АСТРОФИЗИКА

TOM 23

ОКТЯБРЬ, 1985

ВЫПУСК 2

УДК: 524.337

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ОБОЛОЧЕК НОВЫХ ГЕРКУЛЕСА 1934 г. И ДЕЛЬФИНА 1967 г.

л. С. ПИЛЮГИН

Поступила 7 марта 1985 Принята к печати 3 июля 1985

Рассмотрено формирование пространственной структуры оболочек Новых Геркулеса 1934 г. и Дельфина 1967 г. Показано, что существование полярных шапок обусловлено влиянием второго компонента системы на угловое распределение массовой толщины главной оболочки. Экваториальное кольцо формируется в результате взаимодействия главной оболочки Новой с околозвездной оболочкой. Отношение массовой толщины оболочки в экваториальном кольце и полярных шапках 1.13 для Новой Геркулеса 1934 г. и 2.7 для Новой Дельфина 1967 г. Отношение максимальных плотностей в экваториальном к льце и полярных шапках порядка 3 для Новой Геркулеса 1934 г. и порядка 70 для Новой Дельфина 1967 г.

1. Введение. Пространственная структура оболочек Новых не обладает сферической симметрией. Внешние очертания наблюдаемого изображения оболочки Новой Геркулеса 1934 г. (DQ Her) имеют овальную форму [1]. Распределение яркости по наблюдаемому изображению неоднородно. Яркость повышена на концах большой оси и вдоль малой. Э. Р. Мустель и А. А. Боярчук [1] нашли, что пространственная структура оболочки Новой Геркулеса 1934 г. представляет собой вкваториальное кольцо и две полярные шапки. Аналогичной пространственной структурой обладает оболочка Новой Дельфина 1967 г. (HR Del) [2]. Предполагалось, что такая пространственная структура оболочек Новых может быть обусловлена магнитными полями [3] или двойственностью Новых [4, 5].

В. Г. Горбацкий [4] рассмотрел взаимодействие главной оболочки Новой с околозвездной оболочкой, вещество которой концентрируется в орбитальной плоскости вокруг системы. Было показано, что учет этого взаимодействия позволяет объяснить вытянутость оболочки в полярном направлении и наличие экваториального кольца. Однако таким путем нельзя объяснить наличие выделенных полярных шапок.

Ниже будет показано, что учет влияния второго компонента системы на угловое распределение вещества в главной оболочке снимает указан-5—890 ную трудность. Мы рассмотрим формирование пространственной структуры оболочек DQ Her и HR Del.

2. Зависимость массовой толщины оболочки от направления. Мы принимаем следующий сценарий вспышки Новой [6, 7]. Звезда сбрасывает оболочку с массой m_1 равномерно по всем направлениям со скоростью движения вещества V_1 . Затем сбрасывается вторая оболочка с массой m_1 скорость движения которой V_2 больше, чем скорость движения предыдущей оболочки. В дальнейшем оболочку m_1 будем называть медленной, а оболочку m_2 — быстрой. Быстрая оболочка догоняет медленную и ускоряет ее. При их слиянии формируется главная оболочка Новой.

Вспышки Новых происходят в двойных системах. Сбрасываемое главной звездой M_1 вещество взаимодействует со вторым компонентом системы M_2 . В работе [8] показано, что если в процессе сброса оболочки выполняются условия: 1) время сброса оболочки существенно превышает период системы, 2) изменение скорости движения газа за счет торможения в поле тяготения сбрасывающей оболочку звезды мало по сравнению с величиной самой скорости, то угловое распределение плотности в оболочке после ее взаимодействия со вторым компонентом системы описывается уравнением

$$\rho(\theta) = \rho^* + (1 - \rho^*) \left(\frac{\theta}{\theta_{\max}}\right)^3, \quad \theta < \theta_{\max},$$

$$\rho(\theta) = 1, \qquad \theta > \theta_{\max}, \qquad (1)$$

где $\rho(\theta)$ — плотность газа, нормированная на свое невозмущенное значение (значение плотности в отсутствие влияния второго компонента); ρ^* — нормированная плотность газа в плоскости орбиты, определяемая уравнением

$$\rho^* = 1 - \frac{2}{\pi} \frac{q \, (1+q)^2}{\alpha \, (1+\alpha^2)}.$$
 (2)

В уравнении (1) θ — угол, отсчитываемый от плоскости орбиты, θ_{max} — максимальное значение угла θ , при котором еще проявляется влияние второго компонента на оболочку. Величина θ_{max} определяется уравнением

$$\theta_{\max} = \arcsin \frac{2q(1+q)}{1+\alpha^2},$$
(3)

(4)

Где q — отношение масс компонентов в системе

$$q = M_{\rm g}/M_{\rm H},$$

а а — отношение скорости движения газа V_в к орбитальной скорости V2 орб второго компонента системы

$$\alpha = V_g / V_{2 \text{ op6}}.$$
 (5)

Количество массы в конусе бесконечно малого углового сечения du, вершина которого лежит на звезде, а ось совпадает с раднусом, мы будем называть массовой толщиной оболочки. При расширении оболочки угловое распределение плотности, сформировавшееся после взаимодействия со вторым компонентом системы, не меняется, так как скорость звука мала по сравнению с радиальными скоростями движения газа [8]. Повтому уравнение (1) можно использовать и для описания углового распределения массовой толщины оболочки

$$m(\theta) = m^* + (1 - m^*) \left(\frac{\theta}{\theta_{\max}}\right)^3, \quad \theta < \theta_{\max},$$

$$m(\theta) = 1, \quad \theta \ge \theta_{\max} \quad (6).$$

и

$$m^* = 1 - \frac{2}{\pi} \frac{q(1+q)^3}{\alpha(1+\alpha^2)},$$
 (7)

где $m(\theta)$ — массовая толщина оболочки в направлении θ , нормированная на свое невозмущенное значение; m^* — нормированная массовая толщина оболочки в орбитальной плоскости.

Расстояние между компонентами в системах Новой Геркулеса 1934 г., и Новой Дельфина 1967 г. порядка 10¹¹ см [9—11], а радиус медленной оболочки в момент столкновения с быстрой превышает 1013 см [7]. Повтому взаимодействие со вторым компонентом мы должны рассматривать отдельно для медленной и быстрой оболочек.

После взаимодействия со вторым компонентом системы угловое эаспределение массовой толщины оболочки как медленной, так и быстрой описывается уравнением (6).

В тесных двойных системах происходит непрерывное истечение массы. Поэтому еще до вспышки Новой вокруг системы существует околозвездная оболочка m3, вещество которой концентрируется вблизи орбитальной плоскости [4]. Угловое распределение массовой толщины околозвездной оболочки описывается уравнением [4]

$$m_{3}(\theta) = K_{1} \frac{K_{2}}{\sin^{2}\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)} \left[1 - K_{2}^{2} \operatorname{ctg}\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) \right], \quad \theta < \theta_{0},$$
$$m_{1}(\theta) = 0, \qquad \theta \ge \theta_{0},$$

 $m_{\lambda}(\theta)=0,$

(8),

где

$$K_2 = \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \theta_0\right) = \frac{V_3}{3C},\tag{9}$$

а V_3 — радиальная скорость движения оболочки m_3 , C — скорость звука. Для фиксированного момента времени мы будем считать величину K_1 постоянной для любого направления, хотя она зависит от несферичности оболочки в углах от 0 до θ_0 в данный момент [4].

Главная оболочка Новой взаимодействует с околозвездной оболочкой. В результате вещество околозвездной оболочки присоединяется к главной оболочке. Теперь полная массовая толщина оболочки в направлении в запишется так:

$$m(\theta) = m_1(\theta) + m_2(\theta) + m_3(\theta), \qquad (10)$$

где зависимость $m_1(\theta)$ и $m_2(\theta)$ дается уравнением (6), а $m_3(\theta)$ уравнием (8).

