АСТРОФИЗИКА

TOM 57

МАЙ, 2014

выпуск 2

ВРАЩЕНИЕ ЛИНИИ АПСИД В ЗАТМЕННОЙ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЕ GSC 4487 0347 = V 957 СЕР

В.С.КОЗЫРЕВА¹, А.В.КУСАКИН² Поступила 3 декабря 2013 Принята к печати 19 февраля 2014

В 2009-2013гг. нами были проведены высокоточные ПЗС-наблюдения затменной двойной звезды GSC 4487 0347, получены кривые блеска. Вычислены фотометрические параметры и элементы орбиты, эфемериды главного и вторичного минимумов. Углы долготы периастра орбиты, полученные для разных наблюдалельных сезонов, позволили вычислить скорость вращения линии апсид: $\phi = 2.28 \pm 0.04^\circ$ год. Она оказалась в 1.5 раза быстрее, чем теоретическое значение, вычисленное для основного времени жизни звезд - компонентов (B8V+B9V) на Главной последовательности. Либо мы действительно застали звезды на кратком участке жизни вступления на Главную последовательность, либо на скорость вращения линии апсид влияет третье тело, по-видимому, присутствующее в системе, о чем в решении кривых блеска свидетельствует "третий" свет ($L_1 \approx 10\%$ от блеска всей системы).

Ключевые слова: затменные-переменные звезды: фотометрические элементы: вращение линии ancud

1. Введение. Звезда GSC 4487 0347 ($\alpha_{2000} = 23^{h}46^{m}10^{s}.45$, $\delta_{2000} = +71^{o}29'55'.3$, $P = 1^{d}.98873$) была открыта как затменно-переменная система более 10 лет назад на основе анализа данных NSVS-обзора переменных звезд северного неба [1]. Звезда вошла в список "50 новых затменных звезд с эллиптическими орбитами, найденными в базе данных ASAS. Ніррагсов и NSVS" [2].

Мы получили наблюдения кривых блеска этой звезды на Тянь-Шаньской астрономической обсерватории на телескопе системы Риче-Кретьен -350 с ПЗС матрицей ST -402 в фильтре *V* в 2009 и 2011гг. Был проведен анализ полученных наблюдений, результаты опубликованы в [3].

На Тянь-Шаньской астрономической обсерватории в августе 2013г. на телескопе Цейсс-1000, который был вновь введен в строй после почти 20летнего перерыва, с помощью ПЗС-матрицы Ародее 49000D9 нами были получены кривые блеска этой звезды в фильтрах B, V, R. Эти результаты позволили вычислить параметр k_{2} , отвечающий за внутреннее строение звезд в этой системе, и сравнить сго с теоретическим значением.

2. Наблюдения и анализ. В качестве звезд сравнения при анализе ПЗС-кривых блеска всех фотометрических наблюдений использовались две соседние звезды: GSC 4487 0499 (c1) и GSC 4487 0225 (c2). В

пределах точности измерений ($\sigma_{obs} = 0^m 01$) переменности блеска этих звезд во время наблюдений обнаружено не было.

Таблица 1

Звезда	В	V	R	
GSC4487-0347	11 ^m .51±0.02	11 ^m .20±0.01	11 ^{**} .03 ± 0.02	
Главный ком.	12 ^m .05±0.03	11 ^m .73±0.03	11 ^{**} .60 ± 0.03	
Вторичный ком.	12 ^m .89±0.03	12 ^m .53±0.03	12 ^{**} .38 ± 0.03	
Третий ком.	13 ^m .88±0.05	13 ^m .82±0.05	13 ^{**} .35 ± 0.05	

ВЕЛИЧИНЫ GSC 4487 0347 В ФИЛЬТРАХ В, V, R

На расстоянии 3".5 к югу от исследуемой звезды имеется звезда соседка [3]. Своего идентификационного номера ни в одном каталоге она не имеет. На изображениях, полученных в 2009-2011гг. на Тянь-Шаньской обсерватории, звезды сливались. Д.Менке в Барнесвиле на 18-дюймовом телескопе в 2009г. измерил расстояния между звездами, но надежно разделить их на компоненты не удалось из-за разрешающей силы аппаратуры, которая использовалась в наблюдениях.

