

УДК 524.318.2-43:520.844

## НЕЗАВИСИМАЯ ОЦЕНКА МЕЖЗВЕЗДНОЙ ЭКСТИНКЦИИ В НАПРАВЛЕНИИ НА FU Ori

© 2008 А. С. Кравцова<sup>1</sup>, Е. В. Малоголовец<sup>2</sup>, С.А. Ламзин<sup>1</sup><sup>1</sup>Государственный астрономический институт им. П. К. Штенберга, Москва, 119992, Россия<sup>2</sup>Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 16 июня 2008 г.; принята в печать 30 июня 2008 г.

На 6-м телескопе САО РАН проведены спекл-интерферометрические наблюдения FU Ori в фильтрах с центральной длиной волны/полушириной пропускания 600/40 нм и 800/100 нм. В фильтре  $\lambda/\Delta\lambda=800/100$  нм удалось зарегистрировать недавно обнаруженный на длинах волн  $\lambda \geq 1.25$  мкм спутник FU Ori S со следующими величинами позиционных параметров и разности блеска между компонентами:  $\theta = (163.9 \pm 1.0)^\circ$ ,  $\rho = (0.493 \pm 0.007)''$ ,  $\Delta m = 3.96 \pm 0.28$ . Из анализа распределения энергии в спектре спутника сделан вывод: чтобы величина  $A_V$  в направлении на FU Ori превышала величину порядка  $1.6^m$ , т.е. минимальное значение, которое необходимо в существующих теоретических моделях фуора, спектральный класс спутника должен быть не позднее K3. Обсуждается вопрос о достоверности этого вывода и возможности более точной оценки величины  $A_V$ .

Key words: межзвездная среда, газовые туманности, звезды — переменные и пекулярные

### 1. ВВЕДЕНИЕ

FU Ori — прототип подкласса молодых звезд, у которых наблюдалось увеличение блеска на  $4^m-6^m$  за время менее десяти лет [1, 2]. Большинство специалистов считает, что причиной вспышки является увеличение темпа аккреции из диска, окружающего звезду типа Т Тельца, до величины порядка  $10^{-4} M_\odot/\text{год}$  (см. [3] и приведенные там ссылки). В результате аккреционная светимость становится в сотни раз больше светимости центральной звезды, поэтому наблюдаемый спектр объектов типа FU Ori (фуоров) — это спектр излучения аккреционного диска.

Почти все существующие оценки межзвездной экстинкции в направлении на фуоры были получены путем сравнения наблюдаемого распределения энергии в спектрах фуоров с расчетными спектрами аккреционных дисков [3]. Однако в последние годы выяснилось, что применявшаяся для этих целей модель тонкого аккреционного диска не согласуется с наблюдениями [4–6], и возник вопрос об альтернативной модели. Для построения такой модели необходимо уметь оценивать величину экстинкции ( $A_V$ ) в направлении на фуоры модельно независимым методом. Учитывая, что эти объекты находятся внутри плотных компактных газо-пылевых облаков следует ожидать, что межзвездное покраснение будет сильно искажать их спектр. В качестве примера отметим, что в модели дифференциально вращающегося сверхгиганта

требуется  $A_V \simeq 1.4^m$  [4], а в модели аккреционного диска, толщина которого увеличивается по мере приближения к центральной звезде,  $A_V$  должно быть примерно равно  $2.2^m$  [6].

В работе [6] предложено оценить величину  $A_V$  в направлении на FU Ori из наблюдений спутника этого фуора. Спутник FU Ori (FU Ori S) был обнаружен в ИК диапазоне на угловом расстоянии порядка  $0.5''$  от главной звезды [7], что соответствует линейному расстоянию между ними около 230 а.е., полагая расстояние до фуора примерно равным 450 пк [4]. Если основное поглощение света фуора происходит в межзвездной среде и/или внутри облака, а не в непосредственной окрестности звезды, то оценка величины  $A_V$ , полученная по спутнику, будет относиться и к фуору. В [7] приведены аргументы в пользу того, что FU Ori S является молодой звездой, гравитационно связанной с фуором. Несколько позднее был получен спектр FU Ori S в диапазоне 2.00–2.45 мкм с разрешением  $R \simeq 800$  [8]. Судя по спектру, спутник — молодая звезда спектрального класса K, у которой, по сравнению со звездами главной последовательности, имеется избыток ИК излучения, обусловленный, вероятно, наличием пылевой оболочки.

У молодых звезд вклад излучения пыли резко уменьшается на длинах волн короче 1 мкм, поэтому для более точного определения спектрального

класса FU Ori S и последующей оценки величины  $A_V$  необходимо иметь информацию о распределении энергии в спектре спутника в области  $\lambda < 1$  мкм. Для оценки распределения энергии в спектре спутника нами были проведены спекл-интерферометрические наблюдения FU Ori в этом спектральном диапазоне, изложению результатов которых и посвящена данная работа.