3. Оболочки Новых Геркулеса 1934 г. и Дельфина 1967 г. Применим записанные уравнения для определения углового распределения массовой толщины оболочек Новых Геркулеса 1934 г. и Дельфина 1967 г. Рассмотрим сначала оболочку Новой Геркулеса 1934 г. Для определения $m_1(\theta)$ мы должны знать m_1^* и θ_{1max} , для чего необходимо иметь q и α_1 . В работе [9] для отношения масс компонентов системы Новой Геркулеса 1934 г. получено q = 0.43 - 0.50. Мы приняли q = 0.45. С принятым яначением q по наблюдаемой полуамплитуде кривой лучевой скорости главного компонента $W_1 = 136$ км/с [9] и учитывая, что плоскость орбиты системы параллельна лучу зрения [1], получаем орбитальную скорость второго компонента $V_{2 \text{ орб}} = 300$ км/с. Скорость движения медленной оболочки характеризуется смещением линий поглощения предмаксимального спектра [7] и для Новой Геркулеса 1934 г. равна 180 км/с [6]. Из (5) получаем $\alpha_1 = 0.6$, а из (3) и (7) $m_1^* = 0.26$ и $\theta_{1max} = 73.5$.

Скорость движения быстрой оболочки V_2 из наблюдений неизвестна. Мы будем рассматривать ее в качестве параметра нашей задачи. Примем пока для скорости быстрой оболочки $V_2 = 800$ км/с., Тогда получаем для $m_2 = 0.97$ и $\theta_{2 \max} = 9^\circ$. Угловое распределение массовой толщины быстрой оболочки после ее взаимодействия со вторым компонентом системы меняется незначительно и его можно считать сферически симметричным.

Массы оболочек m; и m₂ из наблюдений также неизвестны. Соотно-(мение между ними можно найти из закона сохранения импульса. Строгое решение задачи о столкновении медленной и быстрой оболочек может быть

280

получено только газодинамическими методами. Однако неопределенность параметров оболочек обесценивает строгость газодинамических методов. Поэтому будем рассматривать столкновение оболочек как механическое слипание, пренебрегая при этом газодинамическими эффектами. Для полярного направления закон сохранения импульса можно записать так:

$$m_1\left(\theta = \frac{\pi}{2}\right)V_1 + m_2\left(\theta = \frac{\pi}{2}\right)V_2 = \left(m_1\left(\theta = \frac{\pi}{2}\right) + m_2\left(\theta = \frac{\pi}{2}\right)\right)V_\rho,$$
(11)

где V_p — скорость расширения главной оболочки в полярном направлении. Радиальная скорость движения оболочки DQ Нег, измеренная через несколько лет после вспышки, равнялась 290 км/с [12]. Так как луч зрения параллелен орбитальной плоскости [1], то измеряем вкваториальную скорость расширения оболочки V_{\bullet} . Сравнивая полярные и экваториальные размеры оболочки [1], можно определить скорость движения оболочки в полярном направлении: $V_p = 390$ км/с. Массовую толщину главной оболочки в полярном направлении выберем в качестве единицы массовой толщины.

$$m_1\left(\theta = \frac{\pi}{2}\right) + m_2\left(\theta = \frac{\pi}{2}\right) = 1.$$
 (12)

Из уравнений (11) и (12) находим $m_1\left(\theta = \frac{\pi}{2}\right) = 0.66$ и $m_8\left(\theta = \frac{\pi}{2}\right) = 0.34$. Второй компонент системы не влияет на массовую толщину оболочек в полярном направлении, повтому полученное соотношение между массовыми толщинами медленной и быстрой оболочек соответствует соотношению между невозмущенными массовыми толщинами втих оболочек. С учетом этого для углового распределения массовой толщины главной оболочки можно записать

$$m_{1+2}(\theta) = 0.51 + 0.49 \left(\frac{\theta}{\theta_{1 \max}}\right)^3$$
 (13)

Для определения углового распределения массовой толщины после взаимодействия главной оболочки с околозвездной оболочкой мы должны энать константы K_1 и K_2 в уравнении (8). Константу K_2 можно определить по наблюдаемому отношению ширины вкваториального пояса к вкваториальному дигметру, что дает для DQ Her $K_2 = 2$ [4]. Константу K_1 можно определить при помощи закона сохранения импульса для направления, лежащего в плоскости экватора. $m_1(\theta=0) V_1 + m_2 V_2 + m_3(\theta=0) V_3 = [m_1(\theta=0) + m_2 + m_3(\theta=0)] V_{\bullet}.$ (14)