В 2013г. на телескопе Цейсс-1000 была получена светимость каждого компонента отдельно. Светимость оптического компонента оказалась совсем небольшой по сравнению с затменной двойной звездой: 0.5% в "В", 1% в "V" и 1.5% в "R"от общей светимости системы.

При решении кривой блеска (табл.2) с целью получения фотометрических

Таблица 2

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ GSC 4487 0347, ПОЛУЧЕННЫЕ ИЗ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ 2009, 2011, 2013гг. В ФИЛЬТРЕ V

Элемент	2009	2011	2013	
<i>r</i> ,	0.199 ± 0.005	0.199(фикс.)	0.199(фикс.)	
r,	0.151 ± 0.005	0.151(фикс.)	0.151(фикс.).	
- î	86°.1 ± 0°.4	86°.1(фикс.)	86°.1(фикс.)	
e	0.131 ± 0.005	0.131(фикс.)	0.131(фикс.)	
œ	336°.0 ± 0°.3	340°.5±0°.5	$344^{\circ}.4 \pm 0^{\circ}.4$	
L_1	0.615 ± 0.020	0.613±0.025	0.617 ± 0.030	
L,	0.293 ± 0.020	0.294 ± 0.025	0.290 ± 0.030	
L_1	0.090 ± 0.020	0.085 ± 0.020	0.090 ± 0.020	
<i>u</i> ₁	0.43(фикс)	0.43(фикс.)	[•] 0.43(фикс.)	
и,	0.45(фикс.)	0.45(фикс.)	0.45(фикс.)	
φ,,	0°.5764 ± 0.0005	0°.5788±0.0005	0°.5805 ± 0.0005	
L_1/L_2	0.476 ± 0.015	0.480 ± 0.015	0.470 ± 0.015	
I_1/I_2	0.83 ± 0.04	0.83 ± 0.04	0.82 ± 0.04	
oo-c	0".0082	0 ^m .0120 ± 0.02	0 ^m .0075	

элементов кроме светимостей главной и вторичной звезды получается еще одна светимость - "третий свет", L_3 , которая составляет 9% в фильтре V. Эта светимость, обнаруженная при решении кривой блеска, соответствует звезде (или нескольким звездам), которая на 2^m.5 слабее суммы компонентов затменной двойной. С очень большой вероятностью это - третья звезда в системе, гравитационно связанная с затменными компонентами, но уверенно сказать об этом можно будет только, если в системе обнаружится световое уравнение.

В сентябре 2010 на Тянь-Шаньской обсерватории были проведены наблюдения затменно-переменной вместе с оптическим компонентом вне минимумов и получены *B*, *V*, *R*-величины в системе *WBVR*. В качестве стандарта взята звезда HD 222958 из *WBVR*-каталога [4]. В табл.1 в первой строчке даны величины затменно-переменной звезды без оптического компонента, поправки в величины внесены на основе наблюдений 2013г.

Показатель цвета для звезды получается равным: $B - V = 0^{m}.31$. При оценке спектрального класса эта величина дает ограничение со стороны поздних классов. Область неба, где находится звезда, близко расположена к диску Галактики (галактическая широта 9°), поглощение в этом направлении большое, так что звезды могут быть как спектральных классов F3-F5, так и B8-B9.

Как было указано в предыдущей работе [3], спектрофотометрические наблюдения для этой звезды были выполнены Д.Менке в Барнесвиле на 18дюймовом телескопе системы Ньютона. Из-за небольшого диаметра зеркала эти спектры имеют низкое разрешение (дисперсия ≥ 7Å/пик.). Линии двух компонентов на спектрах не разделяются. Методы определения спектральных классов, основанные на отношении полуширины линий в данном случае не применимы, но выбрать спектральный диапазон звезд все же можно.

