СПЕКТРАЛЬНЫЕ И СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ КРАТНОЙ СИСТЕМЫ ADS 11061

М. Аль-Вардат[1], Ю. Ю. Балега[1], В. В. Леушин[1], Ф. А. Мусаев[1,2]

[1] *Специальная астрофизическая обсерватория РАН*
пос. Нижний Архыз, Зеленчукский район, 369167 Карачаево–Черкесская Республика, Россия
e-mail: balega@sao.ru, leushin@sci.lebedev.ru

[2] *Международный центр астрономических и медико-экологических исследований*

Приведены некоторые результаты спекл-интерферометрических и спектроскопических наблюдений иерархической системы ADS 11061, включающей двойную 41 Dra с очень большим эксцентрисиьтетом (e = 0.9755). Наблюдения проводились с 1993 г. и в период прохождения периастра в июне 2001 г. Материал наблюдений с высоким разрешением был получен на 6-м телескопе БТА САО, 1-м телескопе САО и 2-м телескопе обсерватории Терскол.

SPECTROSCOPIC AND SPECKLE-INTERFEROMETRIC OBSERVATIONS OF THE MULTIPLE SYSTEM ADS 11061, by Al-Wardat M., Balega Yu. Yu., Leushin V. V., Musaev F. A. – Binary star 41 Dra is a member of the hierarchical quadruple system ADS 11061 which includes 41 Dra with a very big eccentricity (e = 0.9755). Since 1993 we have performed speckle interferometric observations of the system using the 6-m BTA telescope. In addition, high-resolution spectroscopy of the system was made with the echelle spectrographs of the SAO 1-m telescope and the Terskol 2-m telescope. The observations covered the periastron passage in June 2001.

Проблема влияния на эволюцию динамического взаимодействия компонентов двойной системы в период до заполнения одним из компонентов полости Роша изучена мало. Причиной этого является сравнительная малость эффектов этого взаимодействия в системах. Циркуляризация орбит, синхронизация и рассинхронизация вращения, сохранение и потеря моментов вращения определяются как фундаментальными параметрами компонентов и характеристиками орбит, так и структурой самих компонентов. Непосредственное заключение о структурах звезд, распределении масс по радиусу, дифференциальном вращении можно сделать на основе детального анализа эволюционных изменений орбит компонентов. Кажется вероятным, что изучение двойных звезд с большими экцентриситетами орбит, в которых динамическое взаимодействие может изменяться в зависимости от положения компонентов на орбите могут дать практическую информацию о природе эволюционных процессов, обусловленных кратностью звезды.

Среди кратных систем с большими значениями эксцентриситета 41 Dra (= HR 6810 = HD 166866 = ADS 11061 A) является выдающимся представителем таких звезд. 41 Dra входит в визуально-двойную ADS 11061, которая является иерархической четверной системой из компонентов A (41 Dra) и B (40 Dra), разделенных 19$''$. Компоненты A и B являются спектрально-двойной с двумя системами линий и периодами 1247.2 и 10.5 сут [4]. Короткопериодическая двойная Bab (40 Dra) слишком тесна для разделения с 6-м апертурой, тогда как более яркая пара Aab (41 Dra) является хорошим объектом для спекл-измерений.

41 Dra разрешается спекл-интерферометрически, это позволяет существенно уточнить параметры орбит и компонентов системы. Период орбитального движения спектрально- и спекл-интерферометрической двойной 41 Dra равен 3.4147 г., ближайшее прохождение периастра наблюдается в 2001 г.

Первые наблюдения на БТА двойной 41 Dra состоялись в мае 1993 г. Полгода спустя новые измерения подтвердили двойственность изображения звезды и показали, что угловое расстояние между компонентами сокращается. В 1994 г. наблюдения были продолжены со спекл-камерой Боннского Института радиоастрономии [5] в красном 656/30 нм фильтре. В 1996 г. спекл-изображения 41 Dra были получены в K-полосе (фильтр 2191/411 нм) с помощью 256^2-элементной камеры NICMOS-3. Разница величин на λ = 650 нм, оцененная по восстановленному изображению, равна 0.38 ± 0.05^m. В инфракрасной области (фильтр 2129/411 нм) разность блеска 0.47 ± 0.10^m. По значениям элементов P, T, e из опубликованной спектральной орбиты [4] и нашим спекл-измерениям следовало, что в июне 2001 г. компоненты системы будут проходить периастр.

