

УДК 524.33—56

ИЗМЕНЕНИЯ БЛЕСКА WW VUL И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Г. В. ЗАЙЦЕВА, П. Ф. ЧУГАЙНОВ

Поступила 29 апреля 1983

Принята к печати 20 января 1984

Представлены результаты фотоэлектрических измерений блеска быстрой неправильной переменной WW Vul, выполненных в 1967—1982 гг. в системе *UBV*. Наблюдалось несколько ослаблений блеска продолжительностью $\sim 10^7$ с и амплитудой, достигающей 2^m в полосе *V*, на которые накладывались меньшие ослабления продолжительностью $\sim 10^6$ с. Показано, что изменения блеска звезды в полосах *UBV* могут быть объяснены изменениями экстинкции в околосредной пылевой оболочке, радиус которой $1.5 \cdot 10^{13}$ см и радиусы пылинок 0.16 мкм. Наблюдаемые избытки излучения звезды в области 1.65—3.4 мкм можно объяснить тепловым излучением пылинок при температуре 800—1000 К. При этом числа пылинок, оцененные по их экстинкции и тепловому излучению, оказываются приблизительно одинаковыми. Оценено, что суммарное число пылинок 10^{36} — 10^{37} и соответствующая масса 10^{22} — 10^{23} г. Приводятся соображения, что в оболочке WW Vul, вероятно, присутствует нагретый газ, излучение которого накладывается на излучение звезды.

1. *Введение.* Настоящая статья является продолжением исследований изменений блеска неправильных переменных (см. [1—3]). Здесь мы приводим все полученные нами фотоэлектрические наблюдения в системе *UBV* звезды WW Vul, которая считается быстрой неправильной переменной типа A3e [4, 5]. На месте самой звезды темной туманности нет [6]. Для интерпретации изменений блеска этой звезды в полосах *UBV* мы предлагаем модель околосредной пылевой оболочки, в которой радиусы частиц составляют приблизительно 0.16 мкм. Эта же модель оказывается применимой и для интерпретации фотометрических данных об излучении WW Vul в инфракрасной области, опубликованных в [3].

Впервые свидетельства существования околосредных пылевых оболочек у звезд типа T Tau и неправильных переменных ранних типов были представлены Мендозой и Поведой [7—9]. В их исследованиях было показано, что нагретые излучением звезды пылинки, вероятно, являются источником инфракрасного излучения этих звезд. Кохен [10], а также Кохен и Кухи [11] подтвердили этот вывод для большинства исследованных звезд. В недавно опубликованных статьях [12—14] развиваются очень сходные представления о структуре околосредных пылевых оболочек.

чек звезд типа Т Тау и неправильной переменной раннего типа HR 5999. Как для звезд типа Т Тау, так и для HR 5999 показано, что наблюдаемые оптические характеристики соответствуют пылинкам с радиусом порядка 0.1 мкм. Однако Венцель и другие [15, 16] считают, что у быстрых неправильных переменных ослабления блеска вызываются устойчиво существующими околосветными облаками метеоритных частиц, намного больших (радиус порядка 20 см), чем пылевые частицы. Пугач [17] объясняет изменения блеска быстрой неправильной переменной RZ Psc появлением некоторого гипотетического абсорбента. Рассматриваемая нами модель во многом сходна с моделями [12, 14].

Сопоставление величин V и показателей цвета ($B-V$), ($U-B$), наблюдаемых у WW Vul в разное время, показывает, что изменения потоков в полосах UBV вызваны, вероятно, не одной, а двумя (или более) причинами (см. [18] и раздел 2 настоящей статьи). Таким образом, возможно, что результаты наших расчетов, проведенных в предположении, что изменения блеска звезды в полосах UBV вызваны только изменениями экстинкции пыли, лишь частично объясняют наблюдаемую переменность WW Vul. Это подтверждается наблюдавшимися Тимошенко и Филиппевым [18] у WW Vul изменениями контуров линий и распределения энергии в спектре, происхождение которых связано, вероятно, не только с пылевой экстинкцией. Однако наши результаты, основанные на модели околосветной пылевой оболочки, оказываются довольно близкими к действительности, и поэтому, как нам кажется, они позволяют считать пылевую экстинкцию основной, если не единственной, причиной изменений блеска WW Vul. Нами приведены также некоторые соображения о второй причине изменений блеска — излучении околосветного газа.

2. *Результаты наблюдений в системе UBV и характеристики изменений блеска.* Фотозлектрические UBV -наблюдения WW Vul выполнялись одним из авторов (Г. З.) на Крымской станции ГАИШ с помощью 60-см рефлектора и автоматического электрофотометра. Небольшая часть этих наблюдений была опубликована ранее [3, 19, 20]. С тех пор были уточнены величины звезд сравнения. Здесь рассмотрены результаты всех наших UBV -наблюдений WW Vul до 1982 г. включительно, причем таблицу, содержащую величины V и показатели цвета ($B-V$), ($U-B$), предполагается опубликовать отдельно. Ошибки наблюдений составляли $\pm 0^m01$ для величин V и показателя цвета ($B-V$) и были в пределах $\pm 0^m02 - \pm 0^m03$ для показателя цвета ($U-B$).

На рис. 1, 2 представлены кривая блеска WW Vul в лучах V и гистограмма, построенная по наблюдавшимся V -величинам. Можно заключить, что максимальный блеск составляет $V \approx 10.3-10.4$ и достигается довольно редко, лишь в интервалы времени, относительная продолжительность

которых ≤ 0.1 . В остальное время блеск бывает ослабленным, причем глубина ослаблений составляет от 0^m1 до 2^m2 . Наиболее часто наблюдаются ослабления, не превышающие 0^m9 . Ослабления часто накладываются или следуют одно за другим, и их продолжительность бывает от нескольких дней до 100—200 дней, то есть $\sim 10^6$ — 10^7 с. Следует отметить, что наблюдавшиеся нами ослабления в 1972, 1975 и 1981 годах являются более глубокими, чем те, которые отмечены по наблюдениям других авторов.