Величина радиальной скорости расширения околозвездной оболочки m_3 равна $V_3 = 40$ км/с [4]. Из (14) получаем $m_3(\theta = 0) = 0.62$. С другой стороны, из (8) имеем $m_3(\theta = 0) = K_1$ и, следовательно, $K_1 = 0.62$. Окончательно для углового распределения массовой толщины полной наблюдаемой оболочки Новой Геркулеса 1934 г. имеем

$$m(\theta) = 0.51 + 0.49 \left(\frac{\theta}{\theta_{1 \max}}\right)^3 + \frac{1.24}{\sin^2\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)} \left| 1 - 4 \operatorname{ctg}\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) \right|.$$
(15)

Угловое распределение массовой толщины полной оболочки Новой Геркулеса 1934 г., рассчитанное согласно уравнению (15), приведено на рис. 1. Там же показано угловое распределение массовой толщины в медленной, быстрой и околозвездной оболочках. Из рисунка хорошо видно,



Рвс. 1. Относительное угловое распределение массовой толщины оболочки Новой Геркулеса 1934 г. т.— полная (наблюдаемая) оболочка, т₁— медленная оболочка, т₂ — быстрая оболочка, т₃ — околозвездная оболочка.

что повышение массовой толщины оболочки в полярных направлениях обусловлено неоднородностью углового распределения массовой толщины медленной оболочки, а экваториальное кольцо формируется после присоединения к главной оболочке околозвездной оболочки.

Вернемся к вопросу о скорости движения быстрой оболочки. Как уже отмечалось выше, определений этой скорости из наблюдений нет. Однако в [6] на рис. 3 приведено смещение различных систем линий поглощения

СТРУКТУРА ОБОЛОЧЕК НОВЫХ

для Новой Геркулеса 1934 г. Скорости движения потоков газа лежат в интервале от 600 до более чем 1000 км/с. Можно предположить, что скорость движения быстрой оболочки V_x также лежит в этом интервале. Мы рассчитали угловое распределение массовой толщины оболочки для скоростей 600 и 1000 км/с, помимо принятого нами значения 800 км/с. Результеты приведены на рис. 2. Из рисунка видно, что угловое распределение массовой толщины оболочки количественно несколько меняется для разных скоростей, однако качественная картина полностью сохраняется.



Рис. 2. Относительное угловое распределение массовой толщины оболочки Новой Геркулеса 1934 г. для разных значений скорости быстрой оболочки V_2 . Для указанных кривых значения скорости равны: 1 — 600, 2 — 800, 3 — 1000 км/с.

Будет ли проекция нашей модели на небесную сферу давать выделенные полярные шапки? Для ответа на этот вопрос мы должны рассчитать изофоты. Для этого необходимо знать распределение плотности газа по углам и вдоль радиуса, а также геометрию оболочки. Примем, что закон распределения плотности вдоль радиуса имеет вид

$$\rho(r) \sim \frac{\rho_0}{r^3}$$
 (16)

Внешний раднус оболочки в заданном направления $r_2(\theta)$ определяется уравнением

$$r_{2}(\theta) = \int_{0}^{t} V(\theta) dt = V(\theta) t \sim V(\theta).$$
 (17)

Правомерность выноса скорости из-под интеграла обоснована тем, что зависимость угловых размеров оболочки от времени можно аппроксимирс-

л. с. пилюгин

вать линейной зависимостью [1]. Для определения скорости движения в направлении ^θ можно переписать уравнение (14) в виде

$$V(\theta) = \frac{m_1(\theta) V_1 + m_2 V_2 + m_3(\theta) V_3}{m_1(\theta) + m_3 + m_3(\theta)}.$$
 (18)

Уравнения (17, 18) описывают фронт распространения оболочки Новой. Повтому изофоты слабой интенсивности должны иметь контур, описываемый уравнением (18).

Оценки показывают [2], что радиальная протяженность полярных шапок порядка 15% длины полярной оси, а радиальная протяженность экваториального кольца порядка 15% экваториального диаметра. Будем считать, что радиальная протяженность оболочки в любом направлении пропорциональна радиусу в данном направлении. Тогда

$$r_1(\theta) = \operatorname{const} r_2(\theta), \tag{19}$$

где r₁(θ) — внутренний радиус оболочки в данном направлении. Используя (16), для массовой толщины оболочки можно записать

$$m(\theta) \sim \int_{r_1(\theta)}^{r_2(\theta)} r^3 \rho(r, \theta) dr \sim r_2(\theta) \rho_0(\theta)$$

ИЛИ

$$\rho_0(\mathbf{6}) \sim \frac{m(\mathbf{6})}{r_s(\mathbf{6})}.$$
 (20)

Уравнение (16) перепишется в виде

$$\rho(r, b) \sim \frac{m(b)}{r_{2}(b)} \frac{1}{r^{2}} \qquad (21)$$

Выбирая некоторое значение радиуса r^* таким, что $r_2 > r^* > r_1$ для люоого θ , можно из уравнения (21) определять относительное угловое распределение плотности в оболочке для фиксированного значения радиуса. Полагая $r(\theta) = r_1(\theta)$, мы получим максимальное значение плотности для данного направления. Относительные угловые распределения плотности для данного направления. Относительные угловые распределения плотности приведены на рис. 3. Из рисунка видно, что как плотность на фиксированном расстоянии от центра, так и максимальная плотность в экваториальном кольце выше, чем в полярных шапках. Между полярными шапками и вкваториальным кольцом происходит понижение плотности. Различие плотностей может вести к стратификации излучения в различных линиях.

СТРУКТУРА ОБОЛОЧЕК НОВЫХ

Рассчитанные изофоты и схематическое распределение яркости по наблюдаемому изображению оболочки DQ Нег из [1] приведены на рис. 4. Изофоты даны в логарифмической шкале. Логарифм максимальной интенсивности принят за единицу. Мы ограничились изофотами, интенсивность которых превышает 1% от максимальной. Более слабые изофоты имеют контур, близкий к описываемому уравнением (17). Однако эти изофоты. по-видимому, уже не наблюдаются. Рассчитанное распределение ярких областей согласуется с наблюдаемым.



Рис. 3. Относительное угловое распределение плотности на фиксированном расстоянии от центра Р_ге и максимальной плотности Р_{товк} в оболочке Новой Геркулеся 1934 г.

Рассмотрим теперь оболочку Новой Геркулеса 1967 г. Согласно [2], для нее $V_{\rho} = 560$ км/с, $V_{\bullet} = 190$ км/с и $K_2 = 1.4$. В работе [13] по строена сводная кривая лучевой скорости оболочки на предмаксимальной стадии, откуда $V_1 = 230$ км/с. Сравнивая Новые Геркулеса 1934 г. и Дельфина 1967 г. и учитывая, что отношение скоростей V_3 пропорционально отношению констант K_2 , найдем для HR Del $V_3 =$ = 25 км/с. Параметры двойной системы HR Del определены в работах [10, 11, 14]. Получены следующие значения: $W_1 = 100$ км/с, i=39, q = 0.5-0.6. Принимая q = 0.53, находим $\alpha_1 = 0.8$. У новой Дельфина 1967 г. наблюдались движения газа со скоростями 1000-1700 км/с [15]. Мы привяли $V_2 = 1400$ км/с.

Относительное угловое распределение массовой толщины оболочки. плотности на фиксированном расстоянии от центра и максимальной плотности для оболочки Новой Дельфина 1967 г. приведены на рис. 5. Точка А указывает границу экваториального кольца, точка В — границу полярных шапок согласно [2]. Отношение максимальных плотностей в экваторигльном кольце и полярных шапках порядка 70.



Рис. 4. А — схематическое распределение яркости по наблюдаемому изображению Новой Герхулеса 1934 г. [1]; В — рассчитанные изофоты в логарифмической шкале.