На рис.1. показана регистрограмма спектра звезды, полученная после обработки, в сравнении со стандартными спектрами звезд различных спектральных классов [5]. По оси ординат приведена относительная шкала, графики нормированы друг к другу по максимуму интенсивности и, для наглядности, смещены относительно друг друга. Здесь приведены стандартные спектры для спектрального класса F5V - верхний график, для B9V - средний график и спектр нашей звезды - нижний график. По наклону спектра, по ширине и глубине бальмеровских линий, а также, по, практически, полному отсутствию каких-либо других линий и полос в спектрах, можно утверждать, что звезда имеет компоненты, которые принадлежат спектральному диапазону B9V, а не более поздним спектральным классам.

Для поиска фотометрических параметров и элементов орбиты нами использовалась модель двух сферических звезд с линейным законом потемнения к краю, движущихся вокруг общего центра по эллиптическим орбитам.

В.С.КОЗЫРЕВА. А.В.КУСАКИН

В качестве минимизирующего алгоритма применялся квазиньютоновский метод с аналитическими вычислениями производных функционала [6]. В минимизирующий функционал входит сумма квадратов разности наблюдаемой и теоретической звездных величин в каждой точке, включая простые и



Рис.1. Регистрограмма спектра GSC 4513 2537 вне минимумов (нижняя кривая). Теоретические кривые для стандартных спектров [5] В9V - верхняя кривая и F5V - средняя кривая.

линейные ограничения на искомые параметры. Влияние коэффициентов потемнения к краю, u_1 и u_2 , на блеск системы проявляется на участках кривой блеска, непосредственно прилегающих к точкам касания дисков звезд. Опыт вычисления элементов показал, что из-за слабого влияния этих параметров на кривую блеска, их достоверное определение возможно только из наблюдений, полученных с высокой точностью ($\sigma_{O-C} \le 0^m.005$) и обладающих необходимой полнотой в указанных участках кривой блеска. Точность кривых блеска исследуемой системы ниже этой величины, поэтому мы не варьировали коэффициенты потемнения, а фиксировали их в соответствие с принятым нами спектральным классом звезд-компонент (B8V + B9V - см. ниже), взяв их теоретические значения u_1 и u_2 [7].

Несимметричность минимумов кривых блеска с эксцентричными орбитами, физические флуктуации блеска и ошибки измерений приволят к тому, что использование разных методов определения моментов минимумов дает отличающийся результат. В нашей методике в качестве момента минимума принимаются соединения звезд, т.е. такие положения, при которых проецированные на картинную плоскость расстояния между центрами компонент системы становятся минимальными. При определении моментов соединений мы использовали всю совокупность измерений минимумов и добавляли дополнительную информацию из решения других кривых блеска, предполагая неизменность некоторых геометрических элементов. Такая методика, по нашему мнению, позволяет определить моменты соединений с большей точностью, чем в случае, когда моменты минимумов блеска получаются с использованием только точек кривой блеска индивидуального минимума блеска. Отметим, что при решении индивидуальных кривых блеска (часто неполных) нет необхолимости искать все фотометрические элементы, поэтому некоторые из них можно закрепить в соответствии с результатами решения наиболее полной и точной кривой блеска данной затменной звезды.

Только для полосы V имеется полная кривая блеска, полученная нами в 2009г. (рис.2). В соответствии с этим решением были закреплены относительные радиусы компонент (r_1 , r_2), наклонение орбиты (i), эксцентриситет (e), начальная долгота периастра (ω_0). Наблюдения 2011 и 2013гг., к сожалению, имеют неполные кривые блеска внутри всех минимумов, поэтому их нецелесообразно использовать для свободного поиска элементов из-за того, что могут появиться систематические ошибки



Рис.2. Кривая блеска GSC 4487 0347 в фильтре V, полученная в 2009г., величина O - C со сдвигом на 0°.6 относительно "0" дана для элементов табл.2 (2 столбец).

в их определении. Вышеописанная методика дает надежный результат для свободного поиска моментов соединения главных минимумов(T_1), долготы периастра (ω), а также относительных светимостей звезд (L_1 , L_2 и L_3).

Решения для кривых блеска 2009, 2011 и 2013гг. в фильтре *V* приведены в табл.2. В 2013г. фотометрические ПЗС-наблюдения проводились в трех фильтрах *B. V, R.* На рис.3 показана кривая блеска в фильтре *V.* В табл.3 приведены полученные решения для этих кривых. Исходя из полученных светимостей, для каждого компонента вычислены *B, V, R* - величины звезд-компонентов (табл.1).