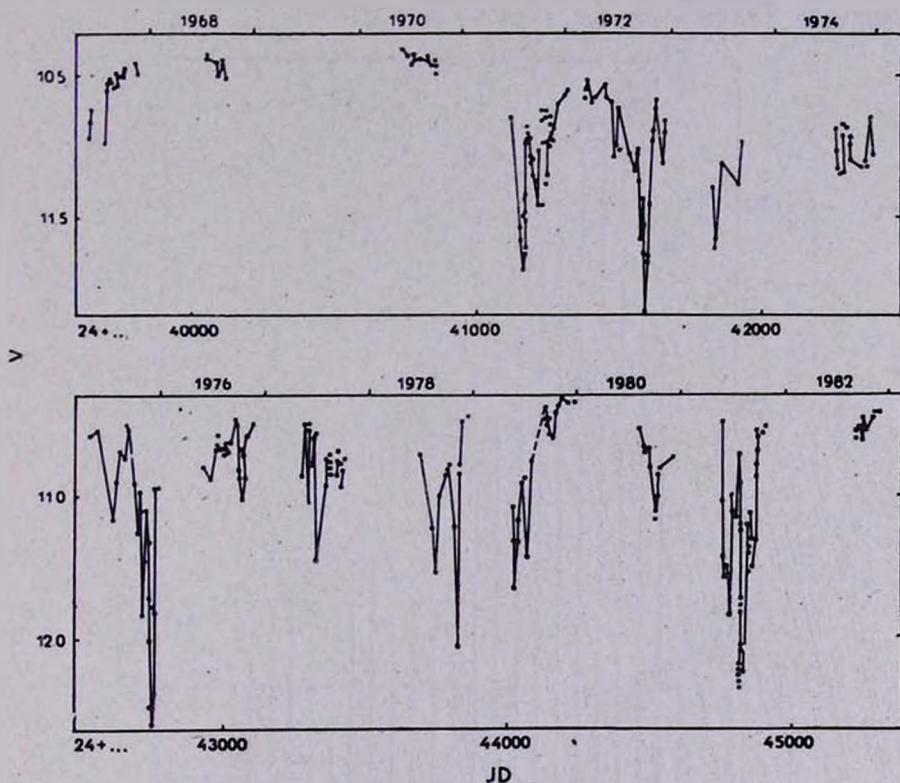


Рис. 1. Кривая блеска WW Vul.

Как видно из рис. 3, 4 ослабления блеска сопровождаются увеличением показателей цвета ($U-B$), ($B-V$). В среднем эта зависимость более крутая при меньших по амплитуде ослаблениях. Однако разброс отдельных измерений значительно больше их ошибок, что указывает на неоднозначность зависимости.

3. Экстинкция околозвездной пылевой оболочки в полосах UBV . Россигером и Венцелем было показано, что наблюдаемые в максимумах блеска WW Vul величина V и показатели цвета ($U-B$), ($B-V$) соответствуют

спектральному типу этой звезды $A3e\alpha$ и межзвездной экстинкции, характеризующейся избытком цвета $E(B-V) = 0.3$ и ослаблением блеска $A_V \approx 1^m$ [16]. Нами использованы несколько иные значения величин и показателей цвета для максимумов блеска $WW\text{ Vul}$, а именно $V = 10.30$, $(B-V) = 0.30$, $(U-B) = 0.25$, по которым Q -методом Джонсона мы нашли спектральный тип $A2\text{ V}$, $E(B-V) = 0.23$, $A_V = 0.74$. Во всех случаях, когда у $WW\text{ Vul}$ наблюдались V , $(B-V)$, $(U-B)$, превышающие указанные значения, мы считаем, что они изменены экстинкцией пылевой околозвездной оболочки.

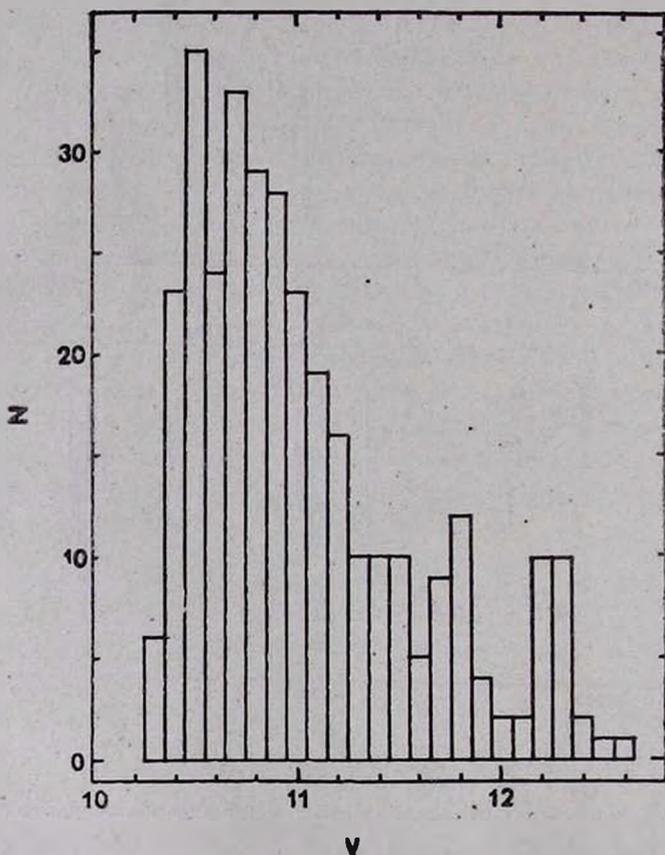


Рис. 2. Распределение чисел N наблюдаемых V -величин $WW\text{ Vul}$.

Поскольку аномалий химического состава по спектру $WW\text{ Vul}$ не обнаружено, то мы предполагаем, что пылевые частицы в околозвездной оболочке образуются (или образовались) путем конденсации газа нормально-го состава, то есть силикатные. Мы опираемся на теорию конденсации пылинок, обзор которой дан Ямамото и Хасегава [24].

