

## КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ СПЕКТРОВ ЗВЕЗД ТИПА UX Ori. ЗВЕЗДА UX Ori И CQ Tau

П.О. Димитриева, В.П. Гринин

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия,  
st110648@student.spbu.ru

## QUANTITATIVE ANALYSIS OF SPECTRA OF UX Ori stars. STAR UX Ori AND CQ Tau

P.O. Dimitrieva, V.P. Grinin

St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia,  
st110648@student.spbu.ru

**Аннотация.** Выполнен количественный анализ спектров молодых звезд UX Ori и CQ Tau, принадлежащих семейству молодых неправильных переменных звезд типа UX Ori. Спектры получены в моменты времени, когда звезда была в ярком состоянии. По эквивалентной ширине линии H $\alpha$  сделаны оценки темпа аккреции газа на звезду.

**Ключевые слова:** звезды типа UX Ori, UX Ori, CQ Tau.

**Abstract.** Quantitative analysis of spectra of young stars UX Ori and CQ Tau, which belong to the family of young irregular variable stars of the UX Ori type, has been performed. The spectra were obtained when the star was in a bright state. Using the equivalent width of the H $\alpha$  line, we estimated the rate of gas accretion onto the star.

**Keywords:** UX Ori type stars, UX Ori, CQ Tau.

### ВВЕДЕНИЕ

В данной работе представлены результаты спектроскопических наблюдений высокого разрешения звезды UX Ori и CQ Tau, еще не пришедшей на главную последовательность, принадлежащей группе UXORs. Звезды типа UX Ori (UXORs) — молодые звезды, которые были отнесены в отдельный спектральный класс относительно недавно [Grinin, 2017]. Необходимость отнесения этих звезд в отдельное семейство заключалась в особенностях их фотометрического поведения. Они демонстрируют глубокие ( $\Delta V = 2 - 3$  m) непериодические ослабления блеска продолжительностью от нескольких дней, до нескольких недель и глубиной до 2–3 звездных величин.

Наблюдается и другая особенность этих звезд. В 1968 г. Гётц и Венцель обнаружили необычное поведение цветового трека на диаграмме цвет-величина во время минимума CQ Tau [Grinin, 2017]. Падение блеска вначале сопровождалось покраснением звезды, однако вблизи минимума цветовой трек поворачивал в голубую сторону. Вскоре «эффект поголубения» был обнаружен у многих звезд этого типа.

На основании этих фактов Гринин с соавторами (1992) определили эволюционный статус звезд этого подкласса и построили модель описывающую наблюдаемые эффекты. Из заключений авторов следует, что звезды типа UX Ori обычно являются молодыми звездами, окруженными протопланетными дисками, которые имеют небольшой наклон к линии наблюдения. Этот вывод был подтвержден дальнейшими исследованиями, в том числе интерферометрическими наблюдениями в ближней инфракрасной области спектра.

Таким образом, наблюдательные признаки, по которым можно отнести звезды к типу UX Ori, это наличие глубоких алголе-подобных минимумов, эффект поголубения и увеличение степени линейной поляризации в минимумах.

### АНАЛИЗ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В данной работе мы используем спектры высокого разрешения, которые были получены на эшелле-спектрографе SOFIN [Tuominen et al., 1999] на 2,56-метровом телескопе обсерватории Nordic Optical Telescope (NOT) во время двух сеансов наблюдений в 1995 и 1996 гг.

В спектрах UXORs присутствует ряд линий фотосферного и околос звездного происхождения. Некоторые из них (D Na I, He I 5876, H $\alpha$ ) сильно изменчивы [Graham, 1992; Grinin et al., 1994; Grady et al., 1996; de Winter 1999; Kozlova et al., 2000], свидетельствуя о сложном движении околос звездного газа в околос звездном пространстве звезды. В спектрах исследуемых звезд также присутствуют многочисленные линии поглощения нейтральных и ионизированных, а также линии водорода, прежде всего Бальмеровской серии. Большинство этих линий типичны для нормальных звезд близких спектральных классов, но некоторые, такие как He I 5876, Na I D или триплет O I 7774, не наблюдаются с такой же интенсивностью у нормальных A-звезд [Grinin et al., 2001]. Многие фотосферные линии блендированы околос звездными линиями поглощения, так называемыми shell компонентами. Наиболее стабильными оказались линии Mg II 4481 и Si II 6347.

В работе были измерены эквивалентные ширины наиболее ярких индивидуальных линий из полученных ранее спектров. Использовались усредненные спектры звезд, полученные, когда звезда была в ярком состоянии [Grinin V.P., O. V. Kozlova]. Усредненные спектры сравнивались с синтетическими, рассчитанными по Kurucz (1993) модели звездных атмосфер и списка спектральных линий от базы данных VALD [Kurka et al., 1998].

Результаты измерений эквивалентных ширин для UX Ori приведены в табл. 1, где в 1 столбце указан порядок, во 2 — химический элемент, принадлежащий линии, в 3 — длина волны спектральной линии (в ангстремах) и в 4 — значение эквивалентной ширины EW (в ангстремах). Отрицательные значения EW указывают на эмиссионные линии.

Результаты измерений эквивалентных ширин для UX Ori

№	Элемент	$\lambda(\text{Å})$	EW (Å)
<b>UX Ori (1994)</b>			
26	H I (emission)	8598.40	-1.663 (19/11/94)
	H I (emission)	8665.02	-1.849 (19/11/94)
34	H $\alpha$ (emission)	6562.80	-7.610 (19/11/94)
<b>UX Ori (1995)</b>			
26	H I (emission)	8598.40	-1.603 (02/12/95)
	H I (emission)	8598.40	-1.609 (04/12/95)
	H I (emission)	8598.40	-1.76 (06/12/95)
	H I (emission)	8665.02	-2.502 (02/12/95)
	H I (emission)	8665.02	-3.087 (04/12/95)
	H I (emission)	8665.02	-2.107 (06/12/95)
34	H $\alpha$ (emission)	6562.80	-13.150 (02/12/95)
			-12.772 (04/12/95)
			-12.719 (06/12/95)
			-10.555 (02/12/95)
			-10.502 (04/12/95)
46	H $\beta$ (emission)	4881.32	-10.084 (06/12/95)
			-1.293 (02/12/95)
			-1.115 (04/12/95)
			-1.300 (06/12/95)
49	Ti II	4563.76	0.116
50	Mg II	4481.33	0.594
54	Ti II	4163.65	0.111
55	H $\gamma$ (emission)	4101.73	-0.285 (02/12/95)
57	Ca II	3933.66	2.179
<b>UX Ori (1996)</b>			
26	H I (emission)	8598.40	-1.675 (25/11/96)
	H I (emission)	8598.40	-1.859 (28/11/96)
	H I (emission)	8665.02	-1.431 (25/11/96)
	H I (emission)	8665.02	-1.397 (28/11/96)
34	H $\alpha$ (emission)	6562.80	-8.457 (25/11/96)
		6562.80	-5.672 (28/11/96)
35(1)	H $\alpha$ (emission)	6562.80	-5.524 (28/11/96)
		6562.80	-5.229 (02/12/96)
35(2)	Si II	6347.11	0.335
	Si II	6371.37	0.217
36	Si II	6347.11	0.329
	Si II	6371.37	0.258
39	He I	5875.61	0.475
	Na I	5889.95	0.702
	Na I	5895.92	0.541
47	H I	4861.32	0.274
	H I	4861.32	0.342

Аналогичные результаты получены для CQ Tau.

Следующий важный параметр — темп аккреции, который мы определили, представлен в табл. 2. Для определения аккреционной светимости мы выбрали эмиссионную линию H $\alpha$ , так как эта линия является наиболее сильной линией, присутствующей в спектрах.

Светимость линии  $L_{acc}$  вычислялась с использованием звездного потока на длине волны H $\alpha$ , рассчитанного по Kurucz (1979), и расстоянием до звезды.

Использовалось следующее соотношение между аккреционной светимостью и светимостью в линии [Mendigutía et al., 2011b]:

Результаты темпа аккреции для звезд UX Ori, CQ Tau.

Star	line	EW (Å)	date	$L_{acc} (L_{\odot})$	$\dot{M} 10^{-7}$ ( $M_{\odot}/\text{year}$ )	$\bar{\dot{M}} 10^{-7}$ ( $M_{\odot}/\text{year}$ )	$\dot{M}^* 10^{-7}$ ( $M_{\odot}/\text{year}$ )
UX Ori	H $\alpha$	7.610	19/11/94	2.85	1.02	1.27±0.19	0.66±0.43
		13.150	02/12/95	5.17	1.84		
		12.772	04/12/95	5.01	1.79		
		12.719	06/12/95	4.98	1.78		
		10.555	02/12/95	4.07	1.45		
		10.502	04/12/95	4.05	1.44		
		10.084	06/12/95	3.87	1.38		
		8.457	25/11/96	3.20	1.14		
		5.672	28/11/96	2.07	0.74		
		5.524	28/11/96	2.01	0.72		
		5.229	02/12/96	1.89	0.68		
CQ Tau	H $\alpha$	8.445	03/12/95	0.67	1.14	1.06±0.10	1.12±0.55
		5.161	05/12/95	0.40	0.67		
		11.992	21/11/96	0.99	1.67		
		8.566	26/11/96	0.68	1.15		
		7.459	29/11/96	0.59	0.99		
		7.649	29/11/96	0.60	1.02		
		5.971	02/12/96	0.46	0.78		

$$\log \log \left( \frac{L_{acc}}{L_{\odot}} \right) = A + B \times \log \left( \frac{L_{line}}{L_{\odot}} \right), \quad (1)$$

где A и B — константы, соответствующие точке пересечения и градиенту соотношения между  $\log(L_{acc}/L_{\odot})$  и  $\log(L_{line}/L_{\odot})$  соответственно. В нашей работе мы использовали  $A = 2,09 \pm 0,06$  и  $B = 1,00 \pm 0,05$  [5].

Скорость аккреции массы определялась из аккреционной светимости, звездного радиуса и звездной массы по формуле:

$$\dot{M} = \frac{L_{acc} R_*}{G M_*} \quad (2)$$

В табл. 2 занесены результаты темпа аккреции, рассчитанных по формулам (1) и (2). В 1 столбце указано название звезды, во 2 столбце — линия, по которой определялась аккреционная светимость, в 3 столбце — эквивалентная ширина линии H $\alpha$ , в 4 столбце — дата наблюдения, в 5 столбце — аккреционная светимость, в 6 столбце — темп аккреции, в 7 столбце — среднее значение темпа аккреции и в 8 столбце — результаты темпа аккреции авторов [Donehew, 2011].

Как видно, при одном и том же уровне блеска звезды прослеживается нестабильность темпа аккреции, значения которого могут отличаться в 2 раза. Наши результаты хорошо согласуются с результатами авторов [Donehew, 2011], что показывает правильность метода расчета темпа аккреции и возможности его применения для исследований других звезд типа UX Ori в дальнейшем.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были определены эквивалентные ширины проявившихся индивидуальных линий по спектрам звезд, полученных ранее. Значения эквивалентных ширин отражают спектральные характеристики звезд. И в UX Ori и в CQ Tau наблюдаются многочисленные линии металлов (Mg I, Fe I, Ti, Si I), дублет натрия и сильная эмиссия в водородных линиях. По эквивалентной ширине эмиссионной линии H $\alpha$  были сделаны оценки темпа аккреции. Для звезды UX Ori средний темп аккреции составил  $1.27 \cdot 10^{-7}$  ( $M_{\odot}/\text{год}$ ), для звезды CQ Tau —  $1.06 \cdot 10^{-7}$  ( $M_{\odot}/\text{год}$ ). В результатах прослеживается нестабильность темпа аккреции, значения которого могут отличаться в 2 раза при одном и том же уровне блеска звезды.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Donehew B. Measurements of mass accretion rates in Herbig Ae/Be stars: дис. Clemson University. 2011.
- Grinin V. P. et al. Optical spectra of five UX Orionis-type stars // *Astronomy & Astrophysics*. 2001. V. 379(2). P. 482–495.
- Grinin V. P. Young stars with non-periodic algol-type minima // *Astronomical and Astrophysical Transactions*. 1992. V. 3(1). P. 17–32.
- Grinin V. UX Ori-type stars // *Stars: From Collapse to Collapse*. 2017. V. 510. P. 32.
- Wichitanakom C. et al. The accretion rates and mechanisms of Herbig Ae/Be stars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2020. V. 493. N. 1. P. 234–249.