АСТРОФИЗИКА

TOM 30

ИЮНЬ, 1989

ВЫПУСК 3

УДК: 524. 337: 524. 57

ПЫЛЬ ВОКРУГ МОЛОДЫХ ЗВЕЗД. МОДЕЛЬ АЛГОЛЕПОДОБНЫХ МИНИМУМОВ ЗВЕЗД ТИПА UX ОРИОНА

Н.В.ВОЩИННИКОВ

Поступила 29 марта 1988 Принята к печати 15 мая 1988

Для звезд типа UX Орнона с глубожими непериодическими минимумами блеска рассчитаны изменения показателей цвета U-B, B-V, V-R, и V-I и степень линейной поляризации $P_U, P_B, P_V, P_R и P_I$. Рассматривалось однократное рассеивание света звезды графито-силикатной смесью частиц в сплюснутой сфероидальной пылевой оболочке. Считалось, что наблюдаемые алголеподобные минимумы являются результатом затмения звезды оптически толстыми пылевыми облаками, находящимися в оболочке. На основе существующих наблюдательных данных получены ограничения на оптическую толщину оболочки вдоль большой полуоси $0.2 \leqslant \tau_0^{n''}(U) \leqslant 0.5$ и отношение ее полуосей $3 \leqslant A/B \leqslant 10$.

1.Введение. Среди молодых объектов — Ас - звезд Хербига выделяется ряд звезд со значительными непериодическими изменениями блеска. В глубоких (алголеподобных) минимумах видимая величина звезд UX Ori, WW Vul, VX Cas, SV Cep, VV Ser, RZ Psc и некоторых других уменьшается на $2^m - 3^m$ в полосах B и V (см. сводку наблюдательных данных в работах [1-3]). В процессе уменьшения блеска показатели цвета U-Bи B-V сначала растут, а затем уменьшаются, причем зачастую в минимуме блеска цвет звезды может стать более голубым, чем в максимуме. Впервые подобный эффект был обнаружен Венцелем [4] для звезды CQ Таш и Γ .В.Зайцевой [5] для неправильной переменной UX Ori.

Одна из гипотез происхождения глубоких минимумов (а также наблюдаемых мелких вариаций блеска) предполагает ослабление света звезды пылью в неоднородной оболочке (модель переменной околозвездной экстинкции). Эта идея была высказана Венцелем [4] еще в 1969 г. Подтверждениями присутствия околозвездной пыли является изменение распределения энертии в непрерывном спектре звезд (покраснение) [6] и наличие значительных инфракрасных избытков у Ас-звезд Хербига [7]. Отметим, что связь глубоких минимумов блеска звезд типа UX Огі с пылью обсуждалась неоднократно (см., например, [8-10]). Однако, источником голубого свечения в минимумах обычно считался горячий газ. Лишь недавно В.П.Гринину [11] удалось в рамках модели переменной околозвездной экстинкции объяснить диаграммы «цвет-величина» для звезд UX Огі и WW Vul. При этом предполагалось, что оптически толстые пылевые облака, вызывающие алголеподобные затмения, погружены в оптически тонкую оболочку, содержащую мелкие пылинки. Рассеянное этими частицами излучение и является причиной «поголубения» света звезд в минимумах блеска. В [11] было указано также на вероятную несферичность околозвездной оболочки и предсказана возможность увеличения линейной поляризации при ослаблении блеска звезды, что затем наблюдалось для UX Огі [12]. Во время двух глубоких минимумов в 1986г. степень поляризации излучения этой звезды в полосе V возросла до $P_V \approx 7\%$. Предварительное рассмотрение изменений показателей цвета и поляризации, проведенное в [12], показало, что результаты наблюдений можно объяснить в рамках модели переменной околозвездной экстинкции, используя графито-силикатную смесь сферических пылинок.

Целью данной работы является моделирование изменений показателей цвета и степени поляризации излучения звезд типа UX Огі во время глубоких минимумов блеска. Результаты выполненных расчетов позволяют из наблюдаемых диаграмм «цвет-величина» и изменений зависимостей $P(\lambda)$ в ходе затмения оценить геометрию и оптическую толщину оболочки, а также характеристики рассеивающих пылевых частиц.

2. Модель. Была рассмотрена следующая модель: оптически тонкая рассеивающая пылевая оболочка вокруг звезды однородна и имеет форму сплюснутого сфероида с отношением полуосей A/B. Ось вращения сфероида (B) лежит в картинной плоскости (т.е. угол между осью B и лучом зрения $i=90^{\circ}$). В околозвездной оболочке имеются также оптически толстые пылевые облака, экранирующие излучение звезды. Если эти облака (экраны) являются достаточно плотными и большими, то при покрытии звезды облаком наблюдается лишь рассеянное в оболочке излучение звезды (глубокий минимум блеска или полное затмение). Отметим, что расчеты поляризации излучения для эллипсоидальных оболочек (но без учета экрана) выполнялись и ранее (см., например, [13,14]).