Таким образом, даже такая упрощенная схема вспышки Новой и формирования пространственной структуры оболочки позволяет объяснить налячие полярных шапок и вкваториального кольца. Однако отсутствие разработанной теории вспышки Новой и неполнота наблюдательных данных не позволяют получить надежные количественные характеристики. Для более строгого решения задачи необходимо знать, например, на каком уровне формируются линии поглощения предмаксимального спектра и существует ли градиент скорости в медленной оболочке, т. е. как соотносятся наблюдаемая скорость расширения медленной оболочки и ее скорость на уровне разделения систем (~ 10¹¹ см). С другой стороны, требуется более надежное определение параметров системы: отношение масс компонентов, орбитальные скорости и т. д. Это позволит более строго рассматривать процесс формирования пространственной структуры оболочек Новых.

Предложенный механизм формирования полярных шапок эффективно работает в том случае, когда скорость расширения оболочки меньше или

порядка орбитальной скорости второго компонента системы. По-видимому. это условие справедливо только для медленных Новых, к которым относятся рассмотренные нами.



Рис. 5. Относительное угловое распределение массовой толщины *m*, плотности из фиксированном расстоянии р_r, и максимальной плотности р_{max} в оболочке Новой Дельфина 1967 г. А. В — угловые размеры полярных шапок и экваториального кольцэ из работы [2].

4. Заключение. Учет влияния второго компонента системы на угловое распределение массовой толщины главной оболочки Новой позволяет объяснить наличие выделенных полярных шапок. Экваториальное кольцо формируется вследствие взаимодействия главной оболочки Новой с околозвездной оболочкой. Отношение максимальных плотностей в экваториальном кольце и полярных шапках порядка 3 для DQ Нег и порядка 70 для HR Del. Отношение массовых толщин в экваториальном кольце и полярных шапках 1.13 для DQ Нег и 2.7 для HR Del.

Автор выражает благодарность И. Г. Колеснику за предложенную задачу и обсуждение результатов.

Главная астрономическая обсерватория АН УССР

л. с. пилюгин

THE SPATIAL STRUCTURE OF NOVAE DQ Her AND HR Del SHELLS

L. S. PILYUGIN

The formation of the spatial structure of DQ Her and HR Del shells is considered. It has been shown that polar caps are formed due to the influence of the satellite on the angular distribution of mass shell depths. The formation of equatorial ring is caused by the interaction of the nova main shell and the circumstellar shell. The ratio of mass shell depths in the equatorial ring to the one in polar caps is 1.13 for DQ Her and 2.7 for HR Del. The ratio of maximum density in the equatorial ring and in the polar caps is about 3 for DQ Her and about 70 for HR Del.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. E. R. Mustel, A. A. Boyarchyk. Astrophys. Space Sci., 6, 183, 1970.
- 2. J. Solf, Ap. J., 273, 647, 1983.
- 3. Э. Р. Мустель, Астрон. ж., 33, 182, 1956.
- 4. В. Г. Горбацкий, Астрофизика, 8, 369, 1972.
- 5. J. B. Hutchings, M N. RAS, 158, 177, 1972.
- 6. В. Г. Горбацкий, И. Н. Минин, Нестационарные звезды, Физматгиз, М., 1963.
- 7. В. С. Бычкова, К. В. Бычков, Астрон. ж., 53, 1196, 1976.
- 8. И. Г. Колесник. Л. С. Пилюзин, Препринт ИТФ АН УССР, № 120Р, 1984.
- 9. J. B. Hutchings, A. P. Cowly, D. Crampton, Ap. J., 232, 500, 1979.
- 10. J. B. Hutchings, P. A. S. P., 92, 458, 1980.
- 11. A. Bruch, P. A. S. P., 94, 916, 1982.
- 12. Б. А. Воронцов-Вельяминов, Газовые туманности и Новые звезды, Изд. АН СССР. 1948.
- 13. Л. И. Антипова, Астрон. ж., 54, 68, 1977.
- 14. J. B. Hatchings, Ap. J., 232, 176, 1979.
- 15. J. B. Hutchings, Publ. Dom. Obs. Vict., 13, 347, 1970.