

УДК: 524.3—17:510.67

ОСЛАБЛЕНИЕ БЛЕСКА ЗВЕЗД ТИПА RCB:
МОДЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ

Ю. К. МЕЛИК-АЛАВЕРДЯН

Поступила 27 мая 1985

Принята к печати 15 октября 1985

Показано, что образование пыли в атмосферах звезд RCB может быть объяснено, если предположить, что в атмосферах этих звезд происходят некоторые взрывные явления.

Звезды типа RCB — это объекты высокой светимости, различных спектральных классов, характеризующиеся быстрыми и значительными по амплитуде (до 8^m) временными ослаблениями блеска. Время возвращения звезды к начальной светимости составляет от нескольких месяцев до 3 лет. Ослабленное излучение звезд типа RCB характеризуется появлением заметной поляризации, а также покраснением. Это дает основание предположить, что причиной ослабления блеска звезд типа RCB является появление облака пыли, экранирующего излучение звезды. Такая гипотеза была выдвинута в 1939 г. [1] и является в настоящее время, пожалуй, общепринятой. Однако о механизме образования этой пыли единого мнения нет. Дело в том, что представить себе образование пыли в атмосферах звезд типа RCB не просто, ведь эффективные температуры некоторых звезд данного типа достигают 7000 К. Для конденсации пыли в атмосферах столь горячих звезд необходимо невероятно большое повышение давления — до значений, превышающих давление насыщенного пара углерода, представляющего собой наиболее подходящий источник пыли в RCB звездах. В качестве возможной причины повышения давления обычно рассматриваются ударные волны, которые могут возникать в атмосферах звезд благодаря пульсациям, присущим, по-видимому, и звездам типа RCB [2]. Однако гипотеза об образовании пыли в ударных волнах, вызванных пульсациями, находится в явном противоречии с наблюдательными данными.

Действительно, если бы пыль образовывалась в ударных волнах, вызванных пульсациями звезды, то пылевое облако должно было иметь более или менее симметричную форму и окружать звезду концентрической оболочкой. Однако наблюдательные данные не подтверждают это предполо-

жение. В частности, в случае концентрической оболочки следовало бы ожидать компенсации дефицита видимого излучения в период ослабления блеска избытком инфракрасного излучения. Можно было бы ожидать также покраснения излучения звезды в период ослабления блеска. Однако наблюдения показывают, что избыточное ИК-излучение звезд типа RCB не компенсирует дефицита видимого излучения, а ослабление блеска звезд типа RCB до самого минимума не сопровождается цветовыми изменениями. Кроме этого наблюдаемая поляризация видимого излучения звезд типа RCB также противоречит модели сферически-симметричной концентрической оболочки. Наконец, не отмечено никакого усиления амплитуды пульсаций, предшествующих ослаблению блеска. Теория образования пыли в ударных волнах, вызванных пульсациями звезды, не объясняет, почему пульсации иногда сопровождаются образованием пыли, а иногда не сопровождаются. Неправильность кривой блеска звезд RCB наводят на мысль, что образование пыли в этих звездах носит нерегулярный и, может быть, даже «взрывной» характер. В настоящей работе приводятся предварительные оценочные расчеты, показывающие, что ответственная, по-видимому, за ослабление блеска звезд RCB пыль действительно может образовываться в некотором взрывном процессе.

Перейдем к расчетам. Пусть в атмосфере звезд типа RCB мгновенно выделилась энергия E_0 , в результате чего область радиуса R_0 нагрелась до температуры T_0 . Рассмотрим тот случай, когда газ нагретой области расширяется адиабатически: то есть будем пренебрегать потерей энергии на излучение, а также на взаимодействие с окружающей средой. Будем считать расширяющийся газ одноатомным, то есть положим показатель адиабаты $\gamma = 5/3$, а молекулярный вес примем равным 4 (так как атмосферы звезд типа RCB состоят, в основном, из гелия). В этих предположениях давление P , концентрация n и температура T при радиусе R области, занятой газом, определяются выражениями:

$$P = P_0 \left(\frac{R}{R_0} \right)^{-5}, \quad (1)$$

$$T = T_0 \left(\frac{R}{R_0} \right)^{-2}, \quad (2)$$

$$n = n_0 \left(\frac{R}{R_0} \right)^{-3}, \quad (3)$$

где R_0 , P_0 , T_0 и n_0 — начальные значения соответствующих параметров. Значение n_0 примем равным концентрации атомов в атмосферах сверхгигантов класса F [2], т. е. $n_0 \sim 10^{24} \div 10^{25} \text{ см}^{-3}$. Давление P_0 и температура T_0 связаны уравнением $P_0 = n_0 k T_0$, где $k = 1.38 \times 10^{-16} \text{ эрг/град}$ — постоянная Больцмана.

