

ПЕРЕМЕННАЯ ОКОЛОЗВЕЗДНАЯ ЭКСТИНКЦИЯ В ЗВЕЗДАХ ТИПА UX Ori ПОЗДНИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ КЛАССОВ: ЗВЕЗДА V695 Per

В.П.ГРИНИН^{1,2}, А.О.СЕМЕНОВ¹, О.Ю.БАРСУНОВА¹, С.Г.СЕРГЕЕВ¹

Поступила 11 октября 2018

Затмения молодых звезд пылевыми фрагментами протопланетных дисков являются главной причиной стохастической переменности блеска звезд типа UX Ori. При анализе и моделировании таких затмений звезду часто рассматривают как точечный источник света. Такой подход вполне допустим в случае горячих звезд этого семейства, поскольку у них радиус сублимации пыли в околозвездном диске много больше радиуса звезды. В случае холодных звезд такой подход может оказаться неприемлемым, так как зона испарения околозвездной пыли находится недалеко от звезды. В нашей статье показано, что учет конечных размеров источника излучения приводит к изменению формы цветового трека на диаграмме "цвет-величина". Результаты расчетов применены к звезде V695 Per, демонстрирующей одновременно переменность блеска типа UX Ori и AA Tau и являющейся самой холодной из известных сегодня звезд данного типа.

Ключевые слова: *Звезды типа UX Ori - звезда V695 Per - околозвездная экстинкция*

1. **Введение.** Флуктуации околозвездной экстинкции, вызванные неоднородным распределением пыли в протопланетных дисках, являются одной из главных причин фотометрической активности молодых звезд [1]. В наиболее яркой форме этот механизм переменности наблюдается у звезд с непериодическими алголеподобными ослаблениями блеска (звезды типа UX Ori) и обусловлен небольшим наклоном протопланетных дисков к лучу зрения и их неоднородной структурой [2]. В процессе ослабления блеска звезда сначала краснеет, затем при продолжающемся падении блеска происходит поворот цветового трека на диаграммах цвет-величина. Он обусловлен увеличивающимся вкладом рассеянного излучения протопланетного диска [3], о чем свидетельствует рост линейной поляризации звезд типа UX Ori в глубоких минимумах блеска [2]. Изменение цвета звезды в начале затмения объясняется селективным поглощением прямого излучения звезды околозвездной пылью в газопылевых фрагментах околозвездного диска, вызывающих затмения. Моделирование этого участка цветового трека позволяет определить закон покраснения и оценить оптические свойства околозвездной пыли (см., например, [4-6]). Во всех известных нам моделях такого типа звезда рассматривается как *точечный*

источник излучения. Такое приближение, по-видимому, справедливо для большинства горячих звезд типа UX Ori, (в основном это звезды типа Ae Хербига). Их светимости в десятки раз превышают светимость Солнца. Поэтому зона сублимации пыли находится довольно далеко от звезд, на расстояниях несколько десятков их радиуса. На таком расстоянии характерная толщина пылевой атмосферы околозвездного диска значительно превышает радиус звезды, что позволяет рассматривать звезду как точечный источник света.

Такое упрощение, однако, неприменимо к холодной части звезд типа UX Ori - звездам типа Т Тельца. Из-за низкой светимости этих звезд пыль в околозвездных дисках сохраняется вплоть до магнитосферы звезды (а у самых холодных из них пыль, увлекаемая газом, может проникать даже внутрь магнитосферы), вызывая кратковременные ослабления блеска звезд (dips). У некоторых звезд типа Т Тельца наблюдаются периодические затмения внутренней областью диска, возмущенной (warped) при взаимодействии диска с наклонным магнитным диполем на поверхности звезды (см. [7,8] и цитированную там литературу). Ниже мы покажем, к каким эффектам может привести отказ от приближения точечного источника при анализе цветовых изменений, наблюдаемых в ходе затмений таких звезд.

2. *Модель затмения звезды пылевым экраном переменной плотности.* Рассмотрим затмение звезды пылевым экраном с переменной концентрацией пылинок по оси Z (рис.1). Затмение моделируем путем перемещения экрана относительно источника света вдоль этой оси. Для простоты

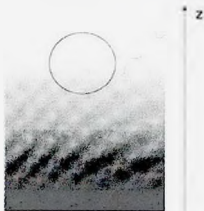


Рис.1. Схематическая модель затмения звезды пылевым экраном с градиентом плотности по оси Z.