Зависимость оптической толщины экранирующего облака от длины волны излучения λ и времени t задавалась в следующем виде:

$$\tau_1(\lambda,t) = \tau_1^{max}(\lambda) \cdot t/t^{max}, \qquad (1)$$

где принято, что в начальный момент затмения (t=0) $\tau_1(\lambda,0)=0$, а в момент наибольшего ослабления блеска звезды $(t=t^{max})$ $\tau_1(\lambda,t^{max})=$ = $\tau_1^{max}(\lambda)$. Из (1) следует, что в ходе затмения вид зависимости оптической толщины экрана от λ не меняется. Это означает, что экранирующее облако неоднородно, но состоит из одинаковых частиц, т.е. рост $\tau_1(\lambda,t)$ связан лишь с увеличением числа пылинок на луче зрения, а не с изменением их оптических свойств. Форма зависимости $\tau_1^{max}(\lambda)$ выбиралась такой, что

$$\tau_1^{max}(\lambda_{\chi})/\tau_1^{max}(\lambda_{\chi}) \sim (\lambda_{\chi}/\lambda_{\chi})^{-\alpha}, \qquad (2)$$

где λ_{χ} и λ_{γ} — эффективные длины волн полос X и Y. В дальнейшем при расчетах считалось, что $\alpha = 1$ (по аналогии с кривой межзвездного поглощения). На самом деле величина α определяет наклон треков на диаграммах «цвет-величина» на начальном этапе затмения (до точки поворота) и может быть задана из наблюдений (см. обсуждение в [12]).

В атмосферах столь горячих звезд, как UX Ori, VX Cas, CO Ori и др. (T_{*}=6000K—10000K) пыль не образуется [15], поэтому пылевые частицы в оболочке скорее всего являются реликтовыми, т. е. оставшимися после возникновения звезды из межзвездного облака. Однако, за время жизни звезд (~10⁶лет[9]) характеристики ансамбля пылинок могут измениться: частицы могли быть выметены давлением излучения, либо испариться.

В качестве исходной модели рассеивающих пылинок была выбрана графито-силикатная смесь, предложенная Матисом и др. [16] для объяснения кривой межэвездного поглощения (смесь MRN). Согласно данной модели однородные сферические пылинки имеют радиусы от $a_{-}=0.005$ мкм до $a_{+}=0.25$ мкм и степенное распределение по размерам

$$n_{sl,C}(a) = K_{sl,C} n_H a^{-q}.$$
 (3)

где n_H — концентрация водорода, а коэффициенты K_{sl} и K_C определяются с учетом космической распространенности кремния и углерода соответственно. Значение q в смеси MRN взято равным 3.5. Отметим, что распределение $n(a) \sim a^{-3.5}$, по-видимому, может быть конечным этапом эволюции спектра размеров частиц, сталкивающихся в околозвездной среде [17]. Отношение числа силикатных частиц к числу графитовых в стандартной смеси MRN составляет $n_{sl}/n_C = K_{sl}/K_C \approx 1.07$ [16].

3. Основные соотношения. Выберем декартову систему координат, в центре которой находится звезда. Ось 2 направлена к наблюдателю, а оси x и y располагаются соответственно вдоль и перпендикулярно большой осн сплюснутой сфероидальной оболочки. Степень линейной поляризации для системы звезда + оболочка $P(\lambda)$ и изменения показателей цвета $\Delta(X-Y)=(X-Y)_t-(X-Y)_0$ вычислялись в приближении однократного рассеяния с учетом ослабления света в оболочке ($(X-Y)_0$ — показатель цвета в момент t=0, т. е. когда звезда не закрыта экраном). Расчеты проводились по следующим формулам:

$$P(\lambda,t) = \frac{\langle I_s(\lambda) \rangle - \langle I_s(\lambda) \rangle}{\langle I(\lambda) \rangle + e^{-i \delta^{H}(\lambda) - \epsilon_1(\lambda_s)}}, \qquad (4)$$

$$\Delta(X-Y) = 2.5lg \frac{[\langle I(\lambda_{\gamma}) \rangle + e^{-\tau_{0}^{st}(\lambda_{\gamma}) - \tau_{1}(\lambda_{\gamma}t)}] \cdot [\langle I(\lambda_{\chi}) \rangle + e^{-\tau_{0}^{st}(\lambda_{\chi})}]}{[\langle I(\lambda_{\gamma}) \rangle + e^{-\tau_{0}^{st}(\lambda_{\chi}) - \tau_{1}(\lambda_{\chi}t)}] \cdot [\langle I(\lambda_{\gamma}) \rangle + e^{-\tau_{0}^{st}(\lambda_{\gamma}t)}]},$$
(5)

$$< I(\lambda) > = < I_{\chi}(\lambda) > + < I_{\gamma}(\lambda) >.$$
 (6)