Цвета B - V обоих компонентов оказались очень близки: $(B - V) = 0^{\circ}.32 \pm$

 $\pm 0^{m}.02$ и $(B - V)_{2} = 0^{m}.36 \pm 0^{m}.02$. Исходя из равенства межзвездного поглошения и расстояния до компонентов, получаем, что очень вероятными кандидатами являются звезды близких спектральных классов B8V \pm B9V с температурами: $T_{1} + T_{2} = 11000 \text{ K} + 10200 \text{ K}$, с межзвездным поглощением в фильтре V, равным $A_{1} = 1^{m}.54$, расположенные на расстоянии r = 1.5 кпк.

Среднее значение величины долготы периастра для кривых 2013г. в полосах *B*, *V*, *R* равно: $\omega = 345^{\circ}.1 \pm 0^{\circ}.5$.

Скорость изменения долготы периастра с 2009 по 2013гг. по данным табл.2 равна: Фора = 2.28±0.04° /год. Наблюдения 2013г. с очень хорошей





Таблица 3

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ GSC 4487 0347, ПОЛУЧЕННЫЕ ИЗ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ 2013г. В ФИЛЬТРАХ *B*, *V*, *R*

Элемент	В	V	R
<i>r</i> ,	0.199(фикс.)	0.199(фикс.)	0.199(фикс.)
<i>r</i> ,	0.151(фикс.)	0.151(фикс.)	0.151(фикс.)
Î	86°.1(фикс.)	86°.1(фикс.)	86°.1(фикс.)
e	0.131(фикс.)	0.131(фикс.)	0.131(фикс.)
۵	345°.5±0°.5	344°.4±0°.5	345°.4±0°.5
L,	0.606 ± 0.025	0.617±0.025	0.594 ± 0.030
<i>L</i> ,	0.281 ± 0.025	0.290 ± 0.025	0.287 ± 0.030
L_1	0.11 ± 0.03	0.09 ± 0.03	0.12 ± 0.03
<i>u</i> ₁	0.50(фикс.)	0.43(фикс.)	0.38(фикс.)
и,	0.52(фикс.)	0.45(фикс.)	0.41(фикс.)
oo-c	0ª.0124	0".0075	0.0070

точностью подтвердили результат, полученный из наблюдений 2009-2011гг.: форма = 2.26±0.08°/год [3].

3. Сравнение теоретических и наблюдаем их параметров внутреннего строения звезд. Момент (T₁), главного минимума определялся одновременно с другими элементами при решении кривой блеска. Моменты соединений для вторичных минимумов (T₂) посчитаны из известного соотношения Копала [8] в предположении постоянства скорости изменения долготы периастра (ω) с элементами, полученными при фотометрическом решении:

$$T_{2} = T_{1} + \frac{P}{2} + \frac{2Pe\cos\omega}{\pi} - \frac{2Pe^{3}\left(1 + 3\sqrt{1 - e^{2}}\right)}{3\pi\left(1 + \sqrt{1 - e^{2}}\right)^{3}}\cos\omega + \dots$$
(1)

Моменты соединений (T_1 и T_2) для наблюдений 2009, 2011 и 2013гг. представлены в табл.4. Там же даны и моменты минимумов, опубликованные в работах [2] и [10]. Для иллюстрации поведения минимумов со временем величины T_1 и T_2 представлены как линейные зависимости ($O-C^I$) от времени, вычисленные методом наименьших квадратов (рис.4). O - наблю-Таблица 4

ГЕЛИОЦЕНТРИЧЕСКИЕ МОМЕНТЫ МИНИМУМОВ ГЛАВНОГО (I) И ВТОРИЧНОГО (II) МИНИМУМОВ GSC 4487 0347

JD _☉ 2400000+	0-C'	0-C"	Min	Авторы
51504 ⁴ .666	0.0020	-0.0028	I	Отеро и др. [2]
54710.4925	-0.0140	-0.0019	Ι	Брат и др. [10]
55122.1578	-0.0170	-0.0034	Ι	Козырева и др. [3]
55806.2827	-0.0173	-0.0014	Ι	Козырева и др. [3]
56536.1521	-0.0140	0.0038	I	Настоящая работа
51505.7797	0.0003	0.0023	Π	Отеро и др. [2]
54741.4657	0.0128	-0.0021	II	Брат и др. [10]
55121.3150	0.0135	-0.0028	II	Козырева и др. [3]
55819.3656	0.0178	-0.0009	II .	Козырева и др. [3]
56533.3261	0.0221	0.0015	II	Настоящая работа

даемые моменты минимумов (табл.4, первый столбец), C¹ - теоретические моменты, вычисленные с одинаковыми орбитальными периодами для обоих минимумов:

$$C_1^{I} = 2451502^{d}.6753 + 1^{d}.988736 \cdot E,$$

$$C_2^{I} = 2451503^{d}.7907 + 1^{d}.988736 \cdot E.$$
(2)

Из-за довольно большой скорости вращения орбиты периоды главного и вторичного минимума заметно меняются даже на протяжении наших

В С КОЗЫРЕВА, А.В.КУСАКИН



Рис.4. О - С' как функция времени ("точки" - для главных минимумов и "кружки" - для вторичных минимумов). О - наблюдаемые значения моментов минимумов (табл.4, первый столбец). С' - вычисленные с помощью эфемерид (2) моменты минимумов. Прямыми линиями показана линейная зависимость, вычисленная с помощью метода наименьщих квадратов, соответственно для О - С' и О - С^и.

наблюдений, поэтому для вычисления эфемерид воспользуемся формулой из работы Мартынова [9]:

Minf, II =
$$E 0 + P \cdot E \mp \frac{Pe}{2\pi} \cdot (1 + \csc^2 i) \cdot (\cos\omega_0 + \omega \cdot E).$$
 (3)

Получаем:

 $MinI = C_1^{II} = 2455122^d \cdot 2370(2) + 1^d \cdot 988736(2) - 0^d \cdot 083 \cdot \cos(340^\circ \cdot 5 + 0^\circ \cdot 0122 \cdot E).$ $MinII = C_2^{II} = 2455122^d \cdot 2420(2) + 1^d \cdot 988736(2) + 0^d \cdot 083 \cdot \cos(340^\circ \cdot 5 + 0^\circ \cdot 0122 \cdot E).$ (4)

Значения $O-C^{T}$ и $O-C^{T}$ приведены в табл.4. За исключением минимумов, соответствующих самым первым наблюдениям этой звезды, наблюдаются систематические синхронные отклонения разности $O-C_{1}^{T}$ и $O-C_{2}^{T}$ (рис.5). Если это подтвердится последующими наблюдениями, т.е. в системе обнаружится световое уравнение, это будет означать, что в системе есть третье тело со светимостью, равной L_{1} (табл.2, 3).

Используя полученные элементы из решения (табл. 2), а также скорость врашения орбиты, можно получить коэффициент $k_{,}$, который отвечает за концентрацию вещества к центру звезд, и сравнить его с теоретическими значениями [11]. Средневзвешанная величина $k_{,}$ для звезд-компонент равна: $k_{,} = 0.0044 \pm 0.0005$. Таблицы теоретических эволюционных треков для звезд В8V + В9V показывают такие же величины $k_{,}$ для краткого периода раннего возраста звезд (150 ± 20 млн лет), когда они только начинают жить на стадии Главной последовательности. Время жизни звезды с такими пара-

244

ВРАЩЕНИЕ ЛИНИИ АПСИД

метрами k_2 очень непродолжительное по сравнению с основным временем жизни звезды на Главной последовательности и характеризуется довольно быстрыми изменениями параметров. Теоретическая величина k_2 , посчитанная для основного времени пребывания этих звезд на Главной последовательности, в 1.5 раза меньше полученной нами из наблюдений.



Рис.5. О - С^и как функция времени ("точки" - для главных минимумов и "кружки" - для вторичных минимумов), О - наблюдаемые значения моментов минимумов (табл.4, первый столбец), С^и - вычисленные с помощью эфемерид (4) моменты минимумов.