принят гауссовский профиль изменения концентрации частиц в экране с высотой, часто применяемый в теории протопланетных дисков и являющийся следствием условия гидростатического равновесия. В результате, оптическая толщина экрана τ на высоте z есть $\tau(z) = \tau_0 \exp(-bz^2)$, где z - безразмерная высота, выраженная в единицах радиуса звезды, τ_0 - оптическая толщина на уровне $z = 0$; b - параметр, определяющий градиент плотности частиц в экране по оси z . Зависимость цветового трека от параметра τ_0 оказалась не принципиальной для целей, преследуемых в рассматриваемой задаче, поэтому было зафиксировано значение $\tau_0 = 10^4$. Предполагается, что оптические параметры пылинок не зависят от z . Ниже при расчетах оптические параметры частиц приняты такими же, как в межзвездной среде: $R_g = \Delta V / \Delta(B-V) = 3.1$, $R_i = \Delta I / \Delta(R-I) = 2.4$, $R_U = \Delta V / \Delta(U-B) = 4.1$ в фотометрической системе UBVRcic.

2.1. *Диаграммы цвет-величина для источника конечных размеров.* На левом графике рис.2 показано семейство цветовых треков на диаграмме "цвет-величина" $V/(B-V)$, рассчитанных для описанной выше

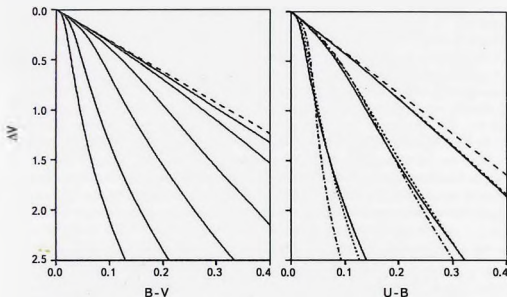


Рис.2. Слева: диаграмма "цвет-величина" в модели с источником излучения конечных размеров и пылевым экраном, состоящим из межзвездной пыли. Цифры вблизи цветовых треков дают значения параметра b , определяющего градиент плотности в пылевом экране. Пунктиром показан цветовой трек в модели с такими же свойствами пылевых частиц, но в приближении точечного источника. Справа: штрих-пунктиром и точками показано влияние потемнения диска звезды от центра к краю (см. текст).

модели пылевого экрана. Единственным параметром модели является параметр b , определяющий степень неоднородности экрана по оси z относительно размеров звезды. Предполагается, что диск звезды излучает равномерно по всей площади. Влияние потемнения от центра к краю диска звезды показано на правом графике рис.2 на примере диаграммы "цвет-величина" $V/(U-B)$. Она рассчитана для двух вариантов модели потемнения - ATLAS и PHOENIX (показаны соответственно, пунктиром и штрих-пунктиром), взятых из работы [9] для звезды с эффективной температурой $T_{\text{eff}} = 3500$ К и ускорением силы тяжести $\log g = 4.0$. Видно, что влияние этого эффекта на поведение показателя цвета $U-B$ невелико. Его влияние на показатели цвета $V-R$, $V-I$ сказывается еще слабее.

Из рис.2 видны два основных отличия модели с точечным источником от моделей с источником конечных размеров. В последнем случае, варьируя параметр b , мы получаем разные наклоны цветовых треков, хотя оптические свойства пылинок в экране во всех моделях одинаковы. Кроме того, во всех моделях с протяженным источником излучения наклон цветовых треков соответствует закону поглощения более крупными пылинками, чем это есть на самом деле¹. Чем больше параметр b , тем сильнее выражено это несоответствие. Такой результат вполне понятен, если учесть, что при $b \gg 1$ пылевой экран имеет фактически резкую границу. Его перемещение по диску звезды приводит к ослаблению ее блеска, но цвет звезды при этом остается постоянным. Из рис.2 видно также, что в моделях с протяженным источником излучения цветовые треки имеют изгиб в верхней части. Наличие такой детали на наблюдаемой диаграмме "цвет-величина" может служить указанием на то, что градиент экстинкции по диску звезды в пылевых облаках, вызывающих ослабления блеска, имеет место и его необходимо учитывать.

Следует подчеркнуть, что мы моделируем здесь только верхнюю часть диаграммы "цвет-величина", по которой обычно определяется закон поглощения у звезд типа UX Ori. Как уже отмечалось во *Введении*, нижняя часть этой диаграммы отражает влияние рассеянного излучения протопланетного диска, которое мы здесь не рассматриваем.

3. Звезда типа UX Ori и AA Tau V695 Tau. Звезда V695 Peg интересна тем, что это самая холодная из звезд типа UX Ori [10]. По данным [11] она имеет спектральный класс M3.75 ($T_{\text{eff}} = 3500$ К) и характеризуется низкой эмиссионной активностью. Согласно [12], эквивалентная ширина линии H α

¹ Аналогичный вывод был сделан ранее в статье Натта и Паназия [17] при изучении закона экстинкции в неоднородных пылевых облаках. Авторы настоящей статьи благодарны А.В.Лодину, обратившему наше внимание на эту работу.

в ее спектре равна $4 \text{ \AA}$, и по этому признаку V695 Per относят к семейству звезд типа WTTs (weak-lined T Tauri star). Фотометрическая активность звезды изучалась многими авторами и детально описана в статье [10]. Ее кривая блеска в полосе I представлена на рис.3. Она основана на наших наблюдениях, опубликованных в [10], и дополненных результатами наблюдений трех последующих наблюдательных сезонов.

Из рис.3 видно, что блеск звезды в ярком состоянии медленно меняется от сезона к сезону с амплитудой около $0^m.2$ в полосе I . Звезда испытывает также кратковременные ослабления блеска с амплитудой около $1^m.2$, которые коррелируют с периодическими колебаниями с периодом 7.6 д. [10,13,14] (рис.4). В двух

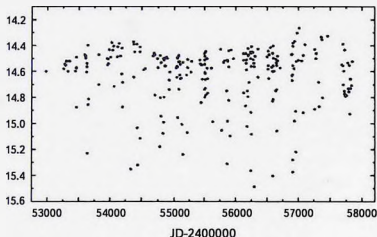


Рис.3. Кривая блеска V695 Per в полосе I по данным [10], дополненным наблюдениями трех последних наблюдательных сезонов.

последних статьях предполагается, что периодический компонент кривой блеска звезды обусловлен пятнистой структурой поверхности звезды. В статье [10] приведены аргументы в пользу альтернативной модели, согласно которой периодические ослабления блеска V695 Per имеют ту же природу, что и у звезд типа AA Tau [7], и вызваны экранированием звезды возмущенной частью внутреннего околозвездного диска.

Особенностью диаграмм "цвет-величина" этой звезды $I/(R-I)$ и $I/(V-I)$ является небольшой излом в верхней части графика. Он был отмечен нами в статье [10], но остался без объяснения. В правой части рис.5 мы совместили результаты наблюдений с модельными расчетами, представленными на рис.2. Видно, что модель с источником излучения конечных размеров и неоднородным по плотности пылевым экраном позволяет объяснить как наличие изгиба в верхней части диаграммы, так и большой разброс точек в ее нижней части.

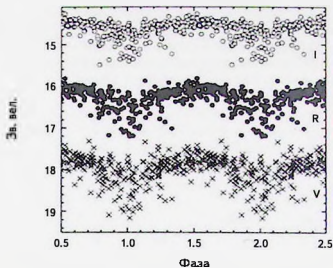


Рис.4. Кривые блеска V695 Peg в полосах *VRI* (снизу-вверх), свернутые с периодом 7.6 д.

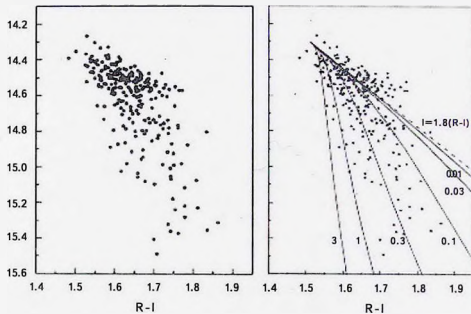


Рис.5. Слева-диаграмма "цвет-величина" V695 Peg. Справа - та же диаграмма, совмещенная с теоретическими цветовыми треками в модели затмения звезды экраном переменной плотности. Обозначения те же, что и на рис.1.

4. *Заключение.* Представленные выше результаты показывают, что в случае холодных звезд типа UX Ori использование цветовых треков на диаграммах "цвет-величина" для определения закона околозвездного поглощения должно выполняться с осторожностью. Причиной возможных ошибок, в результате которых характерные размеры пылинок в пылевых облаках, экранирующих звезду от наблюдателя, будут получаться систематически больше, чем они есть на самом деле, является градиент плотности в облаках, экранирующих звезду от наблюдателя. Характерным признаком, указывающим на влияние этого фактора, является изгиб цветового трека в верхней части диаграммы "цвет-величина". Именно такая деталь видна на диаграмме "цвет-величина" (рис.5) звезды V695 Per. Похожие особенности видны также на цветовых треках звезд AA Tau [15] и RZ Psc [16].

Следует заметить при этом, что в случае звезд, у которых одновременно наблюдаются два разных механизма переменности, связанные с изменениями околозвездной экстинкции (переменность типа AA Tau и UX Ori), возможны реальные отличия закона околозвездной экстинкции, определяемого по разным участкам диаграммы "цвет-величина". Они могут быть вызваны изменением характерных размеров пылевых частиц по мере их приближения к звезде, поскольку мелкие пылинки испаряются быстрее крупных. Это обстоятельство необходимо иметь в виду при анализе диаграмм "цвет-величина" таких звезд.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН П28 "Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей", подпрограмма "Астрофизические объекты как космические лаборатории".

¹ Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН,
С.-Петербург, e-mail: vgsrao@mail.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет, С.-Петербург

³ Крымская астрофизическая обсерватория, п. Научный

VARIABLE CIRCUMSTELLAR EXTINCTION IN UX Ori STARS OF THE LATE SPECTRAL TYPES: V695 Per

V.P.GRININ^{1,2}, A.O.SEMENOV¹, O.Yu.BARSUNOVA¹, S.G.SERGEEV³

Eclipses of young stars by the dust fragments of protoplanetary disks are the main reason of the stochastic variability of the UX Ori type stars. In the analysis and modeling of such eclipses the star is often considered as a point light source.

Such approach is quite admissible in case of hot stars of this family as they have a radius of sublimation of dust in a circumstellar disk much more than the radius of a star. In case of cold young stars such approach can be unacceptable as the zone of evaporation of circumstellar dust is near a star. In our article it is shown that accounting of the final sizes of a source of radiation leads to change of a form of a color track on the "colour-magnitude" diagrams. Results of calculations are applied to the star V695 Per showing variability like UX Ori and AA Tau and being the coldest of stars of this type known today.

Keywords: *UX Ori stars - the star V695 Per - circumstellar extinction*

ЛИТЕРАТУРА

1. *W.Herbst, D.K.Herbst, E.A.Grossmann*, Astron. J., **108**, 1906, 1994.
2. *V.P.Grinin, N.N.Kiselev, N.Kh.Minikulov et al.*, Astrophys. Space Sci., **186**, 283, 1991.
3. *В.П.Гринин*, Письма в Астрон. ж., **14**, 65, 1988, (Sov. Astron. Lett., **14**, 27, 1988).
4. *Н.В.Вощинников, В.П.Гринин*, Астрофизика, **34**, 181, 1991, (Astrophysics, **34**, 84, 1991).
5. *A.Natta, B.A.Whitney*, Astron. Astrophys., **364**, 633, 2000.
6. *А.Ф.Пузач*, Астрон. ж., **81**, 517, 2004, (Astron. Rep., **48**, 470, 2004).
7. *J.Bouvier, S.H.P.Alencar, T.Boutelier et al.*, Astron. Astrophys., **463**, 1017, 2007.
8. *S.H.P.Alencar et al.*, Astron. Astrophys., **519**, 88, 2010.
9. *A.Claret, S.Bloemen*, Astron. Astrophys., **259**, A75, 2011.
10. *О.Ю.Барсунова и др.*, Астрофизика, **56**, 429, 2013, (Astrophysics, **56**, 395, 2013).
11. *K.L.Luhman et al.*, Astrophys. J., **593**, 1093, 2003.
12. *G.H.Herbig*, Astrophys. J., **497**, 736, 1998.
13. *R.E.Cohen et al.*, Astron. J., **127**, 1602, 2004.
14. *S.Nordhagen et al.*, Astron. J., **132**, 1555, 2006.
15. *J.Bouvier et al.*, Astron. Astrophys., **409**, 169, 2003.
16. *Г.В.Зайцева*, Переменные звезды, **22**, 181, 1985.
17. *A.Natta, N.Panagia*, Astron. Astrophys., **287**, 228, 1984.