

ИЗМЕНЕНИЯ БЛЕСКА И ЦВЕТА ЗВЕЗДЫ ПРИ ЕЕ ЗАТМЕНИИ ПРОТОПЛАНЕТОЙ

Я.Н.ЧХИКВАДЗЕ

Поступила 24 ноября 2014

Принята к печати 19 февраля 2014

Исследованы особенности изменения блеска цвета звезды при ее экранировании газопылевой протопланетой на основе соотношения (1). При довольно общем случае, предполагая лишь то, что $\tau(x, y) \in [0, \tau^{\max}]$, показано следующее. В минимумах блеска отношение $(\Delta m_2^{\max} - \Delta m_1^{\max}) / \Delta m_1^{\max}$ уменьшается по мере роста $\Delta m_1^{\max}$. Область возможного расположения точек из множества $\{E_1; E_2\}$ на диаграмме E_2 vs E_1 локализована внутри довольно узкой параллелограммы с большой диагональю, описываемой соотношением (10). Если $\tau(x, y) = \tau^{\max} \sqrt{1 - (x^2 + y^2) / R^2}$, то искомую функцию E_2 vs E_1 практически можно представить соотношением (10). Расчетные зависимости "блеск-цвет" показывают принципиальные отличия от закона межзвездного поглощения. Если придерживаться мнения о том, что в Ae/Be звездах Херbiga с падением блеска рост показателей цвета происходит линейно, т.е. $(\Delta m_2 - \Delta m_1) / \Delta m_1 = \text{const}$ и, что значение указанного отношения не зависит от глубины затмения, то можно прийти к выводу, что алголеподобное изменение блеска Ae/Be звезд Херbiga невозможно объяснить в рамках модели затмения протопланетой.

Ключевые слова: *звезда:особенности изменения блеска:экранирование протопланетой*

1. Введение. Большинство современных теорий образования Солнечной системы постулирует, что Солнце в ранней стадии эволюции было окружено пылевой дискообразной протопланетной туманностью, в которой сформировались планеты и другие твердые тела. Некоторые данные позволяют думать, что материал планет Земной группы проходил шаг за шагом иерархию планетозимальных размеров от пылинок до планет [1].

Однако многие авторы считают, что формирование планет-гигантов легче объяснить одноступенчатым коллапсом непосредственно из газа и пыли, при котором образовались тела планетных или еще больших размеров. Предполагается, что определяющим процессом является гравитационная неустойчивость газопылевого диска; она вызывает коллапс с образованием объектов с массой равной или превышающей массы планет [2,3]. Обычно такие огромные образования называют протопланетами. Результаты космической программы "Кеплер" и специальная программа по поиску планет около звезд показывают, что концепция образования крупномасштабных протопланет имеет реальную основу.

Таким образом, можно предположить, что вокруг звезд раннего возраста,

какими являются Ae/Be звезды Хербига, могут существовать протопланеты. Венцел [4] был первым, указавшим на то, что алгоподобные падения блеска некоторых Ae/Be звезд Хербига могут происходить в процессе затмения звезды, вращающейся вокруг нее газопылевой протопланетой.

В настоящей работе представлены результаты моделирования процесса изменения блеска и цвета звезды в ходе ее экранирования протопланетой.

2.1. Основные соображения. Рассмотрим следующее соотношение, описывающее падение блеска звезды при ее экранировании газопылевой протопланетой, которое было получено нами ранее [5]:

$$E_{\lambda} = 1 - \frac{s}{s_0} + \iint_{s_0} e^{-p\tau_{\lambda}(x,y)} ds/s_0, \quad (1)$$

где E_{λ} - нормированное значение потока излучения звезды, когда протопланета затмевает часть поверхности звезды, равную s , а s_0 - полная видимая площадь диска звезды. Координатная система XYZ связана с центром протопланеты. Движение происходит в плоскости XZ , а наблюдатель находится в направлении оси Z . $M(\xi, 0)$ - координата переднего края диска звезды, а $\tau_{\lambda}(x, y)$ - полная (поглощение + рассеяние) оптическая толщина. Вещество протопланеты по своим свойствам похоже на межзвездное. Протопланета имеет форму сферы радиусом R , равным звездному. Считается, что поверхностная яркость звезды - постоянная величина, а рассеяние вперед пренебрежимо мало.