Для того чтобы оценить эффекты сближения компонентов, в САО РАН были проведены комплексные наблюдения 41 Dra до и после прохождения периастра. На основе спектральных и спекл-интерферометрических наблюдений в ноябре–декабре 2000 г. и январе–июне 2001 г. были уточнены параметры орбиты системы:

Элементы орбиты 41 Dra:

$$
\begin{aligned}
&P = 3.412539 \pm 0.00556 \text{ г.},\\
&T = 1994.595661 \pm 0.000061 \text{ г.},\\
&e = 0.975517 \pm 0.000308,\\
&a = 0.0656 \pm 0.0044,\\
&\Omega = 5.02 \pm 4.30^\circ,\\
&\omega = 128.2646 \pm 0.497^\circ,\\
&i = 46.5 \pm 4.09^\circ,\\
&K_1 = 44.854192 \pm 0.357 \text{ км/с},\\
&K_2 = 47.527499 \pm 0.445 \text{ км/с},\\
&V_0 = 6.155086 \pm 0.124 \text{ км/с}.
\end{aligned}
$$

Ниже приведены эфемериды вблизи периастра:

Дата	Время	V_{ra}, км/с	V_{rb}, км/с	θ	ρ	Дата	Время	V_{ra}, км/с	V_{rb}, км/с	θ	ρ
26.05.2001	2001.400	20.7	–9.4	348.1°	0.020″	14.06.2001	2001.450	9.1	2.9	44.9°	0.002″
31.05.2001	2001.413	21.7	–10.4	351.0	0.017	14.06.2001	2001.452	–21.0	34.8	95.0	0.001
31.05.2001	2001.414	21.7	–10.5	351.3	0.016	15.06.2001	2001.453	–47.3	62.6	138.6	0.001
03.06.2001	2001.420	22.3	–11.1	353.1	0.015	15.06.2001	2001.454	–63.9	80.1	171.5	0.002
04.06.2001	2001.423	22.6	–11.4	354.3	0.014	16.06.2001	2001.456	–61.2	77.3	205.7	0.003
04.06.2001	2001.424	22.7	–11.5	354.7	0.013	17.06.2001	2001.459	–48.0	63.3	230.2	0.004
05.06.2001	2001.427	23.0	–11.8	356.0	0.012	18.06.2001	2001.462	–39.7	54.6	243.8	0.005
06.06.2001	2001.430	23.3	–12.1	357.6	0.011	19.06.2001	2001.465	–34.4	48.9	252.6	0.006
07.06.2001	2001.433	23.6	–12.4	359.5	0.010	21.06.2001	2001.469	–29.5	43.8	260.7	0.007
08.06.2001	2001.436	23.8	–12.7	1.9	0.009	23.06.2001	2001.475	–24.8	38.7	268.7	0.008
09.06.2001	2001.438	23.9	–12.8	3.8	0.008	23.06.2001	2001.476	–24.2	38.1	269.7	0.009
10.06.2001	2001.441	23.9	–12.7	7.5	0.007	25.06.2001	2001.480	–22.0	35.8	273.3	0.010
11.06.2001	2001.443	23.5	–12.4	10.9	0.006	26.06.2001	2001.483	–20.7	34.4	275.5	0.010
12.06.2001	2001.445	22.6	–11.5	15.5	0.005	27.06.2001	2001.487	–19.2	32.9	278.1	0.011
13.06.2001	2001.447	20.5	–9.2	22.3	0.004	28.06.2001	2001.490	–18.3	31.9	279.7	0.012
13.06.2001	2001.449	15.0	–3.4	34.3	0.003						

Соответствующий эллипс относительного движения и спекл-измерения показаны на рис. 1.

Изменение угла наклона орбиты от 50° до 41.03° с известным значением $(M_{Aa} + M_{Ab}) \sin^3 i = 1.100 M_\odot$ и $K_{Ab}/K_{Aa} = 1.06$, приводит к существенному изменению масс Aa и Ab компонентов. Ранее нами [1] было найдено: $M_{Aa} = 1.26 \pm 0.20 M_\odot$, $M_{Ab} = 1.18 \pm 0.20 M_\odot$. С учетом дополнительных наблюдений получается: $M_{Aa} = 1.48 \pm 0.80 M_\odot$, $M_{Ab} = 1.40 \pm 0.80 M_\odot$. Расхождения связаны с довольно большой ($\pm 4.09^\circ$) ошибкой угла наклона орбиты.

Пара 41 Dra представляет собой важный случай относительно короткопериодической двойной с двумя системами линий и эксцентриситетом, близким к единице, являющейся одновременно членом квадрупольной системы.

