

## КИНЕМАТИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ АТМОСФЕРЫ СВЕРХГИГАНТА HDE 226868 — ОПТИЧЕСКОЙ КОМПОНЕНТЫ ЛЕБЕДЯ X-1

О. Э. Ааб, И. М. Копылов, В. В. Соколов

С помощью модели атмосферы оптической компоненты Лебедя X-1 с параметрами  $T_{\text{ef}} = 32\,900$  К,  $\lg g = 3.1$  вычислены профили водородных и гелиевых линий и оптические глубины их формирования. Построена зависимость лучевых скоростей отдельных линий от их оптических глубин — кинематический разрез. Проведено сравнение атмосферы HDE 226868 с атмосферами одиночных сверхгигантов  $\alpha$  Cam и  $\rho$  Leo. Наблюдательный материал получен на 6-м телескопе.

With the help of a model atmosphere for the optical component of Cyg X-1 with the parameters  $T_{\text{ef}} = 32\,900$  K,  $\lg g = 3.1$  hydrogen and helium line profiles, and optical depths of their formation are calculated. A dependence is constructed of radial velocities of individual lines on their optical depths-kinematic cross-section. Comparison is made of the atmosphere of HDE 226868 with the atmospheres of single supergiants  $\alpha$  Cam and  $\rho$  Leo. The observational material has been obtained with the 6-meter telescope.

Изучение строения и кинематики атмосфер сверхгигантов, входящих в двойные системы, представляет собой интересную задачу, поскольку эффекты расширения атмосферы здесь могут быть усилены, по крайней мере при определенных фазах орбитального периода. Особенный интерес представляют сверхгиганты, входящие в тесные системы с вырожденной компонентой, где возможны как приливное искажение звездной поверхности, так и влияние рентгеновского излучения на свойства атмосферы оптической компоненты. Целью данной работы является построение кинематического разреза атмосферы сверхгиганта HDE 226868 — оптической компоненты рентгеновского источника Лебедь X-1, а также сравнение его с аналогичными разрезами атмосфер одиночных сверхгигантов близких спектральных классов и светимостей.

Наблюдательной основой работы послужили спектрограммы HDE 226868, полученные на II камере Основного звездного спектрографа 6-м телескопа в 1976—1981 гг. Основные результаты спектрофотометрической обработки этого материала изложены в работе Ааб и др. [1]. Определение физических параметров оптической компоненты Лебедя X-1 [2] позволило произвести расчет модели атмосферы для этого сверхгиганта. Модель с параметрами  $T_{\text{ef}} = 32\,900$  К,  $\lg g = 3.1$  была рассчитана с помощью программы ATLAS-5, версия SAM-1 [3]. Расчет профилей линий водорода и нейтрального гелия проводился с помощью методики, разработанной и используемой в Специальной астрофизической обсерватории, которая изложена в достаточно полном виде в работе Снежка [4], где приводится дополнительный перечень использованной литературы.

Измерение лучевых скоростей абсорбционных линий проводилось с помощью астроспидометра САО. Методика измерений и таблица лучевых скоростей опубликованы в отдельной статье [5]. Лучевые скорости имеются для 34 спектрограмм с дисперсиями 9 и 14 Å/мм в синей и красной областях спектра, несколько спектрограмм имеют дисперсию 28 Å/мм. Использование более низкой дисперсии вызвано необходимостью получения ближней ультрафиолетовой области для высших членов бальмеровской серии ( $H_{10} - H_{15}$ ). Среднеквадратичная ошибка измерения лучевой скорости одной линии составляет в среднем 8.1 км/с для линий водорода, 8.4 км/с для линий He I. Она определялась по «парным» спектрограммам, т. е. полученным практически в одной орбитальной фазе в течение одной ночи. Для стандартных сверхги-

гантов использовались дисперсии 7 и 9 Å/мм в ультрафиолетовой и синей областях спектра. Аналогичные ошибки измерения отдельной линии составляют 6.5 и 6.3 км/с.