2.2. Зависимость E_2 от E_1 . Для упрощения записи индексами 1 и 2 обозначим те или иные величины на длинах волн λ_1 и λ_2 . Задача заключается в установлении свойств искомой функции E_2 vs E_1 . Вначале исследуем свойства минимумов блеска на основе следующего соотношения:

$$E_{\lambda}^{min} = \iint_{s_0} e^{-p\tau_{\lambda}(x,y)} ds/s_0, \quad (2)$$

где параметр $p \in [0, \infty)$. Необходимо отметить, что для удобства величины $\tau(x, y)$ считаются фиксированными, а вариация оптической толщины осуществляется параметром p . Если заменить интеграл суммой: $E_{\lambda}^{min} = \sum_{i=1}^n \Delta s_i e^{-\tau_i} / \sum_{i=1}^n \Delta s_i$, то из неравенства Иенсена [6] следует,

$$E_2^{min} > (E_1^{min})^t, \quad \text{где } t = \tau_2(x, y)/\tau_1(x, y) > 1. \quad (3)$$

Из соотношения (3) следует, что

$$m_2^{min} < m_1^{min}, \quad \text{где } m^{min} = -2.5 \log E^{min}. \quad (4)$$

Производная dm_2^{min}/dm_1^{min} определяется следующим образом:

$$t \left\{ \frac{\iint_{s_0} e^{-p\tau_1} \tau_1 ds / \iint_{s_0} e^{-p\tau_1} ds}{\iint_{s_0} e^{-p\tau_1} \tau_1 ds / \iint_{s_0} e^{-p\tau_1} ds} \right\}, \quad (5)$$

где $\tau_1 = \tau_1(x, y)$. Так как соотношение (5) положительная величина, то

m_2^{min} vs m_1^{min} должна быть монотонно возрастающей функцией. Очень важно, что

$$dm_2^{min}/dm_1^{min} \rightarrow t, \text{ когда } p \rightarrow 0. \quad (6)$$

С другой стороны, используя неравенство Иенсена [6], нетрудно показать, что производная по t отношения $\left(\frac{\int_0^{s_0} e^{-pt\tau_1} \tau_1 ds}{\int_0^{s_0} e^{-pt\tau_1} ds} \right) < 0$, поэтому величина в фигурных скобках (5) меньше единицы и следовательно

$$dm_2^{min}/dm_1^{min} < t. \quad (7)$$

Рассмотрим варианты: $dm_2^{min}/dm_1^{min} \geq 0$ и меньше нуля. Положительность второй производной означает, что m_2^{min} vs m_1^{min} выпуклая функция. Другими словами, отношение m_2^{min}/m_1^{min} будет увеличиваться по мере роста глубины затмения, но будут нарушены условия (4), (6) и (7). Условия (4), (6) и (7) нарушаются и в том случае, когда вторая производная равна нулю. Итак, должно выполняться условие отрицательности второй производной, означающее, что m_2^{min} vs m_1^{min} будет вогнутой (выпуклой вверх) функцией.

Производная искомой функции определяется соотношением [8] и она положительная,

$$\frac{d(1-E_2)}{d(1-E_1)} = \frac{1-e^{-p\tau_2(\xi,0)}}{1-e^{-p\tau_1(\xi,0)}} > 0, \quad (8)$$

поэтому $(1-E_2)$ vs $(1-E_1)$ будет монотонно возрастающей функцией. Знак второго производного $d^2(1-E_2)/d(1-E_1)^2$ можно определить из соотношения (9).

$$\text{Sign} \frac{d^2(1-E_2)}{d(1-E_1)^2} = \frac{d\tau_1(\xi,0)}{ds} \left[t \frac{e^{-p\tau_2(\xi,0)}}{e^{-p\tau_1(\xi,0)}} - \frac{1-e^{-p\tau_2(\xi,0)}}{1-e^{-p\tau_1(\xi,0)}} \right]. \quad (9)$$

Величина в квадратных скобках всегда отрицательна и поэтому, когда производная $\tau_1(x, y)$ отрицательна, тогда искомая функция будет выпуклой (выпуклой вниз). Когда производная $\tau_1(x, y)$ положительна, то искомая функция будет вогнутой (выпуклой вверх), а при условии равенности нулю, искомая функция будет иметь перегиб.