При прохождении периастра орбиты компоненты 41 Dra разделены всего на 0.001–0.002″, или 5–10 радиусов звезд. Кратковременное приливное трение вблизи периастра может быть причиной эволюции эксцентриситета орбиты, ее периода и размера полуоси. Поэтому квадрупольная система ADS 11061 AB в целом является критическим тест-объектом для проверки теорий образования и эволюции кратных звезд.

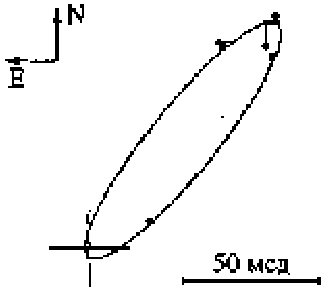

Рис. 1. Относительная интерферометрическая орбита 41 Dra = ADS 11061 *Aab*. Спекл-измерения (точки) соединены короткими отрезками со своими расчетными положениями на орбите

Спекл-интерферометрические, спектральные и астрометрические наблюдения позволяют уверенно определить расстояние до 41 Dra, которое равно 43.5 ± 5.6 пк [6], что дает для светимостей компонентов $L_a = (5.60 \pm 2.10)L_\odot$ и $L_b = (3.94 \pm 2.10)L_\odot$. Величина светимости и эффективной температуры, которая в первом приближении может считаться одинаковой для обеих компонентов и равной $T_{eff} = 6500$ K, позволяет оценить величины радиусов компонентов: $R_{Aa} = 1.9R_\odot$ и $R_{Ab} = 1.6R_\odot$. Используя значения масс компонентов и величины радиусов, получаем значения величин ускорений силы тяжести на поверхности звезд: $\lg g_{Aa} = 3.48$, $\lg g_{Ab} = 4.11$, которые совместно с эффективными температурами позволяют построить модели атмосфер компонентов. Модели атмосфер компонентов 41 Dra рассчитывались интерполяцией по T_{eff} и $\lg g$ из сетки бланкетированных моделей Куруца [7] для солнечного химического состава. Затем по программе Sam1 для каждого из компонентов рассчитывалось распределение энергии в непрерывном спектре H^a_λ и H^b_λ. Теоретические распределения сравнивались с наблюдаемым распределением на границе земной атмосферы. Поток энергии от 41 Dra создается суммарным блеском компонентов *Aa* и *Ab*, находящихся на расстоянии d от Земли. Следовательно, можно записать

$$E_\lambda = (R_{Aa}/d)^2 (H^a_\lambda + H^b_\lambda \cdot (R_{Ab}/R_{Aa})^2),$$

где H^a_λ и H^b_λ – величины потоков с единицы поверхности соответствующих компонентов.

Сопоставление наблюдаемого излучения (E_λ в мВт$\cdot$м$^{-2}\cdot$см$^{-1}$ из каталога III/202 Страсбургского центра астрономических данных) с рассчитанным для компонентов с $T^a_{eff} = 6575$ K, $T^b_{eff} = 6600$ K, $\lg g_{Aa} = 4.08$, $\lg g_{Ab} = 4.26$, $R_{Aa} = 1.82R_\odot$ и $R_{Ab} = 1.46R_\odot$ и $d = 43.5$ пк показывает удовлетворительное совпадение. В то же время более пологий, по сравнению с теоретическим, наклон наблюдаемого пашеновского и бальмеровского континуумов требует меньших температур компонентов. Однако величина бальмеровского скачка в наблюдаемом распределении характерна для температур, больших 6500 K.

Одновременно мы должны учесть то обстоятельство, что система 41 Dra может обладать рядом особенностей, связанных с пекулярно вытянутой орбитой. Возможно, что в системе имеется межзвездное вещество, которое может перерабатывать коротковолновое излучение в длинноволновое и приводить к изменению наклонов бальмеровского и пашеновского континуумов. В противоречии с требованием низкой температуры выступает и величина бальмеровского скачка на наблюдаемом спектре: по скачку температура должна быть больше 6500 K. Возможно, что величина бальмеровского скачка связана с резким возрастанием поглощения межзвездного вещества в системе для излучения с $\lambda < 364.7$ нм.