Таким образом, рассматриваемая модель содержит два свободных параметра P_0 и R_0 или T_0 и P_0 , которые будут определены ниже. Как известно, расширение газа происходит со скоростью, асимптотически стремящейся к скорости звука u_{3a} .

$$\frac{dR}{dt} \approx u_{3a} \approx \sqrt{\frac{kT}{4m_H}} \quad (4)$$

Интегрируя (4), находим время t , в течение которого нагретый газ, расширяясь, займет область радиуса R :

$$t \approx 1.7 \cdot 10^{-4} \frac{R^3}{R_0 \sqrt{T_0}} \quad (5)$$

Известно [2], что в звездах RCB пылевое облако закрывает весь диск звезды за время порядка нескольких месяцев, поэтому, полагая в (5) $t \approx 10^7$ с и $R \approx 10^{13}$ см, находим следующую зависимость между R_0 и T_0 :

$$R_0^3 T_0 \approx 10^{29} \text{ см}^3 \text{ град.} \quad (6)$$

С учетом (6) из (2) получаем значение T при $R \approx 10^{13}$ см

$$T \approx 10^{29} R^{-2} \approx 10^3 \text{ К.} \quad (7)$$

Таким образом, как видно из (7), газ, адиабатически расширяющийся за 10^7 с до 10^{13} см, охлаждается до температуры 10^3 К. При этой температуре конденсация пыли становится вполне возможной.

Рассмотрим теперь процесс образования пылинок. Согласно имеющимся представлениям [3], образование оптически активных пылинок в атмосферах углеродных звезд происходит путем конденсации атомов углерода на центрах конденсации. Такими центрами могут быть так называемые «сверхкритические зародыши», которые возникают в «пересыщенном» газе, то есть при условии: $P_C > P_H$, где P_C — парциальное давление углерода, а P_H — давление насыщенных паров углерода, определяемое выражением [2]:

$$\lg P_H \approx -14 + \frac{3.7 \cdot 10^4}{T} \quad (8)$$

Скорость образования сверхкритических зародышей определяется выражением [4]:

$$I \approx 7.0 \cdot 10^{33} r_c^2 T^{-3/2} P_C^2 \exp\left(-\frac{\Delta G_i^*}{kT}\right) \quad (9)$$

$$\Delta G_i^* \approx \frac{1.7 \cdot 10^{19}}{\Delta G_c^2} \quad (10)$$

$$\Delta G_0 = 3.2 \cdot 10^7 T \lg \frac{P_C}{P_H}, \quad (11)$$

$$r_* = \frac{3.3 \cdot 10^{-4}}{T} \lg \frac{P_C}{P_H}. \quad (12)$$

Массу пыли, образовавшейся в атмосферах за время t , можно оценить по формуле:

$$M_n \approx I \frac{4}{3} \pi R^3 t \frac{4}{3} \pi r_n^3 \rho_n, \quad (13)$$

где $\rho_n \approx 2.2$ г/см³ — плотность графитовых пылинок, r_n — радиус полагаемых шарообразными пылинок, который можно оценить следующим образом [2]:

$$r_n \approx 10^{-6} (P_C - P_H) t. \quad (14)$$

С другой стороны, массу пыли, образовавшейся в атмосфере звезды типа RCB, можно оценить по величине вызванного этой пылью ослабления блеска. Действительно, известно, что оптическая толщина τ пылевого облака, ответственного, как мы полагаем, за ослабление блеска звезд RCB, может достигать ≈ 10 [2]. С другой стороны,

$$\tau \approx \sigma_n n_n R, \quad (15)$$

где n_n — концентрация пылинок, R — размер пылевого облака, а σ_n — эффективное сечение экстинкции пылинки, определяемое выражением [2]:

$$\sigma_n \approx 4\pi r_n \left(\frac{2\pi r_n}{\lambda} \right) \approx 1.6 \cdot 10^8 r_n^3, \quad (16)$$

где принято $\lambda \approx 0.5$ мкм.