Не конкретизируя особенности распределения $\tau(x, y)$, определим ту часть диаграммы E_2 vs E_1 , в которой могут располагаться точки из множества $\{E_1; E_2\}$, допустим лишь то, что значения, принимаемые $\tau(x, y)$, заключены в интервале $[0, \tau^{max}]$. При таком допущении производная искомой функции как в начале затмения, так и в момент полного затмения может принять значения между t и $\left(\frac{1-e^{-p\tau_1^{max}}}{1-e^{-p\tau_1^{min}}} \right)$.

На рис.1 прямая OB соединяет две точки графика искомой функции: начало затмения и момент достижения минимума. Угловой коэффициент прямой OB равен $(1-E_2^{min})/(1-E_1^{min})$ и его значение уменьшается с ростом

глубины затмения.

Нетрудно понять, что график искомой функции должен располагаться внутри параллелограмма $OABC$, сторонами которой являются касательные прямые, проведенные из точек O и B с экстремальными значениями угловых коэффициентов, указанными выше. В случае $d\tau(\xi, 0)/ds > 0$, график искомой функции должен располагаться выше прямой OB , а при условии $d\tau(\xi, 0)/ds < 0$ - ниже. В случае $d\tau(\xi, 0)/ds = 0$ искомая функция будет

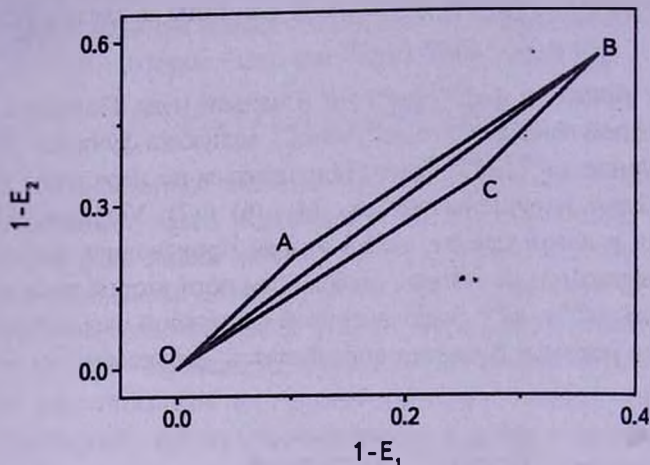


Рис.1. Область возможного расположения точек из множества $\{E_1; E_2\}$.

иметь перегиб и график пересечет прямую OB . При выполнении условия $d\tau(\xi, 0)/ds = 0$ несколько раз, искомая функция во столько же раз будет иметь перегиб и пересечение с прямой OB . Оценки ширины параллелограмма $OABC$ показали, что отклонение точек A и C от прямой OB при $t=2$ и $\tau_1^{max}=1$ порядка 0.04, а при $t=1.3$ и $\tau_1^{max}=1$ оно порядка 0.01.

2.3. Модель с центральной симметрией. Можно предположить, что наиболее правдоподобным должно быть допущение о том, что плотность материи внутри протопланеты более или менее постоянная величина. В таком случае оптическая толщина протопланеты максимальна в центре и постепенно уменьшается к ее краям т. е. $\tau(x, y) = \tau^{max} \sqrt{1 - (x^2 + y^2)/R^2}$. Минимальное значение блеска при этом определяется из следующего выражения: $E^{min} = 2[1 - e^{-\tau(1+\tau)}]/\tau^2$, где $\tau = \tau^{max}$. О характере искомой функции было сказано выше: вначале она вогнутая, затем пересекает прямую OB и после перегиба становится выпуклой, но расчеты путем численного интегрирования соотношения (1) при таком допущении показали, что график искомой функции незначительно отклоняется от прямой OB : при $t=1.3$ и $\tau_1^{max}=1$ максимальное отклонение от прямой OB порядка 0.001. Таким образом, мы приходим к выводу, что искомую зависимость E_2 vs E_1 , практически можно представить следующим соотношением:

$$E_2 = fE_1 - f + 1, \text{ где } f = (1 - E_2^{\min}) / (1 - E_1^{\min}). \quad (10)$$

На рис.2 представлены результаты расчетов на основе соотношения(10), иллюстрирующие зависимости изменения показателя цвета от блеска при различных глубинах затмения. Модельные зависимости принципиально отличаются от закона стандартного межзвездного покраснения: во-первых, расчетные зависимости нелинейные, и во-вторых, с ростом глубины затмения происходит их сдвиг вправо и вниз.