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ

Спекл-интерферометрические наблюдения FU Ori были выполнены на 6-м телескопе Специальной астрофизической обсерватории Российской Академии Наук (САО РАН) 23 января 2008 года. Для наблюдений использовалась система регистрации спекл-изображений на базе ПЗС с внутренним усилением сигнала [9]. Масштаб 8.8 миллизекунд дуги на элемент изображения в фокальной плоскости телескопа обеспечивался планохроматическим микрообъективом с 16-кратным увеличением. Для компенсации атмосферного хроматизма использовалась поворотная система из двух призм Рисли. Спекл-интерферограммы регистрировались в фильтрах с центральной длиной волны/полушириной пропускания 600/40 нм и 800/100 нм. В каждом фильтре с экспозицией 10 мс накоплено 2000 спекл-изображений. Качество изображения во время наблюдений соответствовало примерно трем угловым секундам.

Для калибровки измерений использовались два метода. В первом случае определение масштаба изображений и привязка по позиционному углу проводились по двойным звездам с очень медленным относительным движением компонент, для которых угловые расстояния и позиционные углы хорошо известны из многолетних наблюдений разных авторов на разных телескопах. Во втором — калибровка осуществлялась установкой в сходящемся от главного зеркала БТА пучке непрозрачной маски с двумя круглыми отверстиями. В этом случае возможно зарегистрировать интерференционные полосы от пары апертур и по их пространственной частоте и ориентации определить масштаб изображения и поправку позиционного угла.

Относительное положение компонент и разность звездных величин определены из усредненных по серии спекл-интерферограмм спектров мощности без компенсации атмосферной передаточной функции [10]. Для двойной звезды спектр мощности представляет собой косинусоидальную функцию, период которой несет в себе информацию об угловом расстоянии между компонентами  $\rho$ , а ориентация полос задает позиционный угол системы  $\theta$ . Разность звездных величин  $\Delta m$  между компонентами вычислялась по контрасту полос в спектре мощности [11]. Для устранения

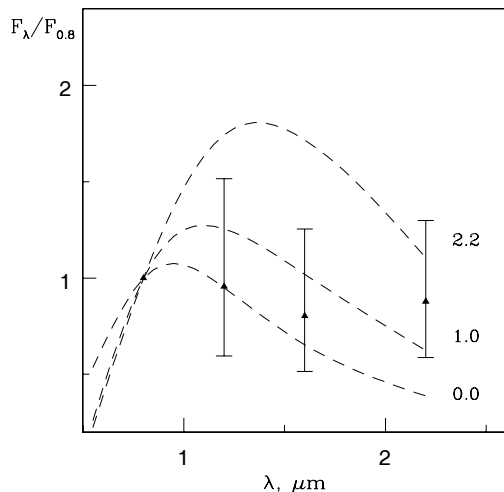
неопределенности позиционного угла, возникающей в результате потери фазовой информации при накоплении спектров мощности, был использован метод Уолкера [12], суть которого состоит в следующем. В дополнение к получаемому квадрату модуля Фурье-преобразования серии мгновенных изображений вычисляется квадрат модуля Фурье-преобразования серии спекл-изображений, умноженных на экспоненту. Из этих двух функций определяется положение комплексных нулей аналитического продолжения Фурье-преобразования неизвестного изображения, а затем относительное положение компонент в проекции на небесную сферу.

В результате обработки спекл-интерферограмм в фильтре  $\lambda/\Delta\lambda=800/100$  нм нам удалось зарегистрировать инфракрасный спутник FU Ori и определить позиционные параметры и разность блеска между компонентами:  $\theta = (163.9 \pm 1.0)^\circ$ ,  $\rho = (0.493 \pm 0.007)''$ ,  $\Delta m = 3.96 \pm 0.28$ . Наши значения  $\rho$  и  $\theta$  совпадают в пределах ошибки с полученными по ИК наблюдениям [8]:  $0.493'' \pm 0.003''$  и  $162.6^\circ \pm 0.4^\circ$  соответственно. Зарегистрировать спутник FU Ori в фильтре  $\lambda/\Delta\lambda=600/40$  нм нам не удалось из-за низкого качества изображения.

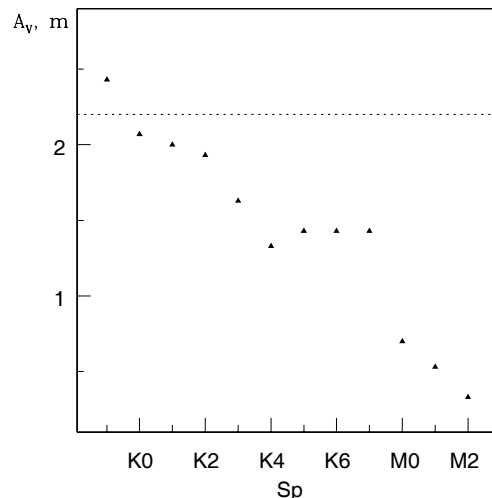
## 3. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В течение последних десяти лет систематическое ослабление блеска FU Ori было сравнимо с амплитудой его хаотической переменности, т.е. не превышало примерно  $0.1^m$  [13]. Это обстоятельство позволяет определить распределение энергии в спектре (РЭС) его спутника FU Ori S, используя оценки блеска фуора в полосах V, J, H и K, полученные в декабре 2003 г. [8]. Мы перевели приведенные в работе [8] звездные величины в соответствующие монохроматические потоки  $F_\lambda$  (эрг  $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2} \text{\AA}^{-1}$ ), а затем путем интерполяции нашли поток  $F_\lambda$  фуора на длине волны 0.8 мкм. После этого по найденным нами и в работе [8] разностям блеска фуора и его спутника определили РЭС FU Ori S в диапазоне от 0.8 до 2.2 мкм.

Чтобы найти величину экстинкции в направлении на FU Ori S мы сравнили полученное РЭС спутника с типичными РЭС молодых звезд, которые приведены в работе [14]. Для удобства сравнения мы поступили следующим образом. Во-первых, мы отнормировали спектры FU Ori S и звезд сравнения на величину  $F_\lambda$  на длине волны 0.8 мкм, т.е. положили для всех звезд  $F_\lambda(0.8 \text{ мкм}) \equiv 1$ . Во-вторых, мы условно приняли, что ошибка измерений величины  $F_\lambda(0.8 \text{ мкм})$  у FU Ori S равна нулю, включив при этом ошибку измерений на этой длине волны в ошибки значений



**Рис. 1.** Наблюдаемое распределение энергии в спектрах FU Ori S (треугольники) и "типичной" молодой звезды спектрального класса K5 при разных величинах межзвездного покраснения  $A_V$  (указаны справа).



**Рис. 2.** Зависимость максимально возможного покраснения  $A_V$  от спектрального класса FU Ori S. Горизонтальная штриховая линия соответствует  $A_V = 2.2^m$ , получаемому для дисковой модели.

$F_\lambda$  на длинах волн, соответствующих фильтрам J, H и K, так что  $\sigma_{new}^2 = \sigma_{0.8}^2 + \sigma_{old}^2$ .

На Рис.1 треугольниками изображены нормированные указанным образом величины  $F_\lambda$  для FU Ori S, а вертикальными линиями показаны ошибки этих измерений  $\sigma_{new}$ . Штриховыми линиями изображено РЭС "типичной" молодой звезды спектрального класса K5 [14], причем нижняя кривая — это "истинное" РЭС ( $A_V = 0$ ), а две вышележащих — распределения, искусственно искаженные межзвездным покраснением с  $A_V = 1.0^m$  и  $A_V = 2.2^m$  соответственно. Предполагалось, что закон покраснения — стандартный, т.е.  $R_V = A_V / E_{B-V} = 3.1$  [15].

Из Рис. 1 видно, что при  $A_V \geq 1.5^m$  величина  $F_\lambda$  для звезды сравнения спектрального класса K5 выходит за пределы ошибок измерений блеска FU Ori S в районе  $\lambda \simeq 1.6$  мкм (полоса фильтра H). Если к фотосферному излучению звезды сравнения добавить излучение пылевой оболочки, то суммарный поток еще больше превысит наблюдаемый, поэтому можно утверждать, что если спектральный класс спутника K5, то величина  $A_V$  в направлении на FU Ori S  $\leq 1.5^m$ .

Аналогичным образом мы определили верхние пределы покраснения  $A_V$ , сравнивая РЭС FU Ori S с "типичными" РЭС молодых звезд спектральных классов от позднего G до раннего M (см. Рис. 2). Отметим в этой связи два обстоятельства. Во-первых, у звезд разных спектральных подклассов превышение "расчетного" потока над наблюдаемым происходит в различных участках спектра. Во-вторых, резкое убывание потока  $F_\lambda$  в

области длин волн короче 0.8 мкм делает этот диапазон малоэффективным для оценки экстинкции и, по-видимому, объясняет, почему нам не удалось зарегистрировать FU Ori S в полосе 600/40 нм.