Концентрацию пылинок n_n в облаке радиуса R можно выразить через массу пыли M_n :

$$n_n \approx \frac{M_n}{\frac{4}{3} \pi R^3 \frac{4}{3} \pi r_n^3 \rho_n}. \quad (17)$$

Из (16), (17) и (15) получаем:

$$M_n \approx 2 \cdot 10^{-5} R^3. \quad (18)$$

Приравнявая выражение (13) этому значению, получаем:

$$I = 6 \cdot 10^{-6} r_n^{-3} t^{-1} R^{-1}. \quad (19)$$

Далее, приравнивая это значение рассчитанному по формуле (9), найдем уравнение для парциального давления углерода:

$$P_C \approx 1 \cdot 10^{-4} T^{3/10} t^{-4/5} R^{-1/5} r_*^{-2/5} \exp\left(\frac{\Delta G_i}{kT}\right), \quad (20)$$

где r_* и ΔG_i определяются выражениями (10), (11) и (12). Уравнение (20) можно решить методом последовательного приближения. В частности, полагая $t \approx 10^7$ с, а $R \approx 10^{13}$ см, и определив T из (7), находим:

$$P_C \approx 2 \cdot 10^{-6} \text{ дин/см}^2, \quad (21)$$

или, для концентрации атомов углерода,

$$n_C \approx 10^7 \text{ см}^{-3}. \quad (22)$$

Расчеты химического равновесия, которые мы здесь не приводим, показывают, что относительная концентрация углерода в атмосферах звезд типа RCB составляет в достаточно большом интервале температур и давлений величину порядка $10^{-2} + 10^{-3}$. Тогда, принимая, как и выше, концентрацию частиц в невозмущенной атмосфере звезды типа RCB порядка $10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$, из (3) найдем, $R/R_0 \approx 100$ или $R_0 \approx 10^{11}$ см. Таким образом, пыль, ответственная за наблюдаемые ослабления блеска звезд типа RCB, может образоваться благодаря адиабатическому расширению некоторой части атмосферы звезды: первоначальный размер этой расширяющейся области составляет 10^{11} см. При этом начальная температура газа может быть определена по формуле (2):

$$T_0 \approx 10^7 \text{ К.}$$

Разогрев части атмосферы до высокой температуры может наблюдаться в виде вспышки коротковолнового диапазона, предшествующей ослаблению блеска. Спектральный состав и другие характеристики таких вспышек зависели бы от многих факторов: от глубины, на которой выделяется энергия, от вида этой энергии (частицы, кванты, магнитные поля), а также от характера взаимодействия выделившейся энергии с веществом атмосферы. Что касается энергии E_0 , затраченной на нагрев газа, то ее можно оценить следующим образом:

$$E_0 \approx R_0^3 n_0 k T_0 \approx 10^{39} \text{ эрг.}$$

Эта энергия сравнима с полной энергией, излучаемой звездами типа RCB за 1 минуту. С другой стороны, известны так называемые барстеры—вспыхивающие в рентгеновском диапазоне объекты. Интересно отметить, что

полная энергия вспышки барстеров также достигает 10^{39} эрг. Это обстоятельство вместе с приведенными выше расчетами позволяет предположить, что рентгеновские вспышки барстеров и ослабление блеска звезд типа RCB могут быть разными проявлениями одного и того же феномена.

В заключение приношу благодарность академику В. А. Амбарцумяну за обсуждение.

Бюраканская астрофизическая
обсерватория

BRIGHTNESS DECREASE OF RCB STARS: MODEL CALCULATIONS

YU. K. MELIK-ALAVERDIAN

It has been shown that dust formation in the atmospheres of RCB stars can be explained in assumption of the presence of some flare phenomena in these atmospheres.

ЛИТЕРАТУРА

1. I. A. O'Keefe, *Astrophys. J.*, 90, 294, 1939.
2. Б. Е. Жильев, М. Я. Орлов, А. Ф. Пузач, М. Г. Родригес, А. Г. Тогочава, *Звезды типа RCB*, Наукова думка, Киев, 1978.
3. B. Donn, N. C. Wickramasinghe, *Astrophys. J.*, 153, 451, 1968.