В наших расчетах применена сравнительно простая теория переноса излучения в околосветной пылевой оболочке, разработанная Коудом [25]. Хотя поглощение света пылинками приводит к их нагреву, вероятно, их температура достаточно мала, чтобы считать их собственное излучение в

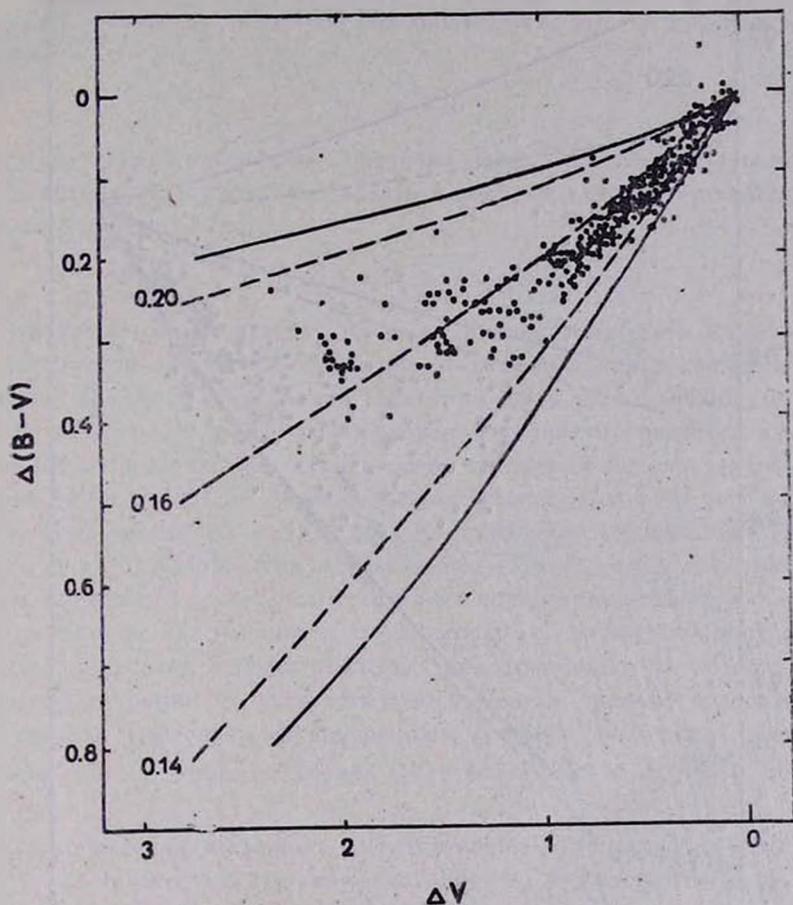


Рис. 3. Зависимости между изменениями показателя цвета $\Delta(B-V)$ и звездной величины ΔV . Разности между наблюдаемыми $(B-V)$, V и их значениями в максимуме блеска — точки. Теоретические зависимости для оболочки, состоящей из пылинок постоянного радиуса a — сплошные линии для плоской геометрии, прерывистые линии — для сферической геометрии. Соответствующие значения a в мкм приведены рядом с кривыми.

полосах UBV пренебрежимо слабым. Соотношения между оптической толщиной и ослаблением света звезды в оболочке в полосах UBV получены для двух случаев: а) сферически симметричной и б) геометрически тонкой сфе-

рической оболочки. В обоих случаях нами предполагалось изотропное неконсервативное рассеяние, создаваемое пылевыми частицами постоянного радиуса a .

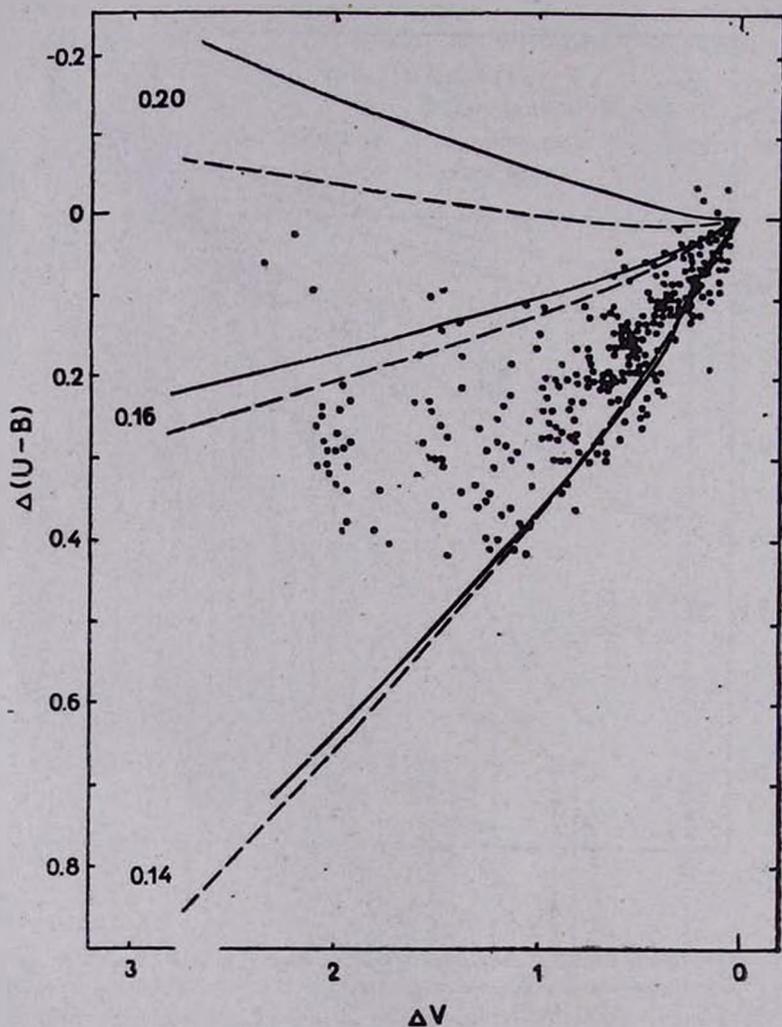


Рис. 4. Зависимости между изменениями показателя цвета $\Delta(U-B)$ и звездной величины ΔV . Обозначения результатов наблюдений и расчетов такие же, как на рис. 3.

Если обозначить через κ коэффициент поглощения на единицу массы и σ коэффициент рассеяния на единицу массы, то оптическая толщина в оболочке определяется как

$$d\tau = -(\kappa + \sigma) ds,$$

где s — расстояние. Решение уравнений переноса в оболочке проводится, как и в [25], при следующих граничных условиях. Пусть τ_1 — оптическая толщина оболочки, I_* — средняя интенсивность излучения звезды, I_+ , I_- — средние интенсивности соответственно выходящего наружу и отраженного внутрь излучений в оболочке. Предполагается, что на внешней границе оболочки

$$I_-(0) = 0.$$

Радиус внутренней поверхности оболочки предполагается достаточно большим по сравнению с радиусом звезды, и поэтому для излучения, входящего на внутреннюю границу,

$$I_+(\tau_1) = I_* + I_-(\tau_1).$$

Отношение светимости звезды после прохождения света через оболочку к светимости звезды без оболочки находилось нами двумя разными способами. В случае сферической геометрии было использовано соотношение (9), выведенное в [25] путем решения уравнения переноса в шварцшильдовском приближении. Для плоской геометрии использовались соотношения (IX.3)—(IX.5) из монографии Чандрасекара [26] для нормально входящего потока ($\mu_0 = 1$) и численные значения функций $X(\mu)$, $Y(\mu)$ брались из таблиц Карлстеда и Мулликина [27]. Сначала для разных углов μ и единичного потока, падающего на внутреннюю границу оболочки, были вычислены интенсивности отраженного и диффузно-пропущенного оболочкой излучений и были найдены соответствующие им потоки. Затем с помощью итераций мы одновременно находили средние относительные интенсивности падающего на внутреннюю границу оболочки и диффузно-пропущенного оболочкой излучений $[I_* + I_-(\tau_1)]/I_*$ и $I_+(0)/I_*$ соответственно.

Для проведения указанных расчетов необходимо также знать зависимость комплексного показателя преломления $m' = n - ik$ от длины волны λ . Величина m' входит в точные формулы теории Ми для сферических пылинок (см. [28]), на основе которых нами были определены значения коэффициентов рассеяния и поглощения. Точные численные значения m' для силикатов известны только по лабораторным измерениям для чистых веществ. Однако при расчетах моделей околозвездных оболочек было обнаружено, что пылинки, вероятно, обладают значительно большим поглощением в видимой и ближней инфракрасной областях спектра, чем в случае чистых силикатов [29]. Считается, что это вызвано «загрязненностью».

Наши расчеты привели к такому же результату в отношении WW Vul, и поэтому было решено опираться на значения n и k , близкие к тем, которые использовались в [29], $m' = 1.55 - 0.1i$ для $1 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 3 \text{ мкм}$ и

$m' = 1.55 - 0.063 (\lambda)^{1/2} i$ для $\lambda \geq 0.55$ мкм [12]. Мы провели несколько серий вычислений, принимая постоянное значение n и подбирая значения k и радиуса частиц a таким образом, чтобы воспроизвести наблюдаемые у WW Vul изменения показателей цвета $(B-V)$, $(U-B)$. Оказалось, что зависимость $m' = 1.55 - 0.063 (\lambda)^{1/2} i$ в области $0.36 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 0.55 \text{ мкм}$ совершенно не совместима с наблюдениями. Предположение, что k постоянно в пределах области, охватываемой полосами UBV , и составляет от 0.05 до 0.1, дает возможность представить наблюдаемые зависимости либо между V и $(B-V)$, либо между V и $(U-B)$, но не обе эти зависимости вместе, при не слишком сильно различающихся принятых радиусах частиц. Соответствие с наблюдениями было достигнуто при радиусах частиц в пределах 0.14—0.20 мкм и следующих значениях k : 0.05 для полосы V , 0.06 для полосы B и 0.07 для полосы U при $n = 1.65$.

Этот результат согласуется с выводом Хербига [30], что у межзвездных пылинков величина k увеличивается при $\lambda \leq 0.44$ мкм. Данные, приведенные в [31], указывают, что увеличение k при уменьшении λ в области $0.36 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 0.55 \text{ мкм}$ может быть вызвано присутствием в пылинках оксида SiO_2 , но это следует проверить путем расчетов моделей пылинков.

На рис. 3, 4 наблюдаемые изменения блеска и показателей цвета

$$\Delta V = V - 10.30,$$

$$\Delta (B - V) = (B - V) - 0.30,$$

$$\Delta (U - B) = (U - B) - 0.25$$

сопоставлены с вычисленными для околозвездной пылевой оболочки с различными оптическими толщинами. Крутизна рассчитанных для постоянного радиуса a зависимостей довольно заметно отличается от крутизны средней наблюдаемой зависимости, особенно при ослаблениях ΔV , составляющих $1^m - 2^m$. Возможно, это вызвано тем, что каждое из ослаблений блеска звезды вызывается сгущениями частиц, несколько различающихся по размерам. Так, средние зависимости между блеском и показателями цвета можно было бы привести в полное соответствие с вычисленными, если предположить, что ослабления блеска V в пределах $0^m - 1^m$ и $1^m - 2^m$ вызваны пылинками, радиусы которых составляют соответственно 0.14—0.16 мкм и 0.16—0.20 мкм. Однако получаемые таким образом различия в размерах частиц невелики и, кроме того, вероятно, существует также неопределенность, связанная с неоднозначностью зависимостей показателей $(U-B)$, $(B-V)$ от V (см. раздел 2). Далее (см. раздел 5) мы отмечаем, что разброс точек на рис. 3, 4 может быть вызван не только различием размеров частиц, но и другой причиной.

Пренебрегая возможным различием размеров пылинок, мы оценим среднее число пылинок N_s в столбе с сечением в 1 см^2 , пересекающем оболочку в радиальном направлении, из соотношения

$$\tau = N_s \pi a^2 Q_{\text{EXT}},$$

где Q_{EXT} — фактор эффективности экстинкции, рассчитанный по теории Ми. Нами было получено при $a = 0.16 \text{ мкм}$ $Q_{\text{EXT}} = 8.7$ для полосы V. Средневзвешенное по всем нашим наблюдениям ослабление блеска в околозвездной оболочке составляет 0.78 . По зависимостям между τ_V и ΔV , приведенным на рис. 5, находим $\langle \tau_V \rangle_1 = 1.95$ для плоской геометрии и $\langle \tau_V \rangle_2 = 2.35$ для сферической геометрии и соответственно $N_{S1} = 2.8 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ и $N_{S2} = 3.4 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$.

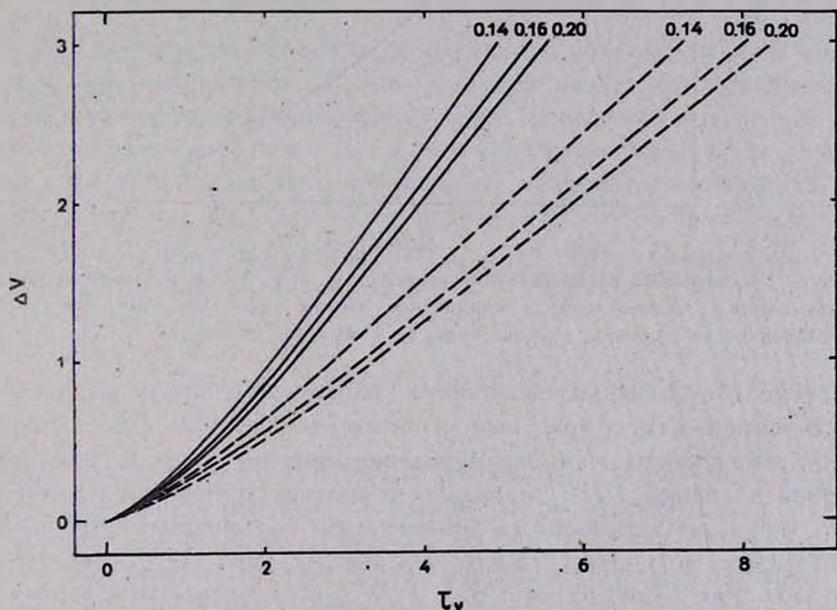


Рис. 5. Теоретические зависимости между ослаблением блеска ΔV и оптической толщиной τ_V для оболочки, состоящей из пылинок постоянного радиуса a . Сплошные линии — плоская геометрия, прерывистые линии — сферическая геометрия. Значения a в мкм приведены рядом с кривыми.

4. *Тепловое излучение околозвездной пыли.* На рис. 6 точками и вертикальными прямыми показано распределение энергии в спектре WW Vul в области от 0.36 до 3.4 мкм, найденное по величинам $UBVJHKL$, исправленным за межзвездную экстинкцию. Для полос UBV были взяты только максимальные значения блеска (точки), для $JHKL$ —

наблюдавшиеся пределы величин, включая ошибки наблюдений. Нужно иметь в виду, что измерений в полосах $JHKL$ было сделано очень мало, и поэтому они не дают возможности достоверно определить максимальный и минимальный блеск звезды в этой области спектра.

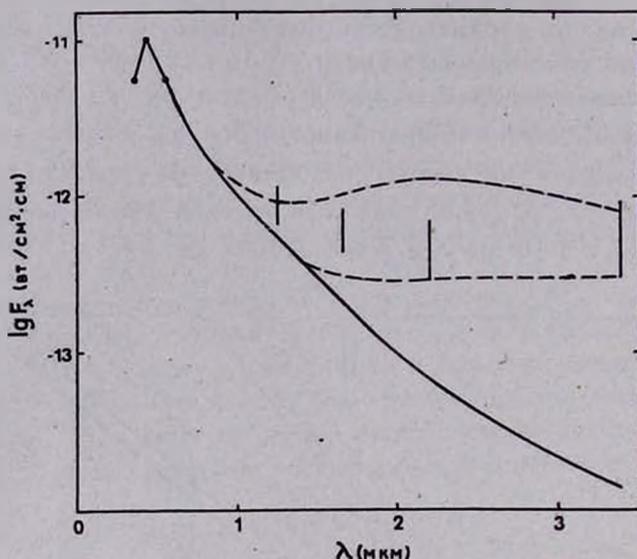


Рис. 6. Спектральные распределения энергии у $WW\ Vul$ и нормальной звезды. Сплошная линия — распределение у нормальной звезды типа $A2V$, прерывистые линии — распределения у звезды того же типа, но с пылевой оболочкой.

Для перехода от звездных величин к плотностям потока на внешней границе земной атмосферы использованы данные [32]. Сплошной линией показано спектральное распределение энергии у звезды типа $A2V$, у которой величины UBV совпадают с соответствующими величинами у $WW\ Vul$, исправленными за межзвездную экстинкцию. Относительные звездные величины $UBVRIJKL$ звезды типа $A2V$ приняты согласно [33]. Как видно из рис. 6, у $WW\ Vul$ в инфракрасной области спектра, охватываемой полосами $JHKL$, потоки излучения значительно выше, чем у нормальной звезды одинакового с ней спектрального типа.

Прерывистыми линиями на рис. 6 показаны спектральные распределения теплового излучения околосредней пылевой оболочки плюс излучение нормальной звезды типа $A2V$, совпадающей по величинам UBV с $WW\ Vul$. Светимость пылевой оболочки вычислялась как

$$L(\lambda) = Q_{\text{ABS}}(\lambda) 4\pi a^2 \pi B(\lambda, T) N_s,$$

где Q_{ABS} — фактор эффективности поглощения, рассчитанный по теории Ми, $B(\lambda, T)$ — функция Планка, T — температура пылинок, N_z — полное число пылинок. Были приняты $T = 1000$ К (верхняя кривая) и $T = 800$ К (нижняя кривая), $N_z = 8 \cdot 10^{36}$, $a = 0.16$ мкм. Величина N_z подбиралась таким образом, чтобы суммы светимостей $L(\lambda)$ звезды и оболочки соответствовали наблюдаемым плотностям потока у Земли $F(\lambda)$. При вычислениях Q_{ABS} для области $JHKL$ было принято значение мнимой части коэффициента преломления $k = 0.1$ с учетом результата [29].

Отметим, что уже определенное (см. предыдущий раздел) число N_S связано с N_z как

$$N_S = \frac{N_z}{\frac{4}{3} \pi (R_2^3 - R_1^3)} (R_2 - R_1) < \frac{N_z}{4\pi R_1^2}$$

где R_2, R_1 — внешний и внутренний радиусы оболочки, причем радиус R_1 может быть приближенно оценен, так как он является расстоянием, на котором температура пылинок, определяемая их нагревом излучением звезды, достигает предела T_* , при котором их испарение становится существенным. Для WW Vul примем эффективную температуру, светимость, радиус и массу такими же, как для нормальной звезды типа A2V, то есть $T_{eff} = 8900$ К, $L_{3B} = 22 L_\odot$, $R_{3B} = 2R_\odot$, $M_{3B} = 2M_\odot$. Полагая $T_* = 1000$ К (см. [24]), оценим R_1 из соотношения

$$\frac{1}{4} \frac{R_{3B}^2}{R_1^2} \int_0^\infty Q_{ABS}(\lambda) B(\lambda, T_{eff}) d\lambda = \int_0^\infty Q_{ABS}(\lambda) B(\lambda, T_*) d\lambda.$$

Таким образом получим $R_1 = 1.5 \cdot 10^{13}$ см, $N_S < 3 \cdot 10^9$ см⁻².

Оценки числа пылинок, полученные по их экстинкции и тепловому излучению, согласуются в пределах фактора 10, что указывает на отсутствие существенных противоречий в принятой модели оболочки.

Чтобы определить полную массу пыли и соответствующую ей плотность вещества $\bar{\rho}$, примем полное число пылинок в пределах 10^{36} — 10^{37} , их собственную плотность 2 г/см³, радиус пылевой оболочки $1.5 \cdot 10^{13}$ см и ее толщину $1.5 \cdot 10^{12}$ см. Откуда $M_z \approx 10^{33}$ — 10^{33} г и $\bar{\rho} \approx 10^{-17}$ — 10^{-16} г/см³.

5. *Образование и стабильность околзвездной пылевой оболочки.* Представляет интерес обсудить сделанные оценки совместно с вопросами о том, какие процессы приводят к образованию оболочки, и о ее стабильности.

а) *Образование пылинок в газовой оболочке, выброшенной из звезды.* Как показывают наблюдения контуров водородных линий в спектре $WV\text{ VII}$, в отдельные интервалы времени газ движется от звезды со скоростью порядка 100 км/с [23]. Вероятно, вблизи звезды выбрасываемый газ нагрет до температуры $\sim 10^4$ К и его оптическая толщина в ультрафиолетовой части спектра больше 1. В таком случае газ поглощает около 30% полного излучения звезды, и, исходя из этой оценки, мы найдем изменение температуры газа T из соотношения

$$0.3 \cdot 4\pi R^2 \sigma' T^4 = 0.3 L_{3B},$$

где σ' — постоянная Стефана—Больцмана. Уменьшение температуры с увеличением R при $T \sim 10^4$ К приведет уже при небольшом изменении R к прекращению нагрева газа излучением, поскольку непрозрачность газа уменьшается с уменьшением температуры. Таким образом, можно ожидать, что температура газа уменьшится до значения, характерного для зон HI в межзвездной среде, то есть ~ 100 К. Кроме того, при больших R из приведенного соотношения можно получить оценки верхнего предела R для заданного T , которые равны $R \leq 1.1 \cdot 10^{13}$ см при $T = 1000$ К и $R \leq 1.7 \cdot 10^{13}$ см при $T = 800$ К.

Согласно [24], уменьшение температуры в пределах 1000—800 К является одним из необходимых условий конденсации газа в пылинки. Существенным является вопрос о продолжительности процесса образования пылинок с радиусом 0.16 мкм, принятым в нашей модели. Согласно [24], эта продолжительность составляет

$$t(a_{\max}) = 3.9 \cdot 10^{-2} t_T = 2.8 \cdot 10^4 t_{\text{coll}},$$

причем входящие в эти соотношения шкала времени охлаждения t_T и средний интервал времени между столкновениями мономеров t_{coll} выражаются как

$$t_T = \left| \frac{d \ln T}{dt} \right|_{T=T_e}^{-1},$$

$$t_{\text{coll}} = (n_s c_1(0) 4\pi a_0^2 \langle v \rangle)^{-1},$$

где T_e — равновесная температура и n_s , $c_1(0)$, a_0 , $\langle v \rangle$ — вероятность соударения, объемная концентрация, радиус и средняя тепловая скорость мономеров. Полученные нами оценки массы и объема околозвездной пылевой оболочки показывают, что средняя плотность пылевого вещества в ней составляет $\sim 10^{-17} - 10^{-16}$ г/см³, что соответствует объемной концентрации конденсирующегося в пылинки газа $\sim 10^9 - 10^{10}$ см⁻³ для водорода и $\sim 10^6 - 10^7$ см⁻³ для мономеров.

Поэтому можно принять $t_{coll} \approx 3 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^4$ с, и, следовательно, продолжительность образования пылинок с $a = 0.16$ мкм (a_{max}) $\approx 10^5 - 10^6$ с.

Отметим, во-первых, что $t(a_{max})$ оказывается значительно больше наблюдаемых продолжительностей ослаблений блеска WW Vul, составляющих $\sim 10^4 - 10^7$ с. Во-вторых, соответствующее $t_T \approx 10^9 - 10^{10}$ с оказывается несколько большим, но не сильно отличающимся от продолжительности охлаждения газа, выбрасываемого из звезды, если допустить, что скорость его уменьшается до значений ~ 1 км/с на расстоянии $1.5 \cdot 10^{13}$ см $\approx 100 R_{зв}$. Укажем два приемлемых механизма роста пылинок при таких условиях. Во-первых, он может происходить в отдельных сгущениях оболочки, в которых объемная концентрация газа достигает $\sim 10^{10} - 10^{11}$ см⁻³ для водорода, что соответствует $t_T \approx 10^8 - 10^9$ с и $t(a_{max}) = 10^7 - 10^8$ с. Во-вторых, окончательное увеличение радиуса пылевых частиц до 0.16 мкм может достигаться вследствие возвратных прохждений ими той зоны, где температура достаточно мала, но газ не слишком разрежен. Такой механизм роста пылинок был впервые предложен Солпитером [34]. Отметим, что наблюдения контуров бальмеровских линий в спектре WW Vul также свидетельствуют о том, что движения газа от звезды сменяются движениями к звезде [23].

б) *Собственное свечение газовой составляющей оболочки.* Поскольку масса образующихся из газа силикатных пылинок составляет определенную долю ($\sim 1\%$) массы газа, то можно считать, что в тех частях околозвездной оболочки, в которых плотность пыли велика, газа тоже больше. Насколько известно, в полосах *UBV* пылевая экстинкция значительно выше газовой, но газ во внутренней части оболочки, где он нагрет до температуры $\sim 10^4$ К, может излучать, особенно в полосе *U* и частично в *B*. Поэтому можно допустить, что ослабления блеска звезды сопровождаются относительным усилением излучения на длинах волн $\lambda \leq 4000$ А, как это наблюдалось в [18].

Кроме того, взаимосвязь между поглощением пыли и излучением газа может быть не всегда одинаковой вследствие того, что ослабление блеска звезды производится, в основном, пылью, проецирующейся на диск звезды, а излучение околозвездного газа не ограничено этой узкой областью. Такие предположения позволяют объяснить отличие определенных в разделе 3 зависимостей V , $(B-V)$ и V , $(U-B)$ для пылевой экстинкции от наблюдаемых, а также отмеченную в разделе 2 неоднозначность этих зависимостей.

в) *Выпадение межзвездной пыли на звезду.* Можно допустить, что пыль выпадает на звезду, например, из плацентной туманности, из которой в результате гравитационной конденсации образовалась сама звезда. Наблюдения не противоречат предположению, что в рассматриваемой туманности нет радиальных движений со скоростями, существенно превышающими скорость звука, за исключением зоны, находящейся вблизи поверхности звезды. Следовательно, медленная аккреция пыли допустима в принятой нами модели околозвездной оболочки, причем изменение температуры газа и пыли с расстоянием от звезды остается таким же, как и при истечении вещества из звезды. В частности, не изменяется оценка радиуса зоны, внутри которой пылинки не могут существовать ($R_1 = 1.5 \cdot 10^{13}$ см).

г) *Стабильность оболочки.* Околозвездная оболочка может быть квазистационарной, если в ней происходит вращение отдельных частиц вокруг звезды по кеплеровским орбитам, вызванное осевым вращением звезды или плацентной туманности. При этом, как можно показать, для рассматриваемой модели оболочки устойчивое существование отдельных облаков невозможно. Полученная плотность газо-пылевого вещества составляет $\sim 10^{-15} - 10^{-14}$ г/см³. С другой стороны, для тела с плотностью ρ , вращающегося по кеплеровской круговой орбите радиуса R вокруг звезды с массой $M_{ЗВ}$, равновесная конфигурация невозможна, если

$$\rho \leq \rho_{CR} = \frac{11 M_{ЗВ}}{\pi R^3}$$

(критерий Роша, см. [35]). В случае WW Vul на расстоянии $R = 1.5 \cdot 10^{13}$ см $\rho_{CR} = 4 \cdot 10^{-6}$ г/см³, что намного больше средней плотности газо-пылевой оболочки.

Однако наличие в кривой блеска глубоких минимумов свидетельствует о сильной неоднородности пылевой оболочки, которая, вероятно, вызвана гидродинамическими процессами, происходящими в ней. Можно оценить размеры этих неоднородностей в предположении, что наблюдаемые ослабления блеска звезды вызваны ее затмениями временно возникающими сгущениями пыли, вращающейся вокруг звезды. В случае движения пылинок по круговым орбитам с радиусом $1.5 \cdot 10^{13}$ см период обращения составляет ~ 0.7 года или $2 \cdot 10^7$ с. Полная продолжительность ослаблений блеска, амплитуда которых около 2^m , не сильно отличается от этой величины. Но, как мы видели, обычно наблюдается также «тонкая структура» в виде накладывающихся меньших ослаблений блеска, продолжительность которых $\sim 10^6$ с. Таким образом, можно считать, что размер наибольшей неоднородности порядка размера всей оболочки (10^{13} см), но существуют

также неоднородности, размер которых примерно в 10 раз меньше (10^{12} см).

6. *Заключение.* Установлено, что продолжительность ослаблений блеска WW Vul изменяется в пределах 10^6 — 10^7 с и их глубина достигает 2^m в полосе V. Ослабления блеска звезды в полосах *UBV* могут быть объяснены рассеянием и поглощением света в неоднородной пылевой оболочке, состоящей из силикатных частиц, средний радиус которых 0.16 мкм и общее число 10^{36} — 10^{37} . В предположении, что пылинки нагреты до температуры 800—1000 К, можно объяснить наблюдаемый избыток излучения WW Vul в области 1.65—3.4 мкм.

Существует некоторое отличие между наблюдаемыми зависимостями между блеском V и показателями цвета ($B-V$), ($U-B$) и определенными для ослаблений блеска, вызванных только изменениями экстинкции околозвездной пылевой оболочки. Кроме того, наблюдаемые зависимости показывают большой разброс, то есть являются неоднозначными. То и другое, возможно, объясняется тем, что ослабление излучения звезды пылевой экстинкцией является не единственной причиной изменений блеска WW Vul. Вероятно, кроме пыли в оболочке WW Vul присутствует нагретый газ, излучение которого накладывается на излучение звезды.

Следует отметить, что непрозрачность пылинок в области 0.36—3.4 мкм приходится принимать намного большей, чем у чистых силикатных пылинок. Как и другие авторы, мы считаем непрозрачность пылинок вызванной их «загрязненностью», что представляется правдоподобным, но должно быть проверено путем расчетов моделей пылинок. Таким образом, предлагаемая модель околозвездной пылевой оболочки является до некоторой степени проблематичной. Мы отмечаем, что непрозрачность в области, охватываемой полосами *UBV*, возможно, вызвана присутствием в пылинках оксида SiO, но чем она вызвана в области полос *JHKL* — не ясно.

Вследствие высокой температуры и светимости WW Vul пылинки в ее оболочке могут существовать, вероятно, начиная с расстояний $\sim 100 R_{зв}$ ($1.5 \cdot 10^{13}$ см). Полученные нами оценки плотности вещества в оболочке показывают возможность образования пылинок из газа, выбрасываемого звездой, скорость которого на расстоянии $\sim 100 R_{зв}$ уменьшается до значений ~ 1 км/с. Предположение о медленном выпадении пылинок из плацентной туманности тоже не противоречит наблюдениям. Неоднородность оболочки, о которой свидетельствуют изменения блеска звезды, следует рассматривать как указание на образование временно существующих сгущений в оболочке.

Авторы выражают благодарность Б. А. Бурнашевой за помощь в вычислениях.

Крымская астрофизическая
обсерватория
Государственный астрономический
институт им. П. К. Штернберга

LIGHT VARIATIONS OF WW VUL AND THEIR INTERPRETATION

G. V. ZAYTSEVA, P. F. CHUGAINOV

Results of the photoelectric measurements of the brightness of the irregular variable WW Vul carried out in 1967—1982 in the *UBV* system are presented. Some decrease of the brightness was observed with the duration of $\sim 10^7$ s and the amplitude up to $2^m.2$ on which smaller decrease was superimposed with durations of $\sim 10^8$ s. It has been shown that light variations in the *UBV* bands can be explained by extinction variations in the circumstellar dust envelope, the radius of which is equal to $1.5 \cdot 10^{13}$ cm and radii of grains are equal to $0.16 \mu\text{m}$. Observed excesses of the star radiation in the region of $1.65—3.4 \mu\text{m}$ can be explained by the thermal radiation of grains whose temperature is $800—1000$ K. Moreover, the numbers of grains estimated from their extinction and thermal radiation turn out to be approximately the same. It is estimated that the total number of grains is $10^{36}—10^{37}$ and the corresponding mass is $10^{22}—10^{23}$ g. Considerations are brought on the probable presence of heated gas in the circumstellar envelope whose radiation is superimposed on the stellar radiation.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. В. Зайцева, *Астрофизика*, 14, 17, 1978.
2. Г. В. Зайцева, *Астрофизика*, 18, 67, 1982.
3. Е. А. Колодилов, Г. В. Зайцева, В. Н. Шенаврин, *Астрофизика*, 13, 449, 1977.
4. G. H. Herbig, *Trans. IAU.*, 8, 805, 1954.
5. P. W. Merrill, C. G. Burwell, *Ap. J.*, 110, 394, 1949.
6. C. Hoffmeister, *Astron. Nachr.*, 278, 24, 1949.
7. E. E. Mendoza, *Ap. J.*, 143, 1010, 1966.
8. E. E. Mendoza, *Ap. J.*, 151, 977, 1968.
9. A. Poveda, *Bol. Obs. Tonantzintla Tacubaya*, 4, 15, 1965.
10. M. Cohen, *M. N. RAS.*, 161, 97, 1973.
11. M. Cohen, L. V. Kuht, *Ap. J., Suppl. ser.*, 41, 743, 1979.
12. A. E. Rydgren, J. T. Schmelz, F. J. Vrba, *Ap. J.*, 256, 168, 1982.

13. Ю. К. Мелик-Алавердян, Г. М. Товмасын, Сообщ. Бюраканской обс., 53, 93, 1982.
14. H. R. E. Tjia A Djie, P. S. Thè, *Astron. Astrophys.*, 70, 311, 1978.
15. W. Wenzel, J. Dörschner, C. Friedmann, *Astron. Nachr.*, 292, 221, 1971.
16. S. Rosstger, W. Wenzel, *Astron. Nachr.*, 294, 29, 1972.
17. А. Ф. Пузач, *Астрофизика*, 17, 87, 1981.
18. А. В. Тимошенко, Г. К. Филиппов, *Астрофизика*, 19, 513, 1983.
19. Г. В. Зайцева, *Переменные звезды*, 17, 294, 1970.
20. Е. А. Кологиллов, *Астрофизика*, 13, 33, 1977.
21. Г. В. Зайцева, *Переменные звезды*, 19, 63, 1973.
22. А. Ф. Пузач, Препринт ИТФ-81-128-Р, 1981.
23. Г. В. Зайцева, Е. А. Кологиллов, *Астрофизика*, 9, 185, 1973.
24. T. Yamamoto, H. Hasegawa, *Progr. Theor. Phys.*, 58, 816, 1977.
25. A. D. Code, *Interstellar Dust and Related Topics*, IAU. Symp. No. 52, Reidel, 1973, p. 505.
26. S. Chandrasekhar, *Radiat. Transfer*, Oxford, 1950.
27. J. L. Carlsted, T. W. Mullikin, *Ap. J.*, Suppl. ser., 12, 449, 1966.
28. N. C. Wickramasinghe, *Interstellar Grains*, Chapman and Hall, Ltd., 1967.
29. T. W. Jones, K. W. Merrill, *Ap. J.*, 209, 509, 1976.
30. G. H. Herbig, *Ap. J.*, 196, 129, 1975.
31. W. W. Duley, *Astrophys. Space Sci.*, 78, 145, 1981.
32. H. L. Johnson, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 4, 193, 1966.
33. H. L. Johnson, *Bol. Obs. Tonantzintla Tacubaya*, 3, 305, 1964.
34. E. E. Salpeter, *Ap. J.*, 193, 585, 1974.
35. K. R. Lang, *Astrophysical Formulae*, Springer-Verlag, 1974.