

УДК: 524.57

## ПЫЛЬ ВОКРУГ МОЛОДЫХ ЗВЕЗД. НАБЛЮДЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ UX Ori В ГЛУБОКИХ МИНИМУМАХ

Н. В. ВОЩИННИКОВ, В. П. ГРИНИН, Н. Н. КИСЕЛЕВ, Н. Х. МИНИКУЛОВ

Поступила 7 июля 1987

Принята к печати 20 октября 1987

В ходе патрульных фотометрических и поляриметрических наблюдений UX Ori, начатых в 1986 г. в Крыму и Боливии, зарегистрированы два глубоких минимума блеска, во время которых наблюдался рост линейной поляризации (до  $\approx 7\%$ ) и отмечена тенденция к увеличению круговой поляризации (до  $\approx 1\%$ ). Анализ наблюдательных данных показывает, что основным источником поляризованного излучения в глубоких минимумах является излучение звезды, рассеянное частицами околозвездной пыли. На основе теории Ми для полидисперсной графито-силикатной смеси частиц рассчитаны оптические свойства эллипсоидальных пылевых оболочек и построена модель алголеподобного минимума.

1. *Введение.* Звезда UX Ori ( $Sp = A2e-A3e$ ,  $V = 9^m.6-12^m.5$ ) является представителем подкласса молодых звезд типа Ae/Be-Хербига с непериодическими алголеподобными ослаблениями блеска. В 1973 г. Г. В. Зайцева [1] установила, что при уменьшении блеска звезды ее цвет меняется неоднозначным образом: вначале показатели цвета  $U-B$ ,  $B-V$  растут (звезда краснеет). Затем при продолжающемся падении блеска происходит поворот на диаграмме «цвет—величина» в сторону уменьшения показателей цвета. Этот результат в дальнейшем был подтвержден другими наблюдателями и к настоящему времени известно уже более десятка звезд, показывающих аналогичные изменения цвета в минимумах блеска [2—8].

Хотя указанный эффект известен уже давно, вопрос о его природе продолжает оставаться дискуссионным. Отсутствует также единый взгляд и на механизм самих алголеподобных минимумов. В литературе обсуждались следующие варианты: 1) переменность околозвездной экстинкции, обусловленная неоднородной структурой вращающихся околозвездных пылевых оболочек [9], 2) магнитная активность на поверхности молодых звезд, сопровождающаяся появлением и исчезновением холодных пятен [7, 10], 3) образование пыли в результате нестационарных процессов в ат-

мосфере звезды (как у звезд типа RCrB) [4]. В качестве источника голубого свечения рассматривалось излучение горячего газа — околосветной оболочки [1, 5], активной области над пятном [7] или хромосферы [4]. Основным доводом в пользу того, что светит именно горячий газ, обычно считалось наблюдаемое в минимумах UX Ori, WW Vul и некоторых других звезд этого типа увеличение эквивалентной ширины линии  $H_{\alpha}$  [7, 11], свидетельствующее об усилении вклада излучения газовой составляющей. Недавно, однако, эта аргументация была поставлена под сомнение [12] после того, как выяснилось, что в спектре WW Vul наблюдаются значительные вариации  $W_{H_{\alpha}}$  и вне минимумов, которые не сопровождаются сколько-нибудь заметными изменениями цвета звезды.

При выборе той или иной модели важное значение имеет длительность минимумов. У некоторых звезд она составляет всего 1—2 суток [13], и из перечисленных выше моделей лишь одна — модель переменной околосветной экстинкции — не сталкивается с трудностями при объяснении столь коротких минимумов (длительность отдельного минимума в этом случае определяется временем покрытия звезды пылевым облаком, движущимся вокруг нее по кеплеровской орбите). Недавно одним из авторов статьи было показано [14], что в рамках этой модели можно дать также весьма простое объяснение диаграммы «цвет—величина». Для этого необходимо предположить, что пылевые облака, вызывающие алголеподобные затмения, погружены в протяженную оболочку, содержащую мелкие частицы пыли. Рассеянное пылинками излучение звезды и может быть источником слабого голубого свечения, которое проявляется лишь в моменты покрытия звезды пылевым облаком.

Вследствие того, что пылевые оболочки вокруг молодых звезд являются, по-видимому, дискообразными (о чем свидетельствует целый ряд наблюдательных фактов, включая прямые спекл-интерферометрические наблюдения [15]), рассеянное пылевыми частицами излучение должно быть линейно поляризованным. Отсюда вытекает основное предсказание модели [14]: линейная поляризация излучения звезд с алголеподобными минимумами должна увеличиваться при ослаблении блеска звезды.

С целью проверки этого предсказания в 1986 г. в Крыму и в Боливии были начаты патрульные наблюдения поляризации и блеска UX Ori. Ниже приводятся первые результаты этих наблюдений, на основании которых построена предварительная модель алголеподобного минимума.

2. Наблюдения линейной поляризации в Крыму проводились на телескопе АЗТ-11 с финским UBVR<sub>I</sub>-поляриметром [16]. Количество наблюдательных ночей равно 20. Использовалась стандартная методика, включающая наблюдения фона неба и контрольной звезды. Наблюдения в Боливии проводились на 60-см телескопе советско-боливийской обсерватории

с 12 июля по 14 октября (31 наблюдательная ночь). Использовался поляриметр, позволяющий измерять все 4 параметра Стокса [17]. Редукция фотометрических наблюдений в систему *UBVR* проведена с коэффициентами, найденными по наблюдениям звезд сравнения: HD 131749 и BD —4<sup>3</sup> 1028 в области UX Ori и двух стандартов: 94—305 и 94—308 кооперативной программы В. Хербста. Результаты наблюдений даны в табл. 1—2 и на рис. 1—4.

Как следует из рис. 1 и табл. 3, где представлена наиболее плотная во времени часть патрульных наблюдений, уже первый минимум UX Ori, наблюдавшийся 15—17 июля, сопровождался увеличением линейной поляризации до  $\approx 7\%$  в полосе *V*. Следующий глубокий минимум был зарегистрирован независимо в Крыму и в Боливии. Наибольшее ослабление блеска наблюдалось в Крыму 28/29 сентября и вновь поляризация в полосе *V* увеличилась до  $\approx 7\%$ . Вне минимумов поляризация UX Ori составляла около 0.5—1% и, как показали наблюдения соседних звезд, заметная часть ее является межзвездной.

Рост степени поляризации сопровождался сильным изменением зависимости  $P_\lambda$  (рис. 2), отражающим изменение соотношения между величиной собственной и межзвездной поляризации, а также изменение вклада поляризованной и неполяризованной составляющих в разные полосы. Обращает также на себя внимание большая амплитуда изменений угла линейной поляризации, составляющая около  $70^\circ$  и обусловленная, по-видимому, различиями в ориентации собственной (переменной) и межзвездной поляризации. В глубоких минимумах, во время которых собственная поляризация звезды была значительно больше межзвездной, угол  $\theta_V$  в обоих случаях был примерно одинаков:  $\theta_V = 125.5^\circ \pm 1.6^\circ$  (16/17 июля) и  $\theta_V = 128.2^\circ \pm 0.8^\circ$  (28/29 сентября).