4. Заключение. Мы исследовали затменно-переменную звезду GSC 4487 0347. Удалось получить высокоточные фотоэлектрические кривые блеска внутри минимумов и вычислить фотометрические элементы, а также получить *BVR*-величины звезды вне минимумов путем привязки ее к фотометрическому стандарту. Получена светимость компонентов в *B*, *V*, *R*-фильтрах. На основе этого и спектральных наблюдений звезды мы оценили спектральный класс компонентов (B8V+B9V).

Была получена скорость вращения линии апсид и найден средневзвешанный параметр внутреннего строения звезд k_2 . Для звезд этих спектральных классов теория показывает, что такой параметр соответствует краткому периоду в жизни звезды, начальному моменту вступления на Главную последовательность. Другим объяснением такого быстрого вращения линии апсид, например, может быть влияние на орбиту затменно двойной третьего тела в системе. Свидетельство в пользу присутствыя в системе третьего тела является наличие "третьего света" среди фотометрических элементов ($L_3 \approx 10\%$) и синхронные отклонения $O-C^{II}$ для моментов главного и вторичного минимумов (табл.4, 3 столбец).

Мы благодарим М.А.Кругова за огромную работу в запуске телескопа Цейсс-1000 и предоставленное техническое оборудование, А.И.Захарова,

С.Е.Леонтьева за помощь в разработке компьютерных программ, Н.П.Иконникову и А.С.Додина за консультации в поисках спектров звезд.

- ¹ Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга, Москва, Россия, e-mail: valiakozyreva@gmail.com
- Национальное космическое агентство Казахстан, Астрономический институт им. В.Г.Фесенкова, Алматы, Казахстан; e-mail: un7gbd@gmail.com

APSIDAL MOTION OF THE ECLIPSING BINARY GSC 4487 0347 = V 957 CEP

V.S.KOZYREVA¹, A.V.KUSAKIN²

We carried out CCD - observations of the eclipsing-binary GSC 4487 0347 in 2009-2013. The photometric parameters, the elements of orbit and the ephemerides are derived from the light curves. The values of the longitude of the periastron allowed to calculate the apsidal motions: $\omega_{obs} = 2.28 \pm 0.04^{\circ}$ /year. It occur to 1.5 times greater than the value obtained from theoretical calculations for the stars (B8V + B9V) on basic ZAMS-lifetime. It means that either we really caught the stars on the short interval of life to entry on ZAMS, or the speed of apsidal motion due to a third body appears to be present in the system. A "third " light ($L_3 \approx 10\%$ from the total luminosity of the system) is present in the solution of photometric parameters.

Key words: eclipsing-binary systems: photometric elements: apsidal motion

ЛИТЕРАТУРА

- 1. P.R. Wozniak, W.T. Vestrand, C.W. Akerlof et al., Northern Sky Variability Survey: Public Data Release, Astron. J., 27, 2436, 2004.
- 2. S.A.Otero, R.Wils, G.Hoogeveen, P.A.Dubovsky, Inf. Bul. Var. Stars, 5681, 1, 2006.
- 3. V.S.Kozyreva, A.V.Kusakin, J.Menke, Inf. Bul. Var. Stars, 6020, 1, 2012.
- 4. В.Г.Корнилов, И.М.Волков, А.И.Захаров и др., Каталог WBVR-звезд северного неба в Трудах Астрономического института им. Штернберга, 63, 1991.
- 5. A.Pickles, Publ. Astron. Soc. Pacif., 110, 863, 1998.

ВРАЩЕНИЕ ЛИНИИ АПСИД

- 6. P.E.Gill, W.Murray, Math. Program., 14, 349, 1978.
- 7. W. Van Hamme, Astron. J., 106, 2096, 1993.
- 8. Z. Kopal, Dynamics of Close Binary, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, Holland, p.201, 1978.
- 9. D.Ya. Martynov, in V.P.Tsesevich (ed), Eclipsing Variable Stars, John Wiley and Sons, New York, p.328, 1973.
- 10. L.Brat, L.Smlcer, H.Kusakova et al., Open Europ. Jour. Var., 94, 1, 2008.
- 11. A. Claret, A. Gimenez, Astron. Astrophys., 287, 487, 1973.