Здесь обозначения $\langle I_x(\lambda) \rangle$ и $\langle I_y(\lambda) \rangle$ относятся к потокам рассеянного поляризованного излучени с электрическими векторами, перпендикулярными осям x и y соответственно. Экспоненциальные слагаемые в (4) и (5) учитывают вклад ослабленного оболочкой излучения звезды. Нетрудно видеть, что выражения для $P(\lambda)$ и $\Delta(X-Y)$ не должны зависеть от распределения энергии в спектре звезды. Через $\tau_0^{ext}(\lambda)$ обозначены оптическая толщина оболочки в экваториальной плоскости (вдоль полуоси A): величина $\tau_1(\lambda, t)$ характеризует экранирующее облако (считалось, что эти облака не рассеивают излучение звезды, а лишь ослабляют его) и определяется соотношением (1). Выражения для $\langle I_{x,y}(\lambda) \rangle$ можно найти путем усреднения по объему оболочки и ансамблю пылинок. Переходя к сферической системе координат, имеем

$$< I_{x,y}(\lambda) > -\frac{2}{\pi} \frac{\tau_0^{\alpha\prime\prime}(\lambda)}{Q(\lambda)} \int_0^{\pi/2} \int_{R_0/A}^{R(\eta)/A} \int_{\theta_1(\eta,r)}^{\pi-\theta_1(\eta,r)} [\Phi_{1,2}(\lambda,\theta)\cos^2\varphi +$$

$$+\Phi_{2,1}(\lambda,\theta)\sin^2\varphi]e^{-\tau_{\theta}^{err}(\lambda,\theta,r,\varphi)-\tau_{\theta}^{err}(\lambda,\theta,r,\varphi)}\cdot\sin\theta d\theta d(\frac{r}{A})d\varphi.$$
(7)

$$\Phi_{1,2}(\lambda,\theta) = \int_{x_{-}}^{x_{-}} \frac{n_{s_{+}}}{n_{c}} \xi_{1,2}^{l}(m,x,\theta) + t_{1,2}^{c}(m,x,\theta) \ x^{-q} dx, \qquad (8)$$

где $x = \frac{2\pi a}{\lambda}$, $x_{-} = \frac{2\pi a_{-}}{\lambda}$, $x_{+} = \frac{2\pi a_{+}}{\lambda}$. Оптическая толщина оболочки определяется следующими соотношениями:

$$\tau_0^{qst}(\lambda) = \pi A k_c n_H \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^{3-q} Q(\lambda).$$
(9)

$$Q(i) = \int x^2 \left[\frac{n_{s_i}}{n_c} Q_{exi}^{s_i}(m,x) \perp Q_{exi}^C(m,x) \right] x^{-q} dx.$$
(10)

В соотношениях (8). (10) $Q_{ext}^{Si,C}(m,x)$ — факторы эффективности ослабле ния. $t_{1,2}^{si,C}(m,x,\theta)$ — параметры безразмерной интенсивности для сферичес ких частии, которые рассчитывались по теории Ми [18]. Верхние индексы относятся к силикатным (S1) и графитовым (С) частичам, показатели преломления которых брались из работ [19.20].

Экспоненчиальный сомножитель в (7) учитывает оптические толчи ны для излучения звезды походячего до данного объема оболочки ($\tau_*(\lambda, 0, r, q)$) и рассеянного этим объемом излучения до выхода из оболоч ки ($\tau_{sh}(\lambda, 0, r, q)$). Выоажение для суммаоного оптического пути выглядит следующим обоазом:

$$\tau_{*}^{rrt}(j,0,r,a_{1}) - \tau_{*b}^{rrt}(j,0,r,a_{1}) = \tau_{0}^{rrt}(j) \frac{r}{A}$$

$$\left[(1 + \cos^2 \mathfrak{g} \cdot \operatorname{ctg}^2 \theta)^{1/2} + \cos \mathfrak{g} (\operatorname{ctg} \theta_1 - \operatorname{ctg} \theta) \right]$$
 (11)

Отметим, что пределы интегрирования по 0 и r'A в (7) определяются с учетом геометрии сфероидальной обологки (P(a) — ее внешняя гоа нига)

$$\theta_1(q,r) = \arg \sin[r/P(q)].$$
(12)

$$P(\eta)/4 = \frac{B/A}{\left\{1 - 1 - \left(\frac{B}{A}\right)^2 \cos^2 \eta\right\}}$$
 (13)

причем в (7) учтена также возможность существования в чентре оболочки. полости, свободной от пыли (R₀ — радиус части оболочки, где пыли нет).

Время расчетов можно существенно сократить. если учет ослаблениясвета в оболочке проводить приближенным образом. Это достигается выне сением экспоненчиального множителя в выражении (7) из под знака интеграла по 6. Вместо (11) мы воспользовались следующим соотношением

$$\tau_{\bullet}^{ev}(\lambda, r, q) + \tau_{\bullet}^{ev}(\lambda, r, q) = \tau_{0}^{ev}(\lambda) \frac{r}{4} (1 + \cos q \operatorname{ctg} \theta_{1}).$$
(14)

что дает ошибки по сравнению с точными результатами для степени поляризации <0.1% и показателей цвета <0.‴02.

По формулам (3), (9) и (10) можно оценить лучевую концентрацию пылинок в оболочке

$$N_{d} = n_{d}A = \frac{\tau_{0}^{ext}(\lambda) \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^{q-3} \left(\frac{n_{Si}}{n_{c}} + 1\right) \left(a_{-}^{1-q} - a_{+}^{1-q}\right)}{(q-1)\pi Q(\lambda)} =$$

$$=3.05\times10^{-2}\tau_0^{ext}(u)/Q(u)\cdot\left(\frac{n_{st}}{n_c}+1\right)(a_-^{-2.5}-a_+^{-2.5})cm^{-2}$$
(15)

и массу рассеивающих частиц

$$n_{1} = n_{d} m_{d} V = \frac{16\pi^{2}(q-1)(a_{+}^{4-q} - a_{-}^{4-q})(\rho_{SI} \frac{n_{SI}}{n_{c}} + \rho_{c})A^{2}}{9(4-q)(a_{-}^{1-q} - a_{+}^{1-q})(\frac{n_{SI}}{n_{c}} + 1)\frac{A}{B}} N_{d} =$$

$$=8.77\times10^{-11}\frac{(a_{+}^{1/2}-a_{-}^{1/2})(P_{s_{l}}\frac{n_{s_{l}}}{n_{c}}+\rho_{c})A^{2}}{(a_{-}^{-2.3}-a_{+}^{-2.3})(n_{s_{l}}/n_{c}+1)A/B}N_{d} r.$$
 (16)

Эдесь ρ_{Si} =3.4г/см³ и ρ_{C} =2.0г/см³ плотность вещества силикатных и граффитовых частиц. Численные ковффициенты в [15] и [16] получены при условии, что q=3.5, а λ_{u} =0.36 мкм.

Следует также указать, что выбор угла наклона оси вращения сфероидальной оболочки в картинной плоскости ($i=90^{\circ}$) не ограничивает общность рассмотренной модели. Нетрудно видеть, что уменьшение i эквивалентно росту видимой площади оболочки, которая при $i=0^{\circ}$ должна восприниматься как круг (A/B=1). Для связи между моделями, рассчитанными при $i=90^{\circ}$, и видимыми под углом i, можно использовать соотношение*

$$(B/A)_{i} = (B/A)_{an^{0}} + [1 - (B/A)_{an^{0}}]\cos i.$$
(17)

Это означает, что, например, для оболочки с истинным отношением полуосей $(A/B)_{on0} = 5$ и видимой под углом $i = 60^{\circ}$ можно воспользоваться резуль-

^{*} Если в оболочке имеются очень мелкие (релеевские) частицы, то для оценки степени поляризации можно использовать соотношение (А. Э. Долгинов и др. «Распространение и поляризация излучения в космической среде», М., 1979, с. 194)

татами расчетов с А/В≈1.7.

4. Результаты расчетов и обсуждение. Вычисления показателей цвета и степени поляризации для описанной выше модели проводились для пяти длин волн $\lambda\lambda$ 0.36, 0.44, 0.55, 0.70 и 0.88 мкм — эффективных длин волн системы UBVRI. При расчетах варьировались параметры смеси MRN($a_{-},a_{+},n_{Si}/n_{e},q$). Изменялись также отношение полуосей сфероидальной оболочки A/B и ее оптическая толщина $\tau_{0}^{ext}(U)$.



Рис. 1. Диаграммы цвет - величина для моделей с параметрами $a_{-}=0.005$ ыкы, $a_{+}=0.25$ ыкы, $n_{Si}/n_{c}=1.07$, $A/B=5;1-\tau_{0}^{sxi}(U)=0.05$, 2-0.1, 3-0.25, 4-0.5. Пунктиром обозначены накладываемые из наблюдений ограничения: $\Delta V_{max} \ge 2^{m}.5;$ $\Delta V \approx 0^{m}.8-1^{m}.5$, $\Delta (U-B) \approx 0^{m}.2-0^{m}4;$ $\Delta V \approx 1^{m}.2-2^{m}.0$, $\Delta (B-V) \approx 0.^{m}2-0.^{m}4.$

Диаграммы «цвет-величина» представлены на рис. 1 и 2 при различных значениях $\tau_0^{ext}(U)$ и A/B соответственно. Как уже отмечалось, на начальном этапе затмения вид этих диаграмм определяется зависимостью $\tau_1^{max}(\lambda)$ в экранирующем облаке. Затем наступает момент, когда рост показателей цвета прекращается, и они начинают уменьшаться. Положение точек поворота зависит от вклада в суммарное свечение системы «звезда+ оболочка» рассеянного излучения, которое, естественно, сначала проявляется в голубой части спектра. Доля рассеянного излучения увеличивается с ростом $\tau_0^{st}(U)$ и уменьшением A/B (см. рис.1, 2 и табл. 1). Помимо этого, важное значение играет и альбедо пылинок, которое больше для силикатных частиц, чем для графитовых (см. данные для моделей 7 и 8 в табл. 1).

Отметим попутно, что точно определить положение точек поворота как из расчетов, так и из наблюдений затруднительно (это видно, например, из рис. 1, 2, а также рис. 1—4 в [3]).



Рис. 2. Днаграммы цвет - величина для моделей с параметрами $a_{-}=0.005$ мкм, $a_{+}=0.25$ мкм, $n_{S_{1}}/n_{c}=1.07$, $\tau_{0}^{cri}(U)=0.5;1-A/B=2, 2-4, 3-6, 4-10.$

Если экранирующее облако достаточно плотное и затмение звезды продолжается, то наступает момент, когда звезда перестает быть видна в данном диапазоне длин волн. При этом затмение раньше наступает в полосе U. Эначение ΔX_{max} для полос UBVRI и ряда моделей собраны в табл.1. Разности между ними дают показатели цвета для системы звезда + оболочка, наблюдающиеся при полном затмении. Из табл.1 следует, что величины ΔX_{max} , как и точки поворота, определяются значениями $\tau_0^{out}(U)$, A/B и n_{Si}/n_C . Важным оказывается и наличие или отсутствие мелких (или крупных) пылинок в оболочке (ср. модели 1 и 9, 10 и 11 в табл.1).

Еще одним проявлением околозвездной пылевой оболочки является поляризация рассеянного излучения. Если рассеивающие частицы в оболочке и ослабляющие излучение частицы в экране — сферические, то рассеянное излучение будет линейно поляризованным. В ходе затмения степень поляризации должна увеличиваться, причем ее поведение с ростом ΔV (или t; связь между ΔV и t можно установить из соотношения (5))

Таблица 1

					-			Marrie	-		-			
Набакадаемые			1				1	MOLEAS						
величины			_ <u>Z</u>	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
CKa	P _s	0.29%	0.17%	0.04%	0.02%	0.21%	0.29%	0.43%	0.06%	0.23%	0.42%	0.28%	0.11%	0.33%
BAC.	с ^Р в	0.29	0.16	0.03	0.01	0.23	0.28	0.39	0.12	0.30	0.43	0.26	0.14	0.29
NA.	P _V	0.31	0.16	0.03	0.06	0.26	0.29	0.38	0.20	0.37	0.43	0.26	0.21	0.26
WC III	PR	0.33	0.16	0.03	0.09	0.29	0.29	0.36	0.26	0.41	0.36	0.28	0.29	0.23
W	P ₁	0.32	0.16	0.03	0.12	0.29	0.27	0.35	0.26	0.41	0.23	0.29	0.36	0.20
	A V	1.*35	1.=80	2."85	1.=05	1.=20	1.=60	1."60	1.=15	1.=35	1."30	1."40	1.=35	1.=65
-	A(U-B)	0.22	0.33	0.60	0.15	0.18	0.28	0.27	0.16	0.22	0.20	0.23	0.22	0.27
per	۸V	1.70	2.30	3.60	1.25	1.50	2.00	2.00	1.40	1.55	1.70	1.70	1.60	2.10
0801	4(B-V)	0.26	0.39	0.69	0.18	0.22	0.33	0.33	0.19	0.23	0.26	0.27	0.25	0.35
EM D	ΔV	2.15	2.90	4.50	1.60	1.90	2.55	2.45	1.80	1.90	2.25	2.10	2.05	2.75
O VI	∆(V-R)	0.31	0.46	0.79	0.21	0.26	0:39	0.38	0.24	0.27	0.33	0.31	0.28	0.43
-	۵V	2.35	3.15	4.90	1.75	2.05	2.80	2.60	2.00	2.10	2.55	2.20	2,15	3.00
	∆(V-I)	0.62	0.90	1.54*	0.42	0.53	0.78	0.73	0.50	0.54	0.68	0.62	0.27	0.85
		1.1		-		-	-	1						
	∆Umas	2.=77	3.‴60	5.=41	2.= 16	2.=48	3.=22	3.*11	2.=38	2.=60	2.779	2.=78	2.=66	3.=31
HIG	ABmes	2.95	3.79	5.62	2.32	2.65	3.42	3.26	2.59	2.70	3.09	2.92	2.79	3.58
THE	AVmer	3.20	4.05	5.87	2.53	2.89	3.68	3.42	2.93	2.92	3.49	3.09	2.99	3.89
TAR	AR mes	3.55	4.39	6.21	2.84	3.22	4.04	3.60	3.47	3.24	4.05	3.32	3.28	4.23
	Almas	3.98	4.82	6.63	3.25	3.64	4.48	3.86	4.19	3.65	4.72	3.58	3.66	4.61
		3.72%	4.65%	5.40%	0.18%	2.10%	5.64%	7.44%	0.58%	2.51%	5.47%	3.58%	1.29%	6.90%
ĕ		4.44	5.28	5.97	0.13	2.66	6.49	7.91	1.29	3.63	7.44	3.83	1.80	7.92
HVO	-	5.98	6.83	7.92	0.57	3.79	8.51	7.75	3.01	5.45	10.74	4.53	3.29	9.31
5		8.54	9.41	10.11	1.26	5.63	11.85	10.00	6.36	8.17	15.17	5.93	5.96	11.30
		12.32	13.21	13.93	2.30	8.35	16.78	12.09	12.55	11.85	17.70	7.75	10.37	13.99

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ АЛГОЛЕПОДОБНЫХ МИНИМУМОВ ЗВЕЗД ТИПА UX ОРИОНА

Модели

1- $a_{-}=0.005$ мкм. $a_{+}=0.25$ мкм. $n_{u}/n_{c}=1.07$, A/B=5, $\tau_{0}^{**}(U)=0.5$, q=3.5, 2то же, что 1, но $\tau_{0}^{**}(U)=0.25$, 3- то же, что 1, но $\tau_{0}^{**}(U)=0.05$, 4- то же, что 1, но A/B=1.5, 5то же, что 1, но A/B=3, 6- то же, что 1, но A/B=10, 7- то же, что 1, но A/B=1.5, 5то же, что 1, но A/B=3, 6- то же, что 1, но A/B=10, 7- то же, что 1, но $n_{u}/n_{c}=0$, 8- то же, что 1, но $n_{u}/n_{c}=\infty$, 9- то же, что 1, но $a_{-}=0.05$ мкм, 10- то же, что 1, но $a_{+}=0.15$ мкм, 11- то же, что 1, но $a_{+}=0.35$ мкм, 12- то же, что 1, но q=2.5, 13- то же, что 1, но q=4.5. в различных цветовых полосах выглядит примерно одинаково. В качестве примера на рис. 3 нанесены зависимости $P_V(\Delta V)$.



Рис. 3. Зависимость линейной поляризации в полосе V от изменения блеска системы звезда + оболочка в ходе затмения ΔV . Рассмотрены модели с параметрами $a_{\pm}=0.005$ мкм, $a_{\pm}=0.25$ мкм, $n_{Si}/n_c=1.07$, $A/B=5;1-\tau_0^{oxt}(U)=0.05, 2-0.1, 3-0.25, 4-0.5$.

Гораздо более интересными и информативными являются изменения кривых $P(\lambda, \Delta V)$ в ходе затмения. Оказывается, что на их форму влияют почти все параметры модели (см. рис. 4-6 и табл.1). Однако общая картина изменений степени поляризации с ΔV примерно одинакова. При увеличении ΔV степень поляризации сначала растет в полосе U, достигая максимума, затем она продолжает расти и достигает максимума в полосе В и т. д. Рост поляризации практически прекращается, когда приближается затмение звезды в данной полосе. При полном затмении звезды во всех полосах оболочка проявляется как отражательная туманность, и ход $P(\lambda)$ оказывается типичным для отражательных туманностей [21]. Следует, однако, заметить, что, несмотря на внешнюю похожесть кривых на рис. 4-6, каждая из них индивидуальна, т.е. соответствует определенному значени ΔV и характеризуется соответствующей степенью поляризации и зависимостью $P(\lambda)$. Это позволяет надеяться, что зависимости $P(\lambda, \Delta V)$ могут быть использованы для нахождения параметров модели $a_{\perp}, a_{\perp}, n_{si}/n_c$ и др. Отметим также, что появление небольшой отрицательной поляризации в полосе U для модели 4 (табл.1) объясняется значительным отклонением оптических свойств пылинок от релеевских (параметр $x=2\pi q/\lambda$ для полосы U максимален). Поляризация излучения, рассеянного такими части-

ПЫЛЬ ВОКРУГ МОЛОДЫХ ЗВЕЗД

цами при малых углах рассеяния (а именно они составляют весомый вклад для модели 4 с A/B=1.5), отрицательна. Этот эффект хорошо изучен для отражательных туманностей (см. например, [21]).



Рис.4. Изменение зависимостей $P(\lambda, \Delta V)$ в ходе затмения. Рассмотрены модели с параметрами $a_{-}=0.005$ мкм. $a_{+}=0.25$ мкм, $n_{s}/n_{c}=1.07$, A/B=5; $1-\tau_{0}^{-1}(U)=0.05$, 2-0.1, 3-0.25, 4-0.5.

По результатам фотометрических наблюдений ряда эвезд, приведенным в работах [1-6, 8, 10, 12], можно оценить значения ΔB_{max} и ΔV_{max} (по наблюдаемым амплитудам изменения блеска) и точки поворота на днаграммах V/(U-B) и V/(B-V) (на диаграммах V/(V-R) и V/(V-I) поворот цветовых треков пока не наблюдался). Это дает возможность получить ограничения на параметры оболочки $\tau_0^{st}(U)$ и A/B. Изучение наблюдательных данных для ~ 10 звезд с алголеподобными изменениями блеска псказывает, что для них обычно $\Delta B_{max} \ge 2^m$, а $\Delta V_{max} \ge 2^m.5$, что приводит к оценке $\tau_0^{st}(U) \le 0.5$, поскольку иначе полные затмения в полосах B и V наступали бы раньще. По той же причине должно быть $A/B \ge 3$ (см. модели 4 и 5 в табл. 1). Положения наблюдаемых точек поворота примерно составляют $\Delta V \approx 0^m.8 - 1^m.5$, $\Delta (U-B) \approx 0^m.2 - 0^m.4$. $\Delta V \approx 2^m.2 - 2^m.0$, $\Delta (B-V) \approx 0^m.2 - 0^m.4$. Эти пределы нанесены на рис. 1 и 2. Они позеоляют ограничить значения $\tau_0^{st}(U)$ снизу и A/B сверху

 $(\tau_0^{ext}(U) \ge 0.2$ и $A/B \le 10)$, в противном случае поворот цветовых треков происходил бы при существенно больших значениях ΔV (см. модели 2,3 и 6 в табл.1). Скорее всего не следует серьезно рассматривать и модель 8 (с одними лишь силикатными пылинками), поскольку в этом случае значения $\Delta (U-B)$ и $\Delta (B-V)$ в точке поворота меньше наблюдаемых. Отметим, что и поляризация излучения для модели 8 оказывается небольшой (см. рис. 6 и значения P^{max} в табл.1), тогда как вблизи минимума блеска наблюдаемая поляризация составляет 5—7% ($P_V \approx 7\%$ для UX Ori[12], $P_U \approx 5\%$ для WW Vul [22] и $P_B \approx 6.5\%$ для VV Ser[23]). Эти наблюдения можно объяснить в том случае, если в оболочке находятся пылинки с низким альбедо (типа графита), а отношения полуосей сфероидальной оболочки $A/B \ge 3$.



Рис.5. Изменение зависимостей $P(\lambda, \Delta V)$ в ходе затмения. Рассмотрены модели с параметрами $a_{-}=0.005$ мкм, $a_{+}=0.25$ мкм, $n_{SI}/n_{c}=1.07$, $\tau_{0}^{ss}(U)=0.5$; a-A/B=2, 6-4, B-6, r-10.

Наконец, следует отметить, что в процессе эволюции пылинки в околозвездной оболочке могут слипаться во внешних ее частях и испаряться во внутренних. Это может привести к изменению параметра q в функции распределения по размерам (3) и появлению вблизи звезды зоны, свободной от пыли. Расчеты для моделей с q=2.5 и q=4.5 (см. модели 12 и 13 в табл. 1) показывают, что вариации q сильнее влияют на степень поляриза-

пыль вокруг молодых звезд

ции, чем на показатели цвета системы звезда + оболочка. Учитывая результаты работы [24], можно сказать, что внутренний радиус зоны без пыли вокруг звезды класса A R 1 а.е.. Если считать, что внешний радиус оболочки $A \approx 100$ а.е., то нижний предел интегрирования в соотношении (7) $R_0/A \leqslant 0.01$. Сравнение моделей, рассчитанных с $R_0/A = 0$ и 0.01, показывает, что появление полости в оболочке ведет лишь к небольшому увеличению степени поляризации (на 0.2 - 0.5%) при $\Delta V \ge 2^m$.



Рис.6. Изменение зависимостей $P(i, \Delta V)$ в ходе затмения. Рассмотрены модели с параметрами $A/B=5, \tau_0^{cri}(U)=0.5$; $a-a_{-}=0.005 \text{ мкм}, a_{+}=0.25 \text{ мкм}, n_{Si}/n_c=0,$ 6- $a_{-}=0.005, a_{+}=0.25 \text{ мкм}, n_{Si}/n_c=\infty, B-a_{-}=0.05 \text{ мкм}, a_{+}=0.25 \text{ мкм}, n_{Si}/n_c=$ = 1.07. $\Gamma - a_{-}=0.005 \text{ мкм}, a_{+}=0.15 \text{ мкм}, n_{Si}/n_c=1.07.$

Дальнейшее уточнение модели целесообразно проводить для каждой конкретной звезды с учетом наблюдаемых изменений $P(\lambda, \Delta V)$. При этом важное значение приобретает точное установление положения максимума, от которого производится отсчет значения ΔV . Подобный анализ был выполнен в работе [12] для звезды UX Огі.

5. Заключение. Для звезд типа UX Огі рассмотрена модель сфероидальной пылевой оболочки. Проведены расчеты изменений показателей цвета U-B, B-V, V-R и V-I и степени линейной поляризации в полосах UBVRI системы звезда + оболочка в ходе затмения звезды оптически

толстыми облаками.

Найдено, что положение точек поворота на диаграммах «цвет—величина», а также максимальные амплитуды ослабления блеска прежде всего зависят от оптической толщины оболочки $\tau_0^{*'}(U)$ и отношения длин ее полуосей A/B. Вид зависимости $P(\lambda)$ определяется всеми параметрами модели ($\tau_0^{*'}(U), A/B$, минимальным и максимальным радиусами пылинок и т.д.), которые, по-видимому, можно оценить, если известно, на сколько блеск звезды в момент наблюдения отличался от максимального, т. е. надежно определена величина ΔV . При этом, с точки зрения изучения свойств рассеивающих пылинок, наиболее важным является установление положения максимума блеска, от которого происходит отсчет ΔV , а также наблюдения зависимости $P(\lambda, \Delta V)$. В ходе алголеподобных затмений предпочтение следует отдать поляризационным наблюдениям в широком диапазоне длин волн, поскольку диаграммы «цвет—величина» малоинформативны (особенно в красной области спектра).

Предварительный анализ наблюдаемых диаграмм V/(U-B) и V/(B-V) для ~ 10 звезд и наблюдений поляризации для 3 звезд показывает, что $0.2 \leqslant \tau_0^{ext}(U) \leqslant 0.5$ и $3 \leqslant A/B \leqslant 10$. Кроме того, в оболочке должны присутствовать частицы типа графитовых с низким альбедо.

Автор признателен В.П.Гринину и В.Б.Ильину за полезное обсуждение работы.

Аенинградский государственный университет

DUST AROUND YOUNG STARS. MODEL OF THE ALGOL-TYPE MINIMA FOR UX ORIONIS-TYPE STARS

N. V. VOSHCHINNIKOV

The variations of color excesses U-B, B-V, V-R and V-I and the degree of linear polarization P_U, P_B, P_V, P_R and P_I are computed for UX Orionis-type stars with nonperiodic deep minima of brightness. The single scattering of star radiation by silicate-graphite mixture of particles in the oblate spheroidal circumstellar dust shell is taken into account. The observed Algol-type minima are the consequence of the existance of optically thick clouds in the dust shell. These clouds eclipse the star. The limits of the optical thickness along the great semiaxe $0.2 \leq \tau_0^{ext}(U) \leq 0.5$ and semiaxes ratio $3 \leq A/B \leq 10$ are found for the shell using available observations.

ПЫЛЬ ВОКРУГ МОЛОДЫХ ЗВЕЗД

ЛИТЕРАТУРА

1. Г.В.Зайцева, Перемен. звезды. 22,181, 1985.

- 2. В.И.Кардаполов, Г.К.Филипьев, Перемен.звезды, 22, 153, 1985.
- 3. Г.В.Зайцева, Астрофизика, 25,471, 1986.
- 4. W. Wenzel, Non-Periodic Phenomena in Variable Stars, IAU Coll., Acad. Press, 1969, p.61,
- 5. Г.В.Зайдева, Перемен. звезды, 19, 63, 1973.

6. Г.В.Зайцева, Астрофизика,7,333, 1971.

7. M.Cohen, Mon. Notic. Roy. Astron.Soc. 161, 97, 1973.

8. Г.В.Зайцева, П.Ф.Чугайнов, Астрофизика, 20, 447, 1984.

9. H.R.E.T jin A Djie, L.Renijn, P.S.The, Astron. and Astrophys., 134, 273, 1984.

10.В.И.Кардаполов. Л.В.Тимошенко, Г.К.Филипьев, Перемен. звезды, 22, 137, 1985.

11. В.П.Гринин, Письма в Астрон. ж., 14, 65, 1988.

12. Н.В.Вощинников, В.П.Гринин, Н.Н.Киселев, Н.Х.Миникулов, Астрофизика, 28, 311, 1988.

13. B.Zellner, Astron. J., 76, 651, 1971.

14. S.J.Shawl, Astron.J., 80, 595, 1975.

15. Yu. A. Fudeyev, Circumstellar Matter, IAU Symp. Ne122, Reidel, 1987, p.515.

16. J.S.Mathis, W.Rumpl, K.H.Nordsieck, Astrophys. J., 217, 425, 1977.

17. K P.Biermann, M.Harwit, Astrophys. J., 241, L 105, 1980.

18. Г. ван де Хюлст, Рассеяние света малыми частицами, ИЛ. М., 1961.

19. B.T.Draine, Astrophys.J. Suppl. Ser., 57, 587, 1985.

20. J.Bergeat, J. Lefevre, R. Kandel, M.Lunel, F.Sibille, Astron. and Astrophys., 52, 245, 1976.

21. Н.В.Вощинников, Фотометрич, и поляриметрич, исслед, небесных тел, Киев, 1985, с.111,

- 22. В.П.Гринин, Н.Н.Киселев, Н.Х.Миникулов, Г.П.Чернова, Письма в Астрон. ж. 14, 514, 1988.
- 23. В.И.Кардаполов, Л.А.Павлова, Ф.К.Рспаев, Астрон. циркуляр., №1452, 1, 1986.

24. J.Leiknes, O.Havnes, Astron. and Astrophys. Suppl. Ser., 57, 263, 1984.

Примечание при корректуре. Как было показано В.П.Грининым (см. обсуждение в [22]), для описания изменений степени поляризации системы звезда + оболочка в ходе затмения удобно воспользоваться соотношением $P(\lambda, t) = P(\lambda, 0) \cdot 10^{0.4\lambda X}$, где $P(\lambda, 0)$ — поляризация на длине волны λ в момент t=0, т.е. когда звезда не закрыта экраном (см. соотношение (4)), а $\Delta X = X_t - X_0$ — изменение блеска в полосе X (оно может быть легко получено из (5)).