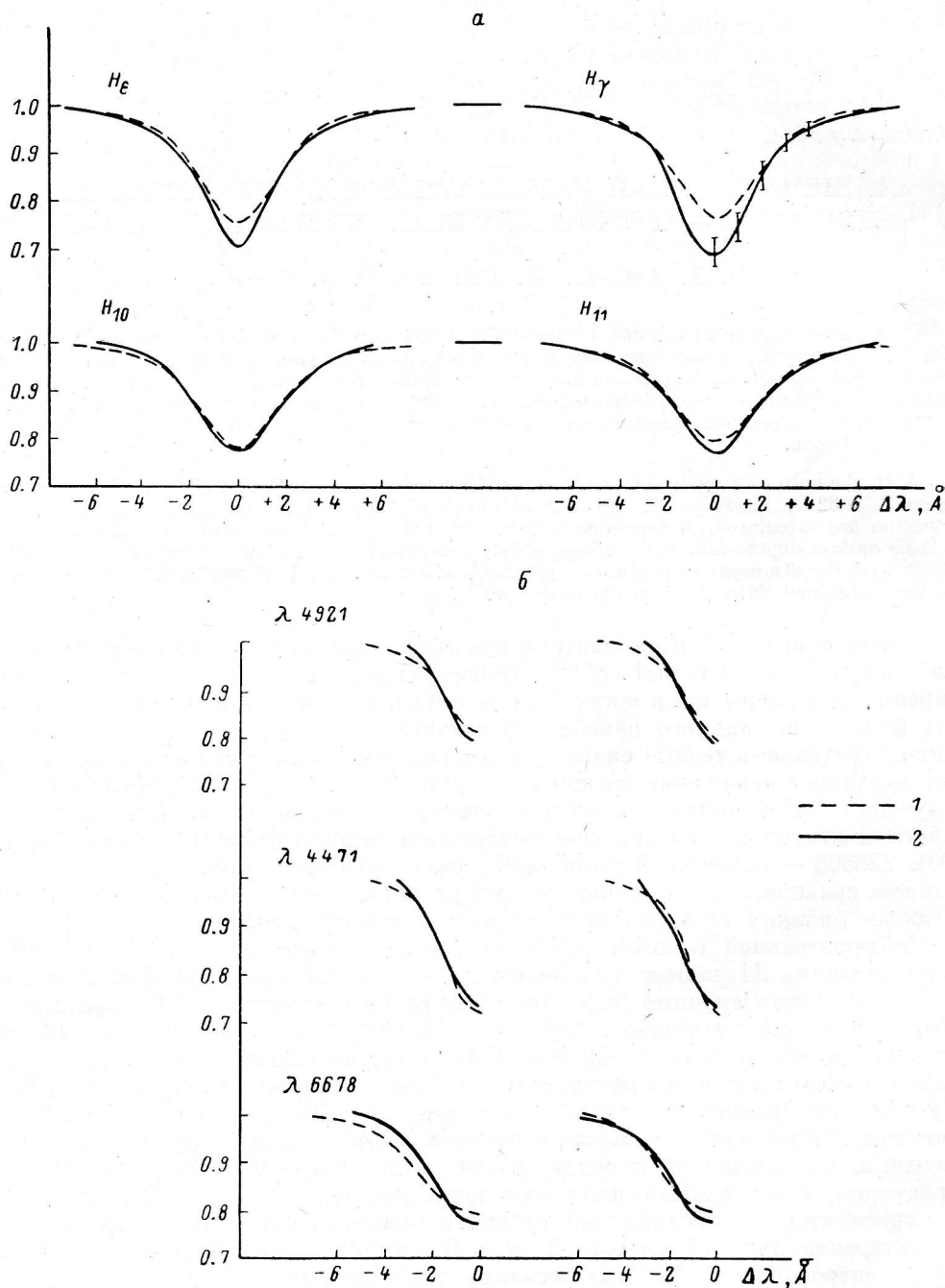


Рис. 1. Сравнение теоретических (1) и наблюдаемых (2) профилей водородных линий (а) и линий гелия (б).

Вертикальными черточками отмечена  $\pm\sigma$  наблюдаемого профиля на разных глубинах.

На рис. 1, а приведено сравнение теоретических и наблюдаемых профилей водородных линий для скорости вращения  $v \sin i = 120$  км/с и микротурбулентной скорости  $v_{\text{mt}} = 15$  км/с. Согласие оказывается наилучшим для высших членов бальмеровской серии ( $H_{10}$ ,  $H_{11}$ ) и ухудшается к низшим ( $H_\epsilon$ ,  $H_\gamma$ ).

