simeq 69^\circ$. Evidence is presented for a disk surrounding the more massive component and a common expanding envelope.

Keywords: *binaries: eclipsing—binaries: close—stars: individual: UU Cas*