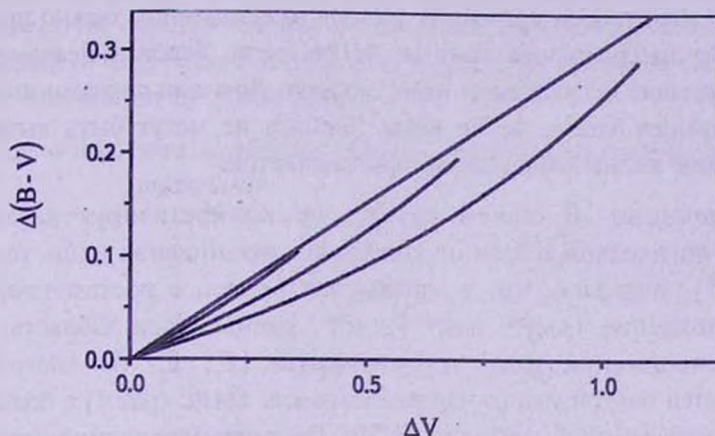


Рис.2. Зависимость показателя цвета от блеска. Прямая линия - межзвездное покраснение.

3. *Сравнение с наблюдениями.* Ae/Be звезды Хербига по характеру изменения показателя цвета делятся на два класса. В первом из них, с падением блеска, показатели цвета звезд все время монотонно увеличиваются (класс *R*), а у звезд класса *CR*, с падением блеска до определенного значения показатели цвета сперва монотонно растут и при дальнейшем понижении блеска показатели цвета уменьшаются [7]. Впервые эффект поворота цветового трека был описан в работах [8-10]. Некоторые авторы указывают на то, что монотонное увеличение показателей цвета происходит почти по закону межзвездного покраснения [7-14]. Особенно следует отметить, что нам не удалось найти указание на то, что градиенты роста показателя цвета изменяются при затмениях звезды с различными минимумами. Рассмотрение рис.1-9 [7] показывает, что монотонное увеличение показателей цвета $\Delta(b-y)$ в звездах класса *R* более уверенно можно аппроксимировать линейным законом, чем иным. С целью получения более правдоподобного заключения рассмотрим подробно V586 Ori. По данным наблюдения в системе Стремгрена V586 Ori находился в минимумах с глубиной $0^m.8$ и $1^m.2$, соответственно [7]. На рис.6 [7] 95% точек до $\Delta y = 0^m.8$ и после указанного значения равномерно распределены около прямой с угловым коэффициентом, равным ~ 0.19 внутри полосы с шириной порядка $0^m.03$. Наблюдения V586 Ori в

системе Стремгрена были произведены нами почти синхронно с наблюдениями [7]. По методике предложенной нами, были получены максимально правдоподобные оценки коэффициентов линейной зависимости между значениями изменения блеска на различных длинах волн [14]. К примеру, $\Delta b = 1.187 \Delta y \pm 0.0013$, а погрешности остальных коэффициентов имеют тот же порядок. Высокие точности оценок показывают, что изменение блеска V586Or происходит по закону нормального межзвездного покраснения, и что особенно важно, $\Delta(m_2 - m_1)/\Delta m_1$ остается постоянным при затмениях с различными значениями минимума. Исходя из сказанного, можно прийти к выводу, что наблюдаемые данные Ae/Be звезд Хербига невозможно объяснить в рамках исследуемой нами модели. Другими словами алголеподобные падения блеска Ae/Be звезд Хербига не могут быть вызваны экранированием звезды газопылевой протопланетой.