На рис. 1, б показано сравнение теоретических и наблюдаемых профилей линий He I. Так как при расчете профилей приходилось задавать отношение содержания гелия к водороду в атмосфере звезды  $\alpha = N(\text{He})/N(\text{H})$  и варьировать микротурбулентную скорость  $v_{\text{mt}}$ , на рисунке приведено два варианта расчетов:  $\alpha = 0.15$ ,  $v_{\text{mt}} = 60 \div 75$  км/с (слева) и  $\alpha = 0.37$ ,  $v_{\text{mt}} = 35 \div 50$  км/с. Принятое содержание гелия  $\alpha = 0.15$ , как оказалось, требует весьма больших значений микротурбулентной скорости для приведения в согласие теоретических и наблюдаемых профилей. Наилучшее согласие профилей достигается при скорости вращения, меньшей 120 км/с (на рис. 1, б  $v \sin i = 75$  км/с). Это указывает на то, что реальное значение  $v \sin i$  составляет, по-видимому, около 100 км/с, а встречающееся в литературе значение  $v \sin i = 150$  км/с несколько завышено.

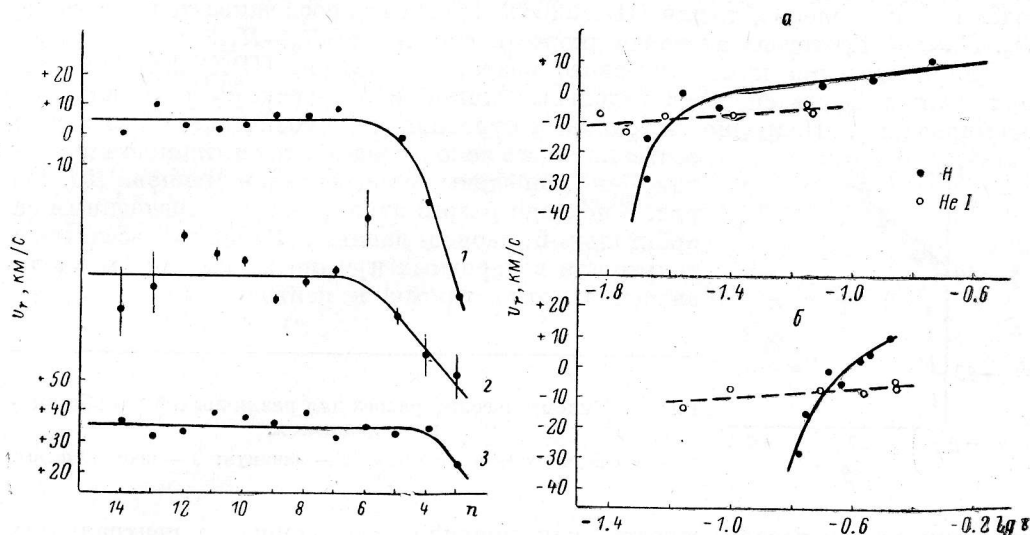


Рис. 2. Ход лучевых скоростей бальмеровских линий с номером.

1 —  $\alpha$ Cam; 2 — HDE 226868; 3 —  $\rho$ Leo.

Рис. 3. Кинематический разрез атмосферы HDE 226868.

а — профиль  $\tau$  не уширен вращением звезды; б — уширен.

Далее вычислялись оптические глубины формирования потока в каждой точке профиля линии  $\tau = \tau(\lambda)$  («профиль  $\tau$ »). Определение этой величины дано в работе [4]. Уширение водородных линий рассчитывалось согласно Гриму [6]. Расчет производился в двух вариантах. В первом из них вычисление оптических глубин проводилось для неуширенного вращением профиля линии, во втором профиль  $\tau$  уширялся вращением аналогично профилю линии. Учет вращения сводился к свертке профиля линии (и профиля  $\tau$ ) с гауссовым профилем, полуширина которого соответствовала той или иной скорости вращения. Гауссов профиль для линии, расширенной вращением, брался для упрощения расчетов, однако здесь принималось во внимание то хорошо известное обстоятельство, что профили линий, расширенных макротурбулентными (или микротурбулентными) движениями в атмосфере, описываемые гауссовым распределением, мало, а чаще всего неуловимо мало, отличаются от профилей, расширенных за счет вращения звезды (см., например, работу [8]). Уширение вращением приводит к сжатию шкалы оптических глубин и перемещению ее ближе к непрерывному спектру из-за влияния на поток в данной точке профиля всех участков поверхности звезды. Сущность процедуры свертки профиля  $\tau$  с учетом вращения звезды и примеры расчетов влияния вращения и макроскопических движений в атмосфере звезды на профили линий можно найти в работе [7].