Для анализа параметров атмосферы компонентов 41 Dra использовались также линии H_α, H_β, H_γ и H_δ. Сложность анализа линейчатого спектра системы связана с тем, что компоненты 41 Dra имеют почти одинаковые параметры. Поэтому даже в первом приближении нельзя пренебречь вкладом одного из компонентов в суммарный спектр. Орбитальное движение приводит к тому, что в разные моменты времени сдвиги складывающихся спектров различны, что необходимо учитывать при анализе. Здесь изучены водородные линии по спектрам, полученным в январе–декабре 2000 г., когда разность лучевых скоростей компонентов составляла 8–10 км/с, и в январе–феврале 2001 г., когда эта разность приблизилась к 18 км/с. Ниже приведены средние величины эквивалентных ширин водородных линий в спектре 41 Dra и теоретические значения эквивалентных ширин (W_λ, пм), рассчитанные для модели с компонентами $Aa - T^a_{eff} = 6575\,\mathrm{K}$, $\lg g_{Aa} = 4.08$ и $Ab - T^b_{eff} = 6600\,\mathrm{K}$, $\lg g_{Ab} = 4.26$:

	W_λ, пм			
	H_α	H_β	H_γ	H_δ
41 Dra	505.0	510.0	501.0	510.0
Модель	484.0	513.5	521.0	542.5

Сравнение наблюдаемых эквивалентных ширин и контуров водородных линий с теоретическими расчетами показывает, что параметры компонентов системы близки к выбранным по распределению энергии в спектре. Однако полностью согласовать наблюдательные данные по водородным линиям с теоретическими не удается. Возможно, наблюдаемые величины эквивалентных ширин линий искажены ошибками проведения непрерывного спектра, положение которого на малых промежутках эшельных спектров определяется с точностью 0.01–0.02, что при наличии протяженных крыльев водородных линий (до 5 нм) может дать ошибку ± 0.1 нм. Теоретические контуры достаточно уверенно представляют наблюдаемые во всей области контура линии, за исключением центров линий (± 0.01 нм), что может быть связано с недостаточным учетом поглощения в самых верхних слоях атмосферы. Возможно, что расхождения будут сняты добавлением в систему поглощающей и переизлучающей материи. Не решен вопрос и об изменениях в системе, связанных с движением по орбите 41 Dra. Косвенным подтверждением этого может служить указание [6] об изменении разности блеска между компонентами системы от 0.2 до 0.3^m в $\lambda = 605$ нм.

Менее массивный компонент системы ($M_b = 1.40 M_\odot$) находится на линии нулевого возраста, следовательно, система прошла стадию гравитационного сжатия, и более массивный компонент ($M_a = 1.48 M_\odot$) достаточно далеко продвинулся в стадии сжигания водорода в ядре. Время эволюции этого компонента от линии нулевого возраста до теперешнего положения составляет $(4.0-4.2)\cdot 10^9$ лет, то есть до полного выгорания водорода в центре компонента Aa осталось около миллиарда лет.

Если все компоненты системы и сама система имеют общие происхождения и образовались в один момент времени, то время жизни и второго компонента Ab должно быть близко к $4\cdot 10^9$ лет. Однако положение компонента Ab на ZAMS свидетельствует о том, что возраст этого компонента должен быть существенно меньше (не более 1 миллиарда лет).

Отсюда следует вывод о том, что система должна была образоваться сравнительно недавно из компонентов, один из которых имеет достаточно большой возраст. Очень большой эксцентриситет системы подтверждает вывод о том, что сама система сравнительно молода по сравнению с возрастом компонента Aa, поскольку циркуляризация орбит тесных систем, к которым можно отнести и систему 41 Dra, требует существенно меньшего времени, чем наблюдаемое эволюционное время компонента Aa.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 00-02-16213-а и № 01-02-16563-а).

[1] *Балега И. И., Балега Ю. Ю., Фальке Г. и др.* // Письма в Астрон. журн.–1997.–**23**.–С. 199.

[2] *Копылов И. М.* // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.–1958.–**20**.–С. 148.

[3] *Копылов И. М.* // Астрон. журн.–1985.–**62**.–С. 1132.

[4] *Токовинин А. А.* // Письма в Астрон. журн.–1995.–**21**.–С. 286.

[5] *Baier G., Weigelt G.* // Astron. and Astrophys.–1983.–**121**.–P. 137.

[6] *Balega I., Balega Yu., Falcke H., et al.* // Visual Double Stars.–Kluwer Acad. Publ, 1997.–P. 73–78.

[7] *Kurucz R. L.* Atmospheric models on CD–ROMs.–1994.

[8] *Turon C., Creze M., Egret D., et al.* The HIPPARCOS Input Catalogue. ESA SP–1136.–1992.–Vol. **4**.