4. *Заключение.* В общем случае, не конкретизируя характер зависимости оптической толщи от координат, предполагая лишь то, что $\tau(x, y) \in [0, \tau^{max}]$, показано, что в минимумах блеска, с ростом глубины затмения, отношение $(\Delta m_2^{min} - \Delta m_1^{min})/\Delta m_1^{min}$ уменьшается. Область возможного расположения точек из множества $\{E_1; E_2\}$ на диаграмме E_2 vs E_1 находится внутри узкого параллелограмма $OABC$ (рис.1) с большой диагональю, описываемой уравнением (10). Рассмотрение частного случая, когда $\tau(x, y) = \tau^{max} \sqrt{1 - (x^2 + y^2)/R^2}$ показало, что искомую зависимость E_2 vs E_1 практически можно представить в виде уравнения (10). Расчетные зависимости изменения показателя цвета от блеска (рис.2) показывают принципиальное отличие от закона межзвездного поглощения. Сделан вывод о том, что алголеподобное падение блеска Ae/Be звезд Хербига не может быть вызвано экранированием звезды газопылевой протопланетой.

Абастуманская астрофизическая обсерватория им. Е.Харадзе,
Грузия, e-mail: iakobch@yahoo.com

STAR'S BRIGHTNESS AND COLOUR VARIATION DUE TO OBSCURATION BY THE PROTOPLANET

I.N.CHKHIKVADZE

Dependence between brightness and colour during star obscuration by gas-dust protoplanet on the basis of relation (1) are considered. In general case, suppose that $\tau(x, y) \in [0, \tau^{max}]$ following has been shown. In minimums of the brightness

the ratio $(\Delta m_2^{min} - \Delta m_1^{min}) / \Delta m_1^{min}$ decreases when Δm_1^{min} increases. The region of possible disposition of points belonging to the set $\{E_1; E_2\}$ on the diagram E_2 vs E_1 is located within the narrow parallelogram $OABC$: the diagonal OB is presented by equation (10). In particular case when $\tau(x, y) = \tau^{max} \sqrt{1 - (x^2 + y^2) / R^2}$ the relation E_2 vs E_1 may be presented by equation (10). The behavior of the colour-magnitude relation principally differs from interstellar reddening law. Following the consideration that in the Herbig Ae/Be stars there is a linear dependence of the colour index on brightness i.e. $(\Delta m_2 - \Delta m_1) / \Delta m_1 = \text{const}$ and later ratio is not depends on the depth of minima it's should be concluded that brightness algol-like fading of the Herbig Ae/Be stars can't be explained within the frame model of the obscuration by protoplanet.

Key words: *star: dependence between brightness and colour: obscuration by protoplanet*

ЛИТЕРАТУРА

1. Р.Гринберг, У.Хартманн, К.Чепмен, Д.Вэкер, Протозвезды и планеты, часть 2, М., Мир, 1982, с.684.
2. А.Г.У.Камерон, Протозвезды и планеты, часть 2, М., Мир, 1982, с.516.
3. P.Bodenheimer, Icarus, **29**, 165, 1976.
4. W.Wenzel, Non-periodic Phenomena in Variable Stars, IAU Coll. No.4, ed. L.Detre, Budapest, 1969.
5. I.N.Chkhikvadze, Bull. Georgian Acad. Sci., **164**, No.2, p.280, 2001.
6. Г.М.Фухтенгольц, Курс дифференциального и интегрального исчисления, М., Наука, 1969.
7. E.A.Bibo, P.S.Thé, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., **89**, 319, 1991.
8. Г.В.Зайцева, Перемен. Звезды, **19**, 63, 1973.
9. А.Ф.Пугач, Астрон. ж., **17**, 47, 1981.
10. W.Herbst, J.A.Holtzman, B.E.Phelps, Astron. J., **87**, 171, 1982.
11. A.Evans, J.J.K.Davies, D.Kilkenny, M.F.Bode, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., **215**, 537, 1989.
12. W.Herbst, J.A.Holtzman, R.S.Klasky, Astron. J., **88**, 1648, 1987.
13. H.R.E.Tjin, A.Djie, L.Remijn, P.S.Thé, Astron. Astrophys., **134**, 273, 1984.
14. Я.Н.Чхиквадзе, Астрофизика, **47**, 5, 2004.