На рис. 2 приведено свидетельство расширения атмосферы сверхгиганта HDE 226868 — «бальмеровский прогресс», усредненный по 4 фазам. До процедуры усреднения для каждой спектрограммы вычислялось среднее значение  $v_T$  по линиям  $H_8 - H_{12}$  и вычиталось из индивидуальных значений лучевой ско-

рости. Вертикальными черточками отмечены среднеквадратичные ошибки значений скорости  $v_r$ . Точность ухудшается в сторону высших членов, что естественно из-за ослабления линий, но ошибка увеличивается также и для  $H_\beta$ ,  $H_\alpha$ , что, по-видимому, есть следствие влияния эффектов, меняющихся с фазой орбитального периода. Для сравнения приведены данные для двух одиночных сверхгигантов:  $\alpha$  Cam (O9.5 Ia) и  $\rho$  Leo (B1 Ib), усредненные в каждом случае по двум спектрограммам и имеющие среднеквадратичную ошибку менее 4 км/с. По величине градиента лучевой скорости HDE 226868 ведет себя вполне соответственно своей температуре и светимости (O9.55 Iab). Интересно, что если для  $\alpha$  Cam линии водорода начиная с  $H_\epsilon$  и до  $H_{15}$  уже не показывают градиента  $v_r$ , а для  $\rho$  Leo фактически  $v_r$  только у  $H_\alpha$  отличается от лучевых скоростей более высоких членов, то для HDE 226868 градиент прослеживается вплоть до  $H_{12}$ . Линией проведено значение скорости среднее по  $H_8-H_{12}$ .

Для построения кинематического разреза атмосферы HDE 226868 мы сопоставили лучевые скорости отдельных линий с оптическими глубинами их формирования. Подробно методика построения кинематического разреза и особенности его использования при интерпретации наблюдений изложены в диссертации Ченцова [9]. На рис. 3 показан разрез атмосферы по усредненным значениям орбитального периода данным. Глубины рассчитаны только для водородных и гелиевых линий; мы брали значения, относящиеся к центральным частям ли-

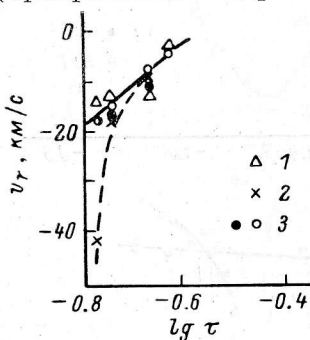


Рис. 4. Кинематический разрез для различных фаз орбитального движения.

1 — максимум лучевой скорости; 2 — минимум; 3 — промежуточные фазы.

нии, так как лучевая скорость, как правило, характеризует центральную часть профиля, особенно для  $H_\beta$ , крылья которой асимметричны. Случай *a* — неуширенный вращением профиль  $\tau$ , *b* — уширенный. Хотя второй случай, по-видимому, физически более правильный, возникают трудности со взаимным согласованием линий водорода и гелия, что связано с ограниченностью применяемого метода. Вообще говоря, мы не можем построить целостной картины, где есть однозначная зависимость лучевой скорости от оптической глубины: зависимости для гелия и водорода несколько расходятся. Следует отметить, что в силу большого числа допущений, которые мы вносим при построении модели (использование стационарной модели без истечения вещества для анализа движения ее слоев, учет отклонений от ЛТР и т. п.), полученный кинематический разрез носит скорее качественный, нежели количественный характер. Но не приходится сомневаться, что речь идет именно о расширении атмосферы, т. е. скорости на меньших глубинах становятся более отрицательными. Скорость центра тяжести сверхгиганта в зависимости от орбитальной фазы, по-видимому, достаточно описана кривой лучевых скоростей Болтона [10], наши значения  $v_r$  по  $H_8-H_{12}$  в пределах ошибок не отличаются от значений Болтона в соответствующих фазах.

Для детального сравнения разрезов в различных фазах требуется большее количество спектрограмм с высшими членