

Б. Е. Жилиев

(Главная астрономическая обсерватория АН УССР)

В 1936 г. в темном облаке В 35 Ориона была открыта уникальная переменная FU Ori. В течение примерно 120^d она увеличила свой блеск с $m_{pg} \sim 15^m.6$ до $9^m.8$ и до настоящего времени остается неправильной переменной со средним значением m_{pg} около 10^m . Чтобы быть медленной Новой, она должна бы иметь M_{pg} на 4—5 величин меньше. С другой стороны, FU Ori имеет все свойства типичной Т Тау-звезды: отношение Li/Ca больше примерно в 80 раз по сравнению с солнечным, она обнаруживает сильно расширенные микротурбулентностью линии, нерегулярную эмиссию в H α и в ультрафиолетовой части спектра. Подробный обзор спектральных работ по FU Ori можно найти у Хербига [1]. Наблюдения дают для FU Ori $R/R_{\odot} = 20—25$, T_e близко к 6800° [1]. В системе типичных Т Тау-звезд FU Ori тоже занимает особое место: у нее аномально большой радиус (у типичных Т Тау-звезд $R/R_{\odot} \sim 5—11$) и едва ли не самый большой ультрафиолетовый избыток [2].

В такой ситуации может оказаться полезным построение модели внешней оболочки FU Ori. В работе [5] были рассмотрены модели конвективных оболочек ряда типичных неправильных переменных типа Т Тау: L κ H α 120, GW Ori, Т Тау на основе уравнения турбулентной конвекции [3]. Было показано, что из-за малых ускорений силы тяжести в оболочках эти звезды обладают аномально большим основным масштабом турбулентности $(\nabla \ln \rho)^{-1} = \frac{RT(1+\alpha)}{g}$ и что внутренняя энергия

турбулентных молей (гранул) может быть сравнима и даже превосходить дебит излучения звезды в целом. В результате случайного характера появления гранул на поверхности звезды и их высвечивания функция светимости тоже является случайной функцией времени. Для получения статистических характеристик блеска звезды использовалась модель дробового шума в диоде — высвечивание гранулы описывалось калиброванным прямоугольным импульсом, появляющимся с вероятностью пуассоновского случайного процесса. При этом получилось, что у Т Тау относительное отклонение блеска должно составлять 0.13, а у Солнца 0.002. В настоящей работе приводятся результаты аналогичного расчета модели оболочки FU Ori.

При выборе граничных условий для интегрирования системы уравнений турбулентной конвекции необходимо знать значение удельной энтропии в достаточно глубоких слоях фотосферы, где водород практически полностью ионизирован. Из [5] следует

$$\frac{S}{R} = \ln M_* + 3 \ln R_* - 2 \ln E + \text{const.}$$

Здесь $\frac{S}{R}$ — безразмерная удельная энтропия, M_* , R_* — масса и радиус звезды, $\text{const} < 0$ — аддитивная постоянная, E — параметр теории внутреннего строения звезд, определяющий притяженность конвективной оболочки по сравнению с лучистым ядром. Для полностью конвективных моделей $E = 45,49$ и уменьшается по мере роста лучистого ядра. В наших вычислениях принято:

$$E = 45,49,$$

что соответствует состоянию звезды в полностью конвективной стадии

Структура конвективной оболочки определялась путем численного интегрирования уравнений турбулентной конвекции, полученных автором совместно с И. Г. Колесником [5] для плоской водородной атмосферы. В дальнейшем α -степень ионизации водорода, $\Phi(z)$ — функция, описывающая отклонение оболочки от изэнтропы,

$$\nabla_{\eta} \alpha = -\alpha(1-\alpha) \frac{R(1+\alpha)}{2c_p} \left[A^2 + \left(\frac{5}{2} + A \right) \nabla_{\eta} \Phi \right],$$

$$\nabla_{\eta} \Phi = \frac{D}{1+\alpha} \left[\frac{c_p}{R(1+\alpha)} \right]^{1/2} A^3 \left[(1-\alpha) e^{-\alpha \left(\frac{5}{2} + A \right) - \Phi} \right]^{1/2},$$

где

$$A(\alpha, S) = \frac{2 \ln \frac{1-\alpha}{\alpha} - \frac{5}{2}(1+\alpha) - \ln \frac{a'}{C} + \frac{S}{R}}{1+\alpha} = \frac{I}{kT},$$

$$c_p = R(1+\alpha) \left[\frac{5}{2} + \frac{\alpha(1-\alpha)}{2} \left(\frac{5}{2} + A \right)^2 \right],$$

$$\frac{S}{R} = \frac{S_0}{R} - \Phi(z),$$

$$D = \frac{2}{R} \left(\frac{k}{I} \right)^2 \left[\frac{R}{a} \pi F_{\text{conv}} e^{S_0/R} \right]^{1/2},$$

где константы a, a' — аддитивные постоянные в выражении для удельной энтропии, C — константа из уравнения Саха.

Результаты численного интегрирования

Для интегрирования взяты такие значения основных параметров для FU Ori [1]: $\frac{R}{R_{\odot}} = 23 \#$, $\frac{L}{L_{\odot}} = 10^3$, $T_e = 6800^\circ$, $\lg g = 1.72$. За неимением оценок массы M/M_{\odot} было принято равным единице. В таблице приведены данные для термодинамических параметров оболочки FU Ori в зависи-

η	α	$\frac{S}{R}$	$T^\circ \cdot 10^{-3}$	$\lg P$	$\lg \rho$	$\lg P_e$	$\lg E$	$H_p(\eta)$
0.000	0.106	25.66	11.48	5.649	-6.368	4.631	37.64	0.081
0.005	0.118	25.84	11.68	5.676	-6.353	4.700	37.72	0.083
0.105	0.164	26.46	12.37	5.776	-6.296	4.925	38.00	0.091
0.205	0.206	26.97	12.95	5.869	-6.238	5.101	38.24	0.099
0.465	0.278	27.75	13.91	6.031	-6.131	5.370	38.61	0.113
0.705	0.366	28.55	15.11	6.246	-5.981	5.674	39.06	0.131
1.005	0.436	29.06	16.16	6.433	-5.845	5.916	39.41	0.146
1.305	0.665	30.05	20.91	7.152	-5.303	6.753	40.66	0.220
1.905	0.897	30.34	32.09	8.045	-4.652	7.720	42.21	0.385
2.405	0.965	30.38	45.14	8.513	-4.347	8.205	43.10	0.562
5.905	0.997	30.40	154.21	9.879	-3.522	5.577	45.88	1.949
9.905	0.998	30.40	277.37	10.517	-3.140	10.216	47.23	3.508

мости от безразмерной координаты $\eta = \frac{gk}{Rl}$, где g — ускорение силы тяжести, R — удельная газовая постоянная, I — потенциал ионизации водорода, z — линейная координата. p, ρ, p_e — соответственно давление, плотность и электронное давление, H_p — размер конвективного элемен-

та (гранулы), E — его внутренняя энергия. Верхняя граница $\eta=0.000$ соответствует оптической толще $\tau=10$.

На рисунке приведена зависимость E от безразмерной глубины. Для сравнения приведена аналогичная кривая для Солнца [5]. Из рисунка видно, что конвективный элемент в непосредственной близости от поверхности FU Ori содержит внутреннюю энергию, на порядок превосходящую полную светимость звезды. На Солнце это отношение меньше примерно в миллион раз.

Данные таблицы позволяют оценить число Маха M для турбулентной конвекции на уровне, соответствующем $\tau=10$. M определяется согласно [5]:

$$M^2 = \frac{\gamma - 1}{2\gamma^2} \frac{kT}{l} \left| \nabla_{\tau} \frac{S}{R} \right|,$$

где γ — показатель адиабаты. Оценка дает для M значение $M=0,56$, что соответствует турбулентной скорости 6.8 км/сек. Микротурбулентные скорости, наблюдаемые из кривой роста, — порядка 5.3 км/сек. Нужно помнить, что эти значения относятся к уровням фотосферы с τ , соответственно равным 10 и ~ 1 , т. е. к макро- и микрошкале турбулентности.

В рамках упомянутой модели, когда общее излучение звезды складывается из высвечивания отдельных гранул, можно оценить функцию распределения и дисперсию светимости звезды. Для импульсного пуассоновского процесса относительное уклонение светимости d от ее среднего значения $\overline{L(t)}$ имеет вид [5]:

$$d = \frac{\sqrt{D[L(t)]}}{L(t)} = \frac{1}{\sqrt{n_1 \Delta\tau}},$$

где $D[L(t)]$ — дисперсия светимости, $n_1 = \frac{\overline{L(t)}}{E}$ — средняя частота появления гранул на поверхности звезды, $\Delta\tau = \frac{H_p}{c_0 M} = \frac{c_0}{\gamma g M}$ — время высвечивания гранулы, c_0 — скорость звука на уровне $\tau=10$. Функция распределения для импульсного пуассоновского процесса $p(L)$ является гауссовой [4], если выполняется условие (1),

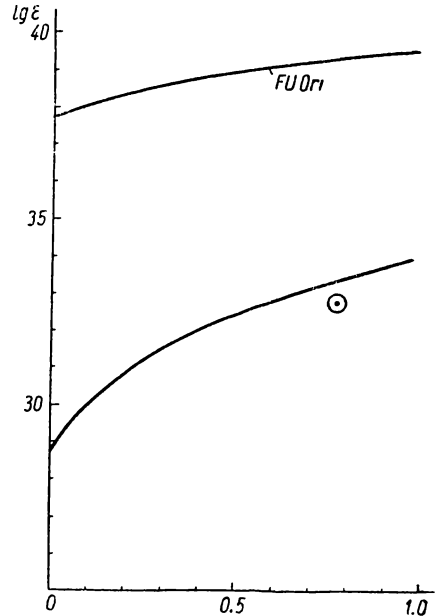
$$n_1 \Delta\tau \gg 1, \quad (1)$$

$$p(L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D[L(t)]}} e^{-\frac{x^2}{2}},$$

где

$$x = \frac{L - \overline{L(t)}}{\sqrt{D[L(t)]}}. \quad (2)$$

Взяв необходимые величины из таблицы, находим, что условие (1) выполняется, и получаем для d значение, равное 0.05. Это соответствует



относительному уклонению светимости в звездных величинах $\approx 0^m.05$. Ф. И. Лукацкая [6] из обработки наблюдений FU Ori за 3000^d нашла, что относительное уклонение светимости составляет $0^m.15$, а функция распределения имеет вид (2). Данные таблицы получены в предположении, что путь перемешивания, а следовательно, и размер гранул, равен шкале H_p . Если пересчитать данные модели для пути перемешивания l , равного $l = aH_p$ при $a = 3$, то мы получим полное совпадение теоретических и наблюдательных оценок для дисперсии и функции распределения блеска FU Ori.

В заключение отметим, что коэффициент пропорциональности a в формуле, связывающей длину пути перемешивания со шкалой высот, является эмпирической константой, подгоняемой под результаты наблюдений. Подобная процедура естественная во всех полуэмпирических теориях турбулентности, в том числе и в теории Бем-Витензе. Например, из наблюдений конвекции на Солнце следует, что эмпирическая константа заключена в пределах 1—2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Herbig G. H. — Contrib. from the Lick Observatory, 178, 1966.
2. Kuhl L. V. — PASP, 78, 464, 1966.
3. Ягер К. де. Строение и динамика атмосферы Солнца, ИЛ, М., 1962.
4. Рытов С. М. Введение в статистическую радиофизику. «Наука», М., 1966, 52.
5. Жильев Б. Е., Колесник И. Г. — АЖ, 45, 1, 1968.
6. Лукацкая Ф. И. — Переменные звезды, 15, № 5 (119), 1965.

MODEL ENVELOPE OF FU ORIONIS

В. Е. ЗИЛЯЕВ

Summary

A model convective envelope of FU Ori was computed. This star has a greater turbulence scale comparing with the main sequence stars. Internal energy of convective elements for it is 10^6 times as high as that for the Sun. This fact may account for flare activity of the star. Dispersion and distribution function of the star brightness are calculated on the basis of a simplified model. The results are in a satisfactory agreement with the observation.

О ВОЗМОЖНОМ ИСТОЧНИКЕ ЭНЕРГИИ ВСПЫШЕК ЗВЕЗД ПОЗДНИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ КЛАССОВ

И. А. Климишин

(Астрономическая обсерватория Львовского гос. ун-та)

Для интерпретации явлений вспышек звезд типа Т Тельца и UV Кита в различное время был выдвинут ряд гипотез: гипотеза горячего пятна, аккреции, выноса в фотосферные слои дозвездного вещества, синхротронного излучения, обратного комптон-эффекта и др. Однако каждый из предложенных механизмов выделения энергии при вспышке встречается с определенными трудностями. В последнее время для объяснения свечения звезд типа UV Кита подробно обсуждалась модель «холодная звезда + горячий газ» [1—3]. В этой модели, в частности, послемаксимальное изменение блеска звезды определяется расширением выброшенного звездой горячего облака и рекомбинациями ионизованного водорода, электронная температура которого предполагается равной 20 000—30 000° К. На основании данных о вспышках звезды EV Яще-