Из Рис. 2 следует, что величина  $A_V \simeq 1.6^m$ , которая требуется в модели дифференциально вращающегося сверхгиганта [4], возможна при условии, что FU Ori S имеет спектральный класс не позднее чем K3. Что касается модели адвекционного диска, то полученная в работе [6] оценка  $A_V = 2.2^m$  возможна, если спектральный класс спутника не позднее G9.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы показали, что, определив РЭС спутника FU Ori, можно получить информацию о величине экстинкции в направлении на сам фуор — точнее говоря, верхний предел величины  $A_V$  и с точностью до поглощения в непосредственной (примерно 100 а.е.) окрестности звезды. Из наших данных, в частности, следует, что если спектральный класс FU Ori S более поздний, чем K3, то  $A_V \leq 1.6^m$ , а значение  $A_V = 2.2^m$  возможно при условии, что спектральный класс спутника не позднее G9.

Однако следует напомнить, что оценки величины  $A_V^{max}$  мы получили путем сопоставления РЭС звезд сравнения с величинами  $F_\lambda$  FU Ori S, которые отличаются от измеренных на величину всего одного значения стандартной ошибки  $\sigma_{new}$ . Иными словами, достоверность наших выводов оставляет желать лучшего. Чтобы сделать их более надежными следует в 2–3 раза повысить точность измерения блеска спутника. Отметим в

связи с этим, что точность наших измерений в полосе 800/100 нм ( $\pm 0.28^m$ ) не намного хуже, чем ИК измерений [8]:  $\pm 0.23^m$ ,  $\pm 0.21^m$  и  $\pm 0.15^m$  в полосах фильтров J, H и K соответственно. Кроме того, для повышения точности следовало бы получить одновременную (в течение одной ночи) оценку блеска во всех этих спектральных диапазонах, что позволит устранить ошибки, связанные с хаотической переменностью FU Ori. Весьма желательно также уточнить спектральный класс FU Ori S, получив его спектр в диапазоне от 1 до 2 мкм.

Таким образом, предложенный нами метод оценки величины  $A_V$  в направлении на FU Ori выглядит достаточно перспективным, и следует приложить усилия для более детального определения РЭС спутника фуора в интервале от 0.8 до 2–3 мкм.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. G. H. Herbig, *Vistas in Astron.* **8**, 109 (1966).
2. G. H. Herbig, *Astrophys. J.* **217**, 693 (1977).
3. L. Hartmann and S. J. Kenyon, *Annu. Rev. Astronom. Astrophys.* **34**, 207 (1996).
4. G. H. Herbig, P. P. Petrov and R. Duemmler, *Astrophys. J.* **595**, 384 (2003).
5. S. L. Skinner, K. L. Briggs, and M. Güdel, *Astrophys. J.* **643**, 995 (2006).
6. А. С. Кравцова, С. А. Ламзин, Л. Эррико и др., Письма в АЖ **33**, 846 (2007).
7. H. Wang, D. Apai, Th. Henning, et al., *Astrophys. J.* **601**, L83 (2004).
8. B. Reipurth and C. Aspin, *Astrophys. J.* **608**, L65 (2004).
9. А. Ф. Максимов, Ю. Ю. Балега, Е. В. Малоголовец и др., готовится к печати.
10. A. Labeyrie, *Astronom. and Astrophys.* **6**, 85 (1970).
11. I. I. Balega, Y. Y. Balega, K.-H. Hofmann, et al., *Astronom. and Astrophys.* **385**, 87 (2002).
12. J. G. Walker, *Opt. Acta* **28**, 735 (1981).
13. C. Clarke, G. Lodato, S. Y. Melnikov, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **361**, 942 (2005).
14. S. J. Kenyon and L. Hartmann, *Astrophys. J. Suppl.* **101**, 117 (1995).
15. R. C. Bless and B. D. Savage, *Astrophys. J.* **171**, 293 (1972).

## INDEPENDENT ESTIMATE OF THE INTERSTELLAR EXTINCTION TOWARD FU ORI

A. S. Kravtsova, E. V. Malogovets, S. M. Lamzin

Speckle-interferometric observations of FU Ori are performed with the 6-m telescope of the Special Astrophysical Observatory with 600/40 nm and 800/100 nm (central bandwidth/halfwidth) filters. The companion star FU Ori S that was recently discovered at  $\lambda \geq 1.25 \mu\text{m}$  was recorded in observations with the  $\lambda/\Delta\lambda=800/100$  nm filter. The positional parameters and magnitude difference of the companion in the filter considered are found to be  $\theta = (163.9 \pm 1.0)^\circ$ ,  $\rho = (0.493 \pm 0.007)''$ ,  $\Delta m = 3.96 \pm 0.28$ . An analysis of the spectral energy distribution of the companion implies that for the extinction  $A_V$  toward FU Ori to be greater than about  $1.6^m$ , i.e., the minimum value required by the available models of the fuor, the spectral type of the companion star must be no later than K3. The reliability of this conclusion and the possible ways for obtaining more accurate estimates of  $A_V$  are discussed.