Несмотря на большую амплитуду изменений параметров поляризации и значительный разброс точек на диаграмме  $P_V/V$  (рис. 3), степень поляризации  $P_V$  и угол  $\theta_V$  в самой глубокой части обоих минимумов оказались близкими по величине. Это дает основания предполагать, что источник поляризованного излучения от минимума к минимуму не меняется, а наблюдаемый рост степени поляризации достигается в основном за счет уменьшения интенсивности неполяризованного излучения.

В табл. 2 и в нижней части рис. 1 приведены результаты измерений круговой поляризации UX Ori. Видно, что в промежутках между минимумами она близка к нулю. В первом минимуме зарегистрировано увеличение круговой поляризации до  $q_{\max} = 1.33 \pm 0.30\%$  (13/14.07). Наиболее глубокая часть сентябрьского минимума в Боливии была пропущена (из-за погодных условий). Однако на выходе из минимума (30/1.09) круговая поляризация наблюдалась в четырех полосах *UBVR* и в каждой из них зарегистрировано ее повышение на уровне 2—2.5%.

## ФОТОМЕТРИЯ И ПОЛЯРИМЕТРИЯ UX Oгi (Крым)

| Дата        | $\frac{D}{2446000 \pm}$ | $\Phi$ | $m$                 | $P$ (%) | $\sigma$ | $\theta^\circ$ | $\varphi$ | $N$ | Условия |
|-------------|-------------------------|--------|---------------------|---------|----------|----------------|-----------|-----|---------|
| 1           | 2                       | 3      | 4                   | 5       | 6        | 7              | 8         | 9   | 10      |
| 5/6.02.86   | 467.33                  | $U$    | 10 <sup>m</sup> .47 | 0.50    | 0.13     | 112.0          | 4.6       | 4   |         |
|             |                         | $B$    | 10.20               | 0.56    | 0.08     | 114.8          | 3.7       |     |         |
|             |                         | $V$    | 9.86                | 0.72    | 0.14     | 115.3          | 5.4       |     |         |
|             |                         | $R$    | 9.85                | 0.95    | 0.09     | 115.5          | 2.6       |     |         |
|             |                         | $I$    | 9.63                | 1.32    | 0.10     | 118.8          | 1.7       |     |         |
| 28/1.03.86  | 490.20                  | $U$    | 11.76               | 3.54    | 0.31     | 132.3          | 2.5       | 8   |         |
|             |                         | $B$    | 11.32               | 2.67    | 0.09     | 127.2          | 0.7       |     |         |
|             |                         | $V$    | 10.81               | 2.51    | 0.11     | 124.1          | 1.2       |     |         |
|             |                         | $R$    | 10.63               | 2.47    | 0.07     | 120.7          | 0.8       |     |         |
|             |                         | $I$    | 10.29               | 2.48    | 0.10     | 118.3          | 1.1       |     |         |
| 28/29.09.86 | 702.55                  | $U$    | 12.36               | 6.67    | 0.32     | 130.9          | 1.4       | 11  |         |
|             |                         | $B$    | 11.98               | 6.93    | 0.16     | 128.7          | 0.7       |     |         |
|             |                         | $V$    | 11.59               | 7.37    | 0.21     | 128.7          | 0.8       |     |         |
|             |                         | $R$    | 11.34               | 5.67    | 0.15     | 133.1          | 0.8       |     |         |
|             |                         | $I$    | 10.92               | 4.02    | 0.15     | 140.4          | 1.1       |     |         |
| 1/2.10.86   | 705.57                  | $U$    | 11.35               | 1.39    | 0.21     | 142.5          | 4.2       | 8   |         |
|             |                         | $B$    | 10.99               | 1.27    | 0.08     | 148.9          | 1.9       |     |         |
|             |                         | $V$    | 10.51               | 0.81    | 0.10     | 145.9          | 3.5       |     |         |
|             |                         | $R$    | 10.32               | 0.89    | 0.06     | 162.7          | 2.0       |     |         |
|             |                         | $I$    | 10.00               | 0.89    | 0.07     | 161.6          | 2.2       |     |         |
| 4/5.10.86   | 708.56                  | $U$    | 10.99               | 1.06    | 0.19     | 7.4            | 5.0       | 8   |         |
|             |                         | $B$    | 1 <sup>m</sup> .64  | 0.88    | 0.07     | 178.4          | 2.3       |     |         |
|             |                         | $V$    | 10.21               | 0.80    | 0.13     | 178.0          | 4.8       |     |         |
|             |                         | $R$    | 10.09               | 0.70    | 0.05     | 173.9          | 2.0       |     |         |
|             |                         | $I$    | 9.85                | 0.63    | 0.09     | 165.9          | 4.1       |     |         |
| 23/24.10.86 | 727.58                  | $U$    | 11.99               | 3.93    | 0.25     | 140.1          | 1.9       | 8   |         |
|             |                         | $B$    | 11.58               | 3.36    | 0.09     | 147.3          | 0.8       |     |         |
|             |                         | $V$    | 11.02               | 2.92    | 0.13     | 153.4          | 1.3       |     |         |
|             |                         | $R$    | 10.77               | 2.11    | 0.08     | 157.7          | 1.1       |     |         |
|             |                         | $I$    | 10.33               | 1.67    | 0.08     | 161.1          | 1.4       |     |         |
| 24/25.11.86 | 759.48                  | $U$    | 11.78               | 3.37    | 0.23     | 128.0          | 1.9       | 8   |         |
|             |                         | $B$    | 11.42               | 2.67    | 0.11     | 133.0          | 1.2       |     |         |
|             |                         | $V$    | 10.86               | 1.76    | 0.11     | 139.0          | 1.8       |     |         |
|             |                         | $R$    | 10.55               | 1.30    | 0.07     | 139.1          | 1.6       |     |         |
|             |                         | $I$    | 10.14               | 0.94    | 0.09     | 141.6          | 2.8       |     |         |

Таблица 1 (продолжение)

| 1           | 2      | 3        | 4                   | 5    | 6    | 7     | 8   | 9  | 10 |
|-------------|--------|----------|---------------------|------|------|-------|-----|----|----|
| 26/27.11.86 | 761.48 | <i>U</i> | 11. <sup>m</sup> 93 | 3.59 | 0.26 | 124.7 | 2.1 | 12 |    |
|             |        | <i>B</i> | 11.56               | 3.05 | 0.10 | 124.9 | 0.9 |    |    |
|             |        | <i>V</i> | 11.05               | 2.62 | 0.11 | 126.1 | 1.2 |    |    |
|             |        | <i>R</i> | 10.81               | 2.11 | 0.07 | 126.4 | 1.0 |    |    |
|             |        | <i>I</i> | 10.42               | 1.70 | 0.11 | 123.9 | 1.8 |    |    |
| 1/2.12.86   | 766.59 | <i>U</i> |                     | 1.60 | 0.36 | 144.1 | 6.4 | 8  |    |
|             |        | <i>B</i> | 10.82               | 1.39 | 0.12 | 153.0 | 2.4 |    |    |
|             |        | <i>V</i> | 10.30               | 1.59 | 0.30 | 161.5 | 5.3 |    |    |
|             |        | <i>R</i> | 10.14               | 1.37 | 0.12 | 152.7 | 2.6 |    |    |
|             |        | <i>I</i> | 9.84                | 1.43 | 0.26 | 153.1 | 5.3 |    |    |
| 15/16.12.86 | 780.35 | <i>U</i> | 10.78               | 0.93 | 0.23 | 135.2 | 6.8 | 8  | 2  |
|             |        | <i>B</i> | 10.46               | 1.10 | 0.08 | 144.3 | 2.1 |    |    |
|             |        | <i>V</i> | 10.02               | 0.96 | 0.09 | 146.9 | 2.6 |    |    |
|             |        | <i>R</i> | 9.88                | 0.90 | 0.05 | 134.8 | 1.6 |    |    |
|             |        | <i>I</i> | 9.64                | 0.89 | 0.08 | 132.4 | 2.5 |    |    |
| 5/6.02.87   | 832.37 | <i>U</i> | 11.12               | 2.55 | 0.21 | 121.3 | 2.4 | 4  |    |
|             |        | <i>B</i> | 10.79               | 2.93 | 0.13 | 131.2 | 1.3 |    |    |
|             |        | <i>V</i> | 10.29               | 2.83 | 0.13 | 130.2 | 1.4 |    |    |
|             |        | <i>R</i> | 10.11               | 2.56 | 0.06 | 126.9 | 0.6 |    |    |
|             |        | <i>I</i> | 9.81                | 2.45 | 0.09 | 127.8 | 1.0 |    |    |
| 15/16.02.87 | 842.23 | <i>U</i> | 11.36               | 2.92 | 0.24 | 115.6 | 2.3 | 12 |    |
|             |        | <i>B</i> | 10.98               | 2.88 | 0.09 | 119.4 | 0.9 |    |    |
|             |        | <i>V</i> | 10.47               | 2.58 | 0.12 | 119.1 | 1.3 |    |    |
|             |        | <i>R</i> | 10.26               | 2.20 | 0.06 | 116.6 | 0.7 |    |    |
|             |        | <i>I</i> | 9.91                | 2.10 | 0.08 | 116.8 | 1.1 |    |    |
| 20/21.02.87 | 847.32 | <i>U</i> | 11.06               | 3.17 | 0.25 | 113.5 | 2.3 | 8  | 1  |
|             |        | <i>B</i> | 10.85               | 3.03 | 0.11 | 112.4 | 1.0 |    |    |
|             |        | <i>V</i> | 10.37               | 2.70 | 0.14 | 114.3 | 1.4 |    |    |
|             |        | <i>R</i> | 10.13               | 2.55 | 0.09 | 108.1 | 1.0 |    |    |
|             |        | <i>I</i> | 9.87                | 2.27 | 0.12 | 110.8 | 1.6 |    |    |
| 23/24.02.87 | 850.21 | <i>U</i> |                     | 2.96 | 0.31 | 103.3 | 3.0 | 5  | 1  |
|             |        | <i>B</i> |                     | 3.37 | 0.18 | 103.5 | 1.5 |    |    |
|             |        | <i>V</i> |                     | 2.87 | 0.40 | 100.0 | 4.0 |    |    |
|             |        | <i>R</i> |                     | 2.96 | 0.13 | 96.9  | 1.2 |    |    |
|             |        | <i>I</i> |                     | 2.51 | 0.16 | 100.4 | 1.8 |    |    |

Таблица 1 (окончание)

| 1           | 2      | 3        | 4                   | 5    | 6    | 7     | 8    | 9 | 10 |
|-------------|--------|----------|---------------------|------|------|-------|------|---|----|
| 25/26.02.87 | 852.27 | <i>U</i> | 11 <sup>m</sup> .33 | 3.13 | 0.19 | 100.8 | 1.7  | 8 |    |
|             |        | <i>B</i> | 10.98               | 3.43 | 0.03 | 102.0 | 0.7  |   |    |
|             |        | <i>V</i> | 10.46               | 3.18 | 0.13 | 100.2 | 1.2  |   |    |
|             |        | <i>R</i> | 10.25               | 3.08 | 0.09 | 97.3  | 0.8  |   |    |
|             |        | <i>I</i> | 9.89                | 2.64 | 0.08 | 101.1 | 0.9  |   |    |
| 26/27.02.87 | 853.26 | <i>U</i> | 11.26               | 3.15 | 0.19 | 102.9 | 1.7  | 8 | 2  |
|             |        | <i>B</i> | 10.92               | 3.26 | 0.09 | 102.0 | 0.5  |   |    |
|             |        | <i>V</i> | 10.42               | 2.97 | 0.14 | 104.6 | 1.3  |   |    |
|             |        | <i>R</i> | 10.19               | 2.87 | 0.08 | 100.5 | 0.8  |   |    |
|             |        | <i>I</i> | 9.85                | 2.60 | 0.10 | 102.7 | 1.1  |   |    |
| 27/28.02.87 | 854.22 | <i>U</i> | 11.11               | 2.96 | 0.61 | 119.9 | 5.9  | 6 | 3  |
|             |        | <i>B</i> | 10.71               | 3.24 | 0.16 | 101.6 | 1.5  |   |    |
|             |        | <i>V</i> | 10.18               | 2.70 | 0.40 | 99.4  | 4.2  |   |    |
|             |        | <i>R</i> | 10.02               | 2.52 | 0.21 | 100.3 | 2.4  |   |    |
|             |        | <i>I</i> | 9.64                | 2.30 | 0.20 | 107.0 | 2.5  |   |    |
| 28/1.03.87  | 855.26 | <i>U</i> | 11.33               | 3.46 | 0.29 | 103.8 | 2.4  | 8 |    |
|             |        | <i>B</i> | 10.97               | 2.81 | 0.12 | 102.2 | 1.2  |   |    |
|             |        | <i>V</i> | 10.44               | 2.69 | 0.16 | 103.3 | 1.7  |   |    |
|             |        | <i>R</i> | 10.26               | 2.23 | 0.14 | 101.0 | 1.8  |   |    |
|             |        | <i>I</i> | 9.91                | 2.01 | 0.17 | 105.5 | 2.8  |   |    |
| 29/30.03.87 | 884.23 | <i>U</i> |                     | 1.62 | 0.83 | 90.0  | 13.5 | 6 | 1  |
|             |        | <i>B</i> |                     | 2.75 | 0.24 | 102.3 | 2.0  |   |    |
|             |        | <i>V</i> |                     | 2.63 | 0.29 | 94.5  | 3.1  |   |    |
|             |        | <i>R</i> |                     | 2.42 | 0.15 | 102.4 | 1.7  |   |    |
|             |        | <i>I</i> |                     | 2.68 | 0.18 | 103.0 | 1.7  |   |    |
| 30/31.03.87 | 885.23 | <i>U</i> | 11.22               | 3.52 | 0.53 | 103.6 | 4.3  | 8 | 2  |
|             |        | <i>B</i> | 10.81               | 2.98 | 0.24 | 96.6  | 2.3  |   |    |
|             |        | <i>V</i> | 10.26               | 2.44 | 0.20 | 102.1 | 2.3  |   |    |
|             |        | <i>R</i> | 10.12               | 2.19 | 0.20 | 99.7  | 2.6  |   |    |
|             |        | <i>I</i> | 9.90                | 1.70 | 0.23 | 102.5 | 3.8  |   |    |

Примечания. 1 — Временами облака; 2 — циррусы; 3 — плохие изображения ( $\approx 10^\circ$ ).

Таблица 2

## ФОТОМЕТРИЯ И ПОЛЯРИМЕТРИЯ UX Ori (Боливия)

| Дата     | ID<br>2446000+ | $\Phi$ | $V$                | $P$ (%) | $\sigma$ | $\theta^\circ$ | $\sigma$ | $q$ (%) | $\sigma$ | Условия |
|----------|----------------|--------|--------------------|---------|----------|----------------|----------|---------|----------|---------|
| 1        | 2              | 3      | 4                  | 5       | 6        | 7              | 8        | 9       | 10       | 11      |
| 1986 г.  |                |        |                    |         |          |                |          |         |          |         |
| 12/13.07 | 623.9          | $V$    | 11 <sup>m</sup> 6: | 2.08    | 0.43     | 141.7          | 5.9      | 0.87    | 0.30     |         |
| 13/14.07 | 624.9          | $V$    | 11.8:              | 3.31    | 0.43     | 134.7          | 3.7      | 1.33    | 0.30     |         |
| 14/15.07 | 625.9          | $V$    | 10.9:              | 2.51    | 0.25     | 125.7          | 2.8      | -0.10   | 0.17     |         |
| 15/16.07 | 626.8          | $V$    | 12.32              | 5.09    | 0.75     | 125.9          | 4.2      | 1.18    | 0.53     | 1       |
| 16/17.07 | 627.9          | $V$    | 12.12              | 7.17    | 0.41     | 125.5          | 1.6      | 0.21    | 0.29     |         |
| 6/7.08   | 648.8          | $B$    |                    | 0.93    | 0.28     | 179.3          | 8.6      | -0.01   | 0.20     |         |
|          |                | $V$    | 10.17              | 0.88    | 0.23     | 5.9            | 7.5      | 0.05    | 0.16     |         |
|          |                | $R$    |                    | 0.82    | 0.40     | 0.0            | 14       | 0.05    | 0.29     |         |
| 7/8.08   | 649.8          | $B$    |                    | 1.04    | 0.28     | 174.8          | 7.7      | -0.20   | 0.20     |         |
|          |                | $V$    | 10.14              | 0.81    | 0.28     | 179.4          | 10       | 0.11    | 0.20     |         |
|          |                | $R$    |                    | 0.97    | 0.29     | 5.6            | 8.6      | 0.39    | 0.20     |         |
| 8/9.08   | 650.9          | $B$    |                    | 0.58    | 0.28     | 173.6          | 14       | 0.04    | 0.20     |         |
|          |                | $V$    | 10.06              | 0.51    | 0.28     | 172.3          | 16       | -0.06   | 0.20     |         |
|          |                | $R$    |                    | 0.14    | 0.24     | 151.3          | 18       | -0.03   | 0.17     |         |
| 9/10.08  | 651.8          | $B$    |                    | 0.57    | 0.28     | 11.6           | 14       | -0.29   | 0.20     |         |
|          |                | $V$    | 10.12              | 0.90    | 0.23     | 2.8            | 7.4      | 0.15    | 0.16     |         |
|          |                | $R$    |                    | 0.81    | 0.29     | 177.7          | 10       | 0.18    | 0.20     |         |
| 13/14.08 | 655.8          | $B$    |                    | 1.06    | 0.28     | 174.9          | 7.6      | -0.05   | 0.20     | 1       |
|          |                | $V$    |                    | 1.08    | 0.28     | 8.9            | 7.5      | -0.30   | 0.20     |         |
|          |                | $R$    |                    | 1.14    | 0.29     | 178.2          | 7.2      | -0.06   | 0.20     |         |
| 14/15.08 | 656.8          | $B$    |                    | 1.45    | 0.30     | 1.4            | 5.9      | 0.35    | 0.21     |         |
|          |                | $V$    | 10.18              | 1.24    | 0.31     | 177.4          | 7.1      | 0.10    | 0.22     |         |
|          |                | $R$    |                    | 1.01    | 0.33     | 169.0          | 9.4      | 0.03    | 0.24     |         |
| 23/24.08 | 665.8          | $V$    |                    | 1.19    | 0.24     | 175.7          | 5.7      | 0.17    | 0.17     | 1       |
| 25/26.08 | 667.8          | $V$    |                    | 1.63    | 0.41     | 178.1          | 7.2      | -0.03   | 0.29     | 1       |
| 26/27.08 | 668.8          | $V$    | 10.34              | 1.66    | 0.22     | 167.5          | 3.8      | 0.24    | 0.16     |         |
| 27/28.08 | 669.8          | $V$    | 10.37              | 1.43    | 0.17     | 177.3          | 3.4      | -0.12   | 0.12     |         |
|          |                | $R$    |                    | 0.91    | 0.24     | 179.1          | 7.6      | -0.07   | 0.17     |         |
| 31/1.08  | 673.9          | $B$    |                    | 2.11    | 0.28     | 151.4          | 3.8      | 0.12    | 0.20     |         |
|          |                | $V$    | 10.74              | 1.91    | 0.20     | 161.1          | 3.0      | 0.03    | 0.14     |         |
| 1/2.09   | 674.8          | $V$    |                    | 2.18    | 0.21     | 161.9          | 2.8      | -0.07   | 0.15     | 1       |

Таблица 2 (окончание)

| 1        | 2     | 3        | 4                  | 5    | 6    | 7     | 8   | 9     | 10   | 11 |
|----------|-------|----------|--------------------|------|------|-------|-----|-------|------|----|
| 1986 г.  |       |          |                    |      |      |       |     |       |      |    |
| 3/4.09   | 676.8 | <i>B</i> |                    | 3.38 | 0.26 | 142.8 | 2.2 | -0.07 | 0.18 | 1  |
|          |       | <i>V</i> |                    | 3.23 | 0.20 | 146.6 | 1.8 | -0.04 | 0.14 |    |
|          |       | <i>R</i> |                    | 3.11 | 0.25 | 153.0 | 2.3 | -0.56 | 0.18 |    |
| 6/7.09   | 679.8 | <i>B</i> |                    | 2.20 | 0.20 | 139.8 | 2.6 | 0.25  | 0.14 |    |
|          |       | <i>V</i> | 10 <sup>m</sup> 52 | 2.58 | 0.20 | 151.0 | 2.2 | 0.00  | 0.14 |    |
|          |       | <i>R</i> |                    | 2.37 | 0.24 | 144.1 | 2.9 | 0.01  | 0.17 |    |
| 7/8.09   | 680.8 | <i>V</i> | 10.5:              | 1.82 | 0.20 | 154.6 | 3.2 | 0.04  | 0.14 |    |
| 8/9.09   | 681.7 | <i>V</i> | 10.8:              | 1.87 | 0.20 | 156.0 | 3.1 | 0.22  | 0.14 |    |
| 30/1.09  | 703.7 | <i>U</i> |                    | 6.30 | 0.72 | 128.4 | 3.2 | 1.35  | 0.51 |    |
|          |       | <i>B</i> |                    | 4.80 | 0.29 | 130.3 | 1.7 | 0.41  | 0.20 |    |
|          |       | <i>V</i> | 11.2:              | 3.80 | 0.30 | 137.0 | 2.2 | 0.40  | 0.21 |    |
|          |       | <i>R</i> |                    | 3.80 | 0.30 | 135.9 | 2.2 | 0.50  | 0.21 |    |
| 1/2.10   | 704.7 | <i>V</i> |                    | 2.38 | 0.18 | 151.3 | 2.2 | -0.18 | 0.31 | 1  |
|          | .8    | <i>V</i> |                    | 1.64 | 0.15 | 149.8 | 2.6 | 0.01  | 0.10 |    |
| 2/3.10   | 705.7 | <i>V</i> |                    | 1.14 | 0.20 | 153.1 | 5.1 | 0.16  | 0.14 | 1  |
| 3/4.10   | 706.7 | <i>V</i> |                    | 1.99 | 0.14 | 139.4 | 2.1 | 0.03  | 0.10 | 1  |
| 4/5.10   | 707.8 | <i>V</i> |                    | 0.62 | 0.14 | 166.6 | 6.5 | -0.26 | 0.10 | 1  |
|          |       | <i>R</i> |                    | 0.58 | 0.20 | 173.3 | 10  | -0.35 | 0.14 |    |
| 5/6.10   | 708.8 | <i>V</i> |                    | 0.71 | 0.12 | 179.9 | 4.8 | 0.13  | 0.08 | 1  |
| 11/12.10 | 714.2 | <i>V</i> |                    | 2.41 | 0.29 | 155.1 | 3.5 | 0.15  | 0.20 | 1  |
| 14/15.10 | 717.2 | <i>V</i> |                    | 0.90 | 0.15 | 15.0  | 4.6 | 0.20  | 0.10 | 1  |

Примечания. 1—Временами облака; (:)—оценка блеска сделана по наблюдаемой скорости счета фотонов в полосе *V* с точностью  $\pm 0^m10$ ; *q* — знак круговой поляризации определен в инструментальной системе.

Учитывая большие ошибки в определении *q* и неоднозначный характер ее поведения (максимуму линейной поляризации в июльском минимуме соответствовала  $q \approx 0$ ), мы можем на основании проведенных наблюдений констатировать лишь наличие тенденции к увеличению круговой поляризации в минимумах блеска. Максимальное наблюдавшееся значение *q* (1.33%) является рекордным для звезд этого типа и родственных объектов (см. [18]) и нуждается в независимом подтверждении.

3. Выбор модели. Хотя наблюдаемая зависимость поляризации UX Ori от блеска подтверждает предсказания модели [14], основанной на пылевой концепции, мы обсудим ниже также альтернативные возможности интерпретации наблюдений.

а) *Электронное рассеяние в околозвездной газовой оболочке.* По оценкам Е. А. Колотилова [11] скорость вращения околозвездной газовой оболочки UX Ori, найденная по профилю линии  $H_2$ , составляет около 300 км/с. Такая оболочка должна быть несферической, а излучение звезды, рассеянное на свободных электронах — линейно поляризованным.

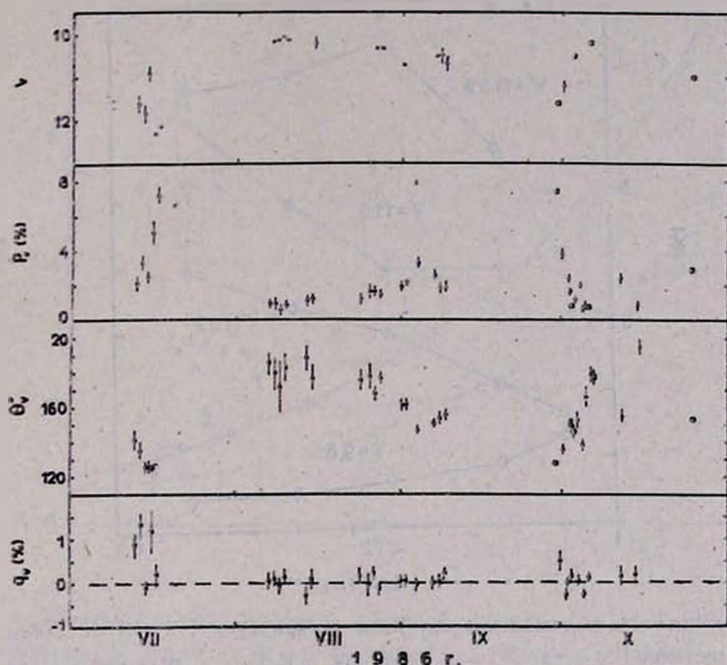


Рис. 1. Изменения блеска, линейной и круговой поляризации UX Ori в полосе V по данным боливийских (●) и крымских (○) наблюдений в период с 12. VII. 86 по 23. X. 86.

Для оценки степени поляризации воспользуемся значением меры эмиссии газовой оболочки UX Ori, найденной в [5] по бальмеровскому скачку:

$$E = R_*^{-2} \int_V n_e n^+ dv = 5.1 \cdot 10^{35} \text{ см}^{-5}. \quad (1)$$

Допустим, что оболочка однородна и имеет форму сплюснутого сфероида с большой полуосью  $A$  и малой полуосью  $B$ . Ее объем  $V = (4/3)\pi A^2 B$ , оптическая толщина по электронному рассеянию:  $\tau_T = \sigma_T n_e A$ . Отсюда с учетом (1) получаем:

$$\tau_T = 0.1 (B/R_*)^{-1/2} < 0.1, \quad (2)$$

где принято во внимание, что радиус UX Ori равен:  $R_* = 2.8 R_\odot$  [5].

При  $\tau_T = 0.1$  теоретический верхний предел степени поляризации (в приближении точечного источника при  $A/B \simeq 4$  и  $\sin i = 1$ ) равен [19]:  $P_{\max} (\%) = 6.9 \tau_T \simeq 0.7\%$  — вне минимума, и  $P_{\max} < 4\%$  — при ослаблении блеска на две величины.

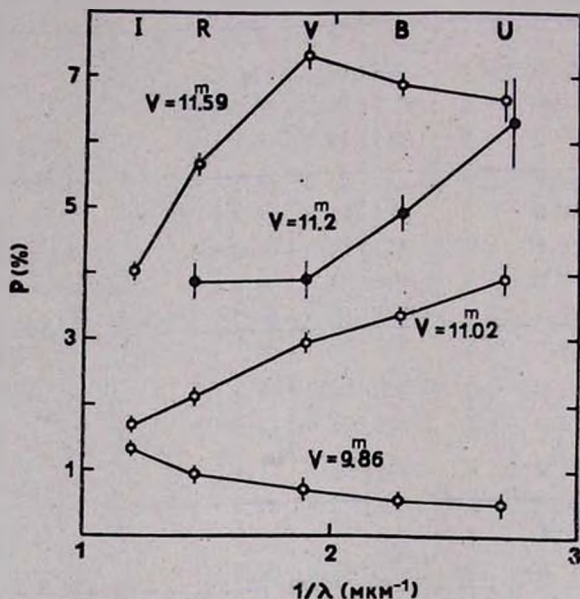


Рис. 2. Зависимость наблюдаемой линейной поляризации UX Ori от длины волны для четырех состояний блеска.  $\circ$  — наблюдения в Крыму,  $\bullet$  — наблюдения в Бразилии.

По данным табл. 1 при таком же ослаблении блеска UX Ori наблюдаемая поляризация равна 7.4%, что заметно выше теоретического верхнего предела. При этом необходимо иметь в виду, что в реальных условиях из-за градиента плотности газа в оболочке основной вклад в рассеянное излучение дают ее внутренние слои. Поэтому при покрытии звезды пылевым облаком существует большая вероятность того, что в минимуме блеска от наблюдателя будет одновременно закрыта и внутренняя часть газовой оболочки, в результате чего вклад рассеянного излучения будет существенно ослаблен. Реальность этой ситуации подтверждает тот факт, что в минимумах UX Ori, несмотря на увеличение  $\dot{M}_{\text{H}_2}$ , абсолютное значение потока  $F_{\text{H}_2}$  в несколько раз меньше, чем в нормальном состоянии (см. рис. 5 в [11]).

С учетом сказанного линейная поляризация UX Ori в минимумах блеска, обусловленная электронным рассеянием, должна быть в несколько раз

меньше полученного выше теоретического верхнего предела, что совершенно недостаточно для объяснения результатов наблюдений. Кроме того, модель с электронным рассеянием не дает никаких указаний относительно круговой поляризации, тенденция к увеличению которой в минимумах UX Ori обнаружена в ходе боливийских наблюдений.

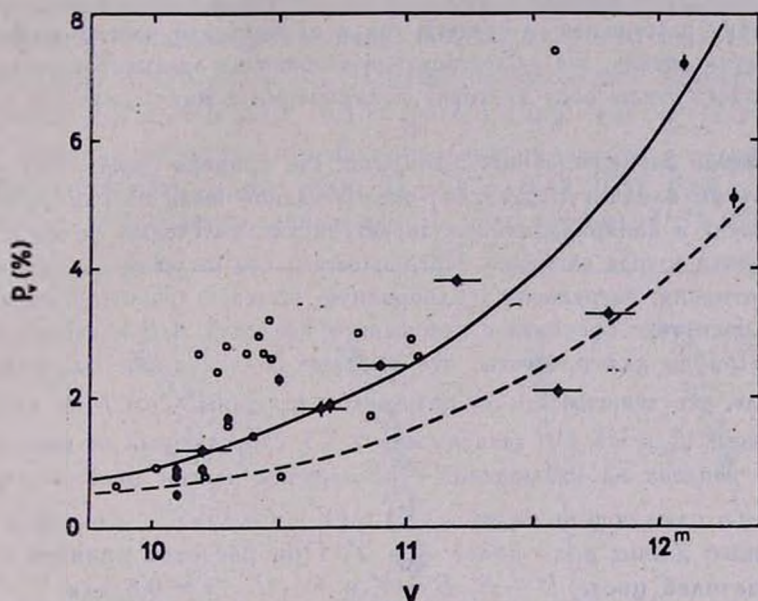


Рис. 3. Зависимость наблюдаемой линейной поляризации UX Ori от блеска. О — наблюдения в Крыму, ● — наблюдения в Боливии. Кривые — результаты расчетов для модели с  $A/B = 4$ ,  $\tau_0^{\text{ext}}(U) = 0.5$ . Сплошная линия —  $n_{S1}/n_C = 1.07$ ,  $a_- = 0.04$  мкм,  $a_+ = 0.15$  мкм; пунктир — стандартная смесь MRN.

6) *Пылевая модель* образования линейной поляризации является, по-видимому, единственной альтернативой электронному рассеянию и опирается на фундаментальный наблюдательный факт: существование заметных избытков ИК-излучения у молодых звезд, обусловленных пылевыми оболочками. В частности, по данным [5] температура пыли в оболочке UX Ori  $T_d = 1350$  К. Внутренний радиус оболочки порядка нескольких астрономических единиц, а ИК-светимость составляет около 13% полной светимости звезды в нормальном состоянии.

В рамках пылевой модели поляризация излучения может возникнуть при рассеянии излучения звезды в несферической пылевой оболочке, а также при прохождении излучения звезды сквозь облако, состоящее из ориентированных частиц.

Как уже отмечалось в разделе 2, сходство параметров линейной поляризации в обоих минимумах UX Ori свидетельствует о стабильности источ-

ника поляризованного излучения, что характерно для первого механизма и требует довольно искусственных предположений о сходстве оптических параметров двух различных пылевых образований, пересекающих луч зрения,— в рамках второго механизма. Что касается наблюдаемого разброса точек на графике  $P_V/V$  (рис. 3), то он может быть обусловлен как ключковой структурой вращающейся пылевой оболочки (создающей переменную засветку рассеивающей среды), так и ориентацией частиц в облаках, закрывающих звезду. На существование в оболочке ориентированных частиц указывает также рост круговой поляризации в минимумах UX Ori.

4. *Модель алголеподобного минимума.* На примере упрощенной модели рассмотрим влияние параметров околозвездной пыли на изменение фотометрических и поляризационных характеристик излучения системы звезда + оболочка в ходе затмения. Предположим, что пылевые облака, вызывающие затмения, погружены в однородную пылевую оболочку, имеющую форму сплюснутого сфероида с отношением полуосей  $A/B$  и наблюдаемую с ребра. Примем для простоты, что пылевые облака также однородны в том смысле, что зависимость их оптической толщины  $\tau_1$  от  $\lambda$  не меняется при затмении. Для UX Ori зависимость  $\tau_1(\lambda)$  (усредненная по многим минимумам) найдена из наблюдений — по верхним частям цветовых треков (рис. 4) — в следующем виде:  $\tau_1(X)/\tau_1(Y) \sim (\lambda_X/\lambda_Y)^{-\alpha}$ , где  $\lambda_X$  и  $\lambda_Y$  — эффективные длины волн полос  $X$  и  $Y$ . При расчетах принято  $\alpha=1.5$  для показателей цвета  $U-B$ ,  $B-V$  и  $R-I$  и  $\alpha=0.6$  для  $V-R$ .

Степень линейной поляризации  $P_\lambda$  и показатели цвета  $\Delta(X-Y) = (X-Y) - (X-Y)_0$ , где  $(X-Y)_0$  — показатели цвета при  $\tau_1=0$ , — вычислялись по формулам:

$$P_\lambda = \frac{\langle I_1(\lambda) \rangle - \langle I_2(\lambda) \rangle}{e^{-\tau_1(\lambda)} + \langle I(\lambda) \rangle}, \quad (3)$$

$$\Delta(X-Y) = 2.5 \lg \frac{[e^{-\tau_1(\lambda_Y)} + \langle I(\lambda_Y) \rangle][1 + \langle I(\lambda_X) \rangle]}{[e^{-\tau_1(\lambda_X)} + \langle I(\lambda_X) \rangle][1 + \langle I(\lambda_Y) \rangle]}, \quad (4)$$

$$\langle I(\lambda) \rangle = \langle I_1(\lambda) \rangle + \langle I_2(\lambda) \rangle, \quad (5)$$

где  $\langle I_1 \rangle$  и  $\langle I_2 \rangle$  — усредненные по ансамблю частиц и по объему оболочки потоки поляризованного излучения.

Расчеты выполнялись в приближении однократного рассеяния без учета ослабления света в оболочке. Оптические свойства пылинок вычислялись по теории Ми. За основу принята графито-силикатная смесь сферических пылинок MRN [20], которая хорошо воспроизводит среднюю кривую межзвездного поглощения для ансамбля частиц с радиусом от  $a_- =$

$= 0.005$  мкм до  $a_+ = 0.25$  мкм, степенным распределением по размерам:  $n(a) \sim a^{-3.5}$  и отношением числа силикатных пылинок к графитовым:  $n_{Si}/n_C = 1.07$  (стандартная смесь). Учитывая, однако, что за время жизни звезды ( $\approx 10^6$  лет [5]) первичный состав околосредней пыли мог измениться под действием ряда факторов (световое давление, испарение, коагуляция и т. д.), расчеты проводились для более широкого набора параметров частиц:  $0.005 \leq a_- \leq 0.10$  мкм,  $0.10 \leq a_+ \leq 0.50$  мкм,  $0 \leq n_{Si}/n_C \leq \infty$ . Параметры оболочки варьировались в пределах:  $1.5 \leq A/B \leq 10$ ,  $0.1 \leq \tau_0^{ext}(U) \leq 0.5$ , где  $\tau_0^{ext}(U)$  — оптическая толщина оболочки в экваториальной плоскости в полосе  $U$ . Рассматривались пять длин волн:  $\lambda = 0.36, 0.44, 0.53, 0.69$  и  $0.83$  мкм; соответствующих эффективным длинам волн системы  $UBVRI$  в Крыму.

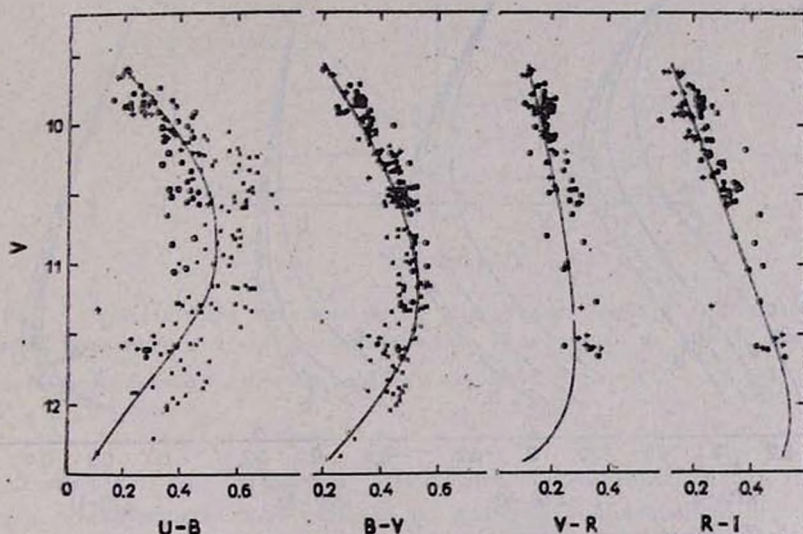


Рис. 4. Диаграммы цвет-величина для UX Ori по данным настоящей статьи (о), Зайцевой [1] (х), Хербста и др. [7] (□), Килкенни и др. [8] (+). Теоретические линии соответствуют модели с  $A/B = 4$ ,  $\tau_0^{ext}(U) = 0.5$ ,  $n_{Si}/n_C = 1.07$ .  $a_- = 0.04$  мкм,  $a_+ = 0.15$  мкм.

Анализ результатов вычислений показал, что как степень поляризации  $P_\lambda$ , так и показатели цвета (в основном  $U-B$ ,  $B-V$ ) излучения системы звезда + оболочка в разных фазах затмения звезды весьма значительно зависят от всех исходных параметров модели. В качестве примера на рис. 3—6 представлены результаты расчетов для четырех моделей: для стандартной смеси MRN, а также при  $a_- = 0.04$  мкм,  $a_+ = 0.15$  мкм и  $n_{Si}/n_C = 0, 1.07$  и  $\infty$ . Во всех случаях отношение  $A/B = 4$ ,  $\tau_0^{ext}(U) =$

$= 0.5$ . Видно, что модели только с силикатными или графитовыми частицами дают зависимости  $P_i$  в минимумах блеска, сильно отличающиеся от наблюдаемой (рис. 2). Наилучшую подгонку к наблюдениям обеспечивает модель, в которой отношение  $n_{Si}/n_C$  близко к стандартному, но отсутствуют частицы с радиусами  $a \leq 0.04$  мкм. (Заметим, что спутниковые наблюдения Ae/Be-звезд Хербига [21] показывают слабый пик около  $\lambda$  2200 Å и небольшой подъем кривой поглощения в далеком ультрафиолете, что также свидетельствует об отсутствии очень мелких графитовых и силикатных частиц).

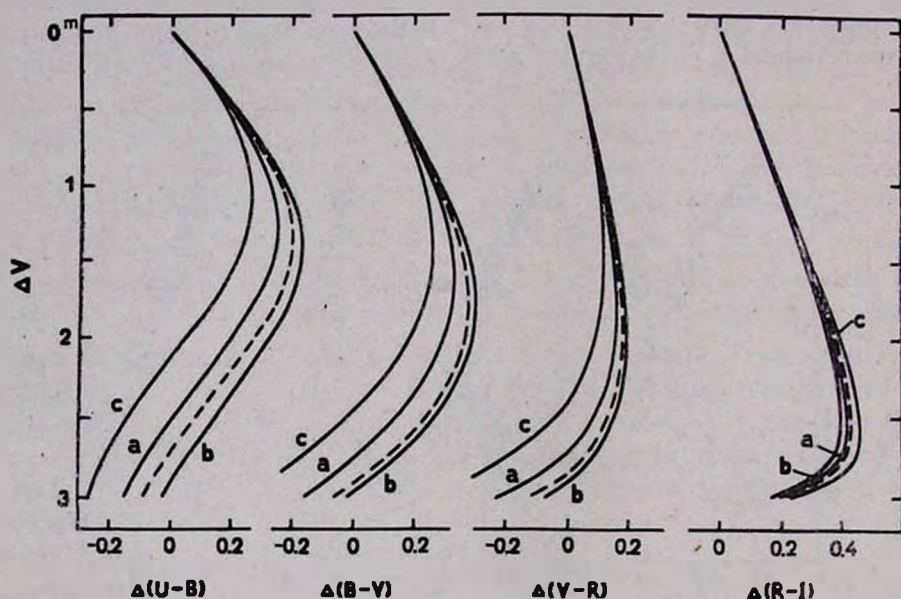


Рис. 5. Теоретические зависимости цвет-величина для четырех моделей албедо-минимума. Параметры оболочки:  $A/B=4$ ,  $\tau_0^{ext}(U)=0.5$ . Сплошные кривые —  $a_- = 0.04$  мкм,  $a_+ = 0.15$  мкм ( $a - n_{Si}/n_C = 1.07$ ,  $b - n_{Si}/n_C = 0$ ,  $c - n_{Si}/n_C = \infty$ ). Пунктир — стандартная смесь MRN.

Для этой модели можно оценить лучевую концентрацию  $N_d \approx 10^{10}$  см $^{-2}$  и массу  $M_d \approx 10^{28}$  г — пылинок в рассеивающей оболочке. Последняя оценка сделана в предположении, что внешний радиус оболочки составляет несколько сотен астрономических единиц, то есть такого же порядка, что и по данным спекл-интерферометрических наблюдений пылевых оболочек вокруг молодых звезд малых и промежуточных масс [15]. Из нее следует, что масса пылинок с радиусами  $0.04 \leq a \leq 0.15$  мкм составляет всего около  $10^{-2}$  массы Земли и это означает, что основная часть околозвездно-

го вещества сосредоточена в крупных частицах и, возможно, в планетозималиях.

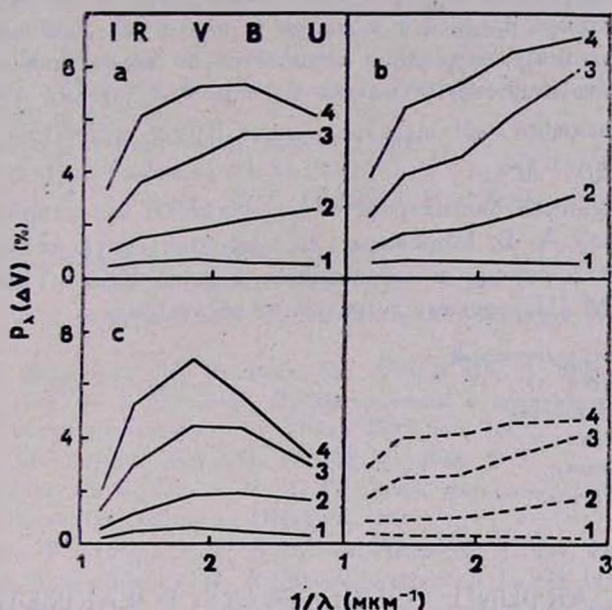


Рис. 6. Теоретические зависимости  $P_\lambda$  для четырех моделей алголеподобных минимумов. Параметры моделей и обозначения — те же, что и на рис. 5. Цифры 1—4 соответствуют разным уровням ослабления блеска: 1— $\Delta V = 0$ , 2— $\Delta V = 1^m$ , 3— $\Delta V = 2^m$ , 4— $\Delta V = 2^m 5$ .

**5. Заключение.** Основным результатом проведенных наблюдений является обнаружение значительной по величине собственной поляризации UX Ori в двух глубоких минимумах блеска. По сообщениям В. И. Кардаполова и др. рост линейной поляризации при ослаблении блеска зарегистрирован недавно также у VV Ser [22] и RR Tau [23]\*. Если учесть, что исследования поляризации звезд этого типа в глубоких минимумах до настоящего времени вообще не проводились, то полученные результаты следует считать весьма обнадеживающими. Расширение подобных наблюдений в будущем (включая наблюдения круговой поляризации) представляет несомненный интерес и может дать новую информацию о свойствах околозвездного вещества в окрестности молодых звезд.

\* В отличие от UX Ori звезды VV Ser и RR Tau наблюдаются на фоне туманностей, излучение которых может исказить собственную поляризацию звезд в минимумах блеска.

В частности, результаты проведенного анализа (которые мы рассматриваем пока как предварительные), показывают, что рассеивающая пылевая оболочка UX Ori сильно сплюснута:  $A/B \approx 4$ . Ее оптическая толщина в экваториальной плоскости в полосе  $U$  около 0.5. Химический состав пылинок, по-видимому, не сильно отличается от химсостава межзвездной пыли. В оболочке отсутствуют мелкие частицы с радиусами  $a < 0.04$  мкм. Масса рассеивающих частиц с радиусами  $0.04 \lesssim a \lesssim 0.15$  мкм порядка (или меньше)  $10^{-2} M_{\odot}$ .

Авторы приносят благодарность руководителю экспедиции ГАО АН УССР в Боливии А. В. Мороженко за предоставленную возможность наблюдать UX Ori и помощь в наблюдениях, а также Ю. Н. Гнедину, Ю. С. Ефимову и Н. М. Шаховскому за полезные обсуждения.

Ленинградский государственный  
университет  
Крымская астрофизическая  
обсерватория  
Институт астрофизики  
АН Тадж.ССР

## DUST AROUND YOUNG STARS. POLARIMETRIC OBSERVATIONS OF UX ORI IN DEEP MINIMA

N. V. VOSHCHINNIKOV, V. P. GRININ, N. N. KISELEV, N. KH. MINIKULOV

By means of the patrol photometric and polarimetric observations of UX Ori, which began in 1986 in the Crimea and Bolivia, two deep minima of brightness were registered. During these minima the growth of the linear polarization (up to 7 %) have been observed and the tendency of increasing the circular polarization (up to 1 %) was noted. The analysis of the observational data showed that the main source of the polarized radiation in the deep minima is the star radiation scattered by the circumstellar dust grains. On the basis of Mie's theory the optical properties of the ellipsoidal dust shells are computed for polydisperse graphitesilicate mixture of the particles and the model of the Algol-type minima is constructed.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Г. В. Зайцева, *Перемен. звезды*, 19, 63, 1973.
2. Г. В. Зайцева, *Астрофизика*, 25, 471, 1986.
3. В. И. Кардополов, Г. К. Филиппов, *Перемен. звезды*, 22, 103, 1985.
4. А. Ф. Пузач, *Астрофизика*, 17, 87, 1981.

5. H. R. E. Tjin A Dje, L. Rentjn, P. S. The, *Astron. and Astrophys.*, 134, 273, 1984.
6. Г. У. Ковальчук, Клянем. в физ. небесных тел, 1, 25, 1985.
7. W. Herbst, J. A. Holtzman, R. S. Klasky, *Astron. J.*, 88, 1648, 1983.
8. D. Kilkeny, D. C. B. Whittet, J. K. Davies, A. Evans, M. F. Bode, E. I. Robson, R. M. Banfheld, *SAAO Circ. No. 9*, 55, 1985.
9. W. Wenzel, in "Non-Periodic Phenomena in Variable Stars", IAU Coll., Acad. Press, 1969, p. 61.
10. R. E. Gershberg, *Astron. Nachr.*, 303, 251, 1982.
11. Е. А. Колотилов, *Астрофизика*, 13, 33, 1977.
12. Г. В. Зайцева, А. Е. Тарасов, А. Г. Щербаков, *Изв. Крым. астрофиз. обсерв.*, 72, 85, 1985.
13. Г. В. Зайцева, *Перемен. звезды*, 22, 181, 1985.
14. В. П. Гринин, *Письма в Астрон. ж.*, 14, 65, 1988.
15. S. Beckwith, B. Zuckerman, M. F. Scrutskie, H. M. Dyck, *Astrophys. J.*, 287, 793, 1984.
16. V. Pitrola, *Ann. Acad. Sci. Fennicae, Ser. AVI*, N 418, 61, 1975.
17. О. И. Бузаско, А. Л. Гуральчук, *Фотометрические и поляризметрические исследования небесных тел*, Наукова думка, Киев, 1985, стр. 160.
18. R. Nadeau, P. Bastien, *Astrophys. J.*, 307, L5, 1986.
19. А. Э. Долгинов, Ю. Н. Гнедин, Н. А. Силантьев, *Распространение и поляризация излучения в космической среде*, Наука, М., 1979.
20. J. S. Mathis, W. Rumpl, K. H. Nordsieck, *Astrophys. J.*, 217, 425, 1977.
21. M. L. Sttko, B. D. Savage, M. R. Meade, *Astrophys. J.*, 246, 161, 1981.
22. В. И. Кардополов, Л. А. Павлова, Ф. К. Рспаев, *Астрон. циркуляр*, № 1452, 1986.
23. В. И. Кардополов, Ф. К. Рспаев, Н. А. Шутемова, *Перемен. звезды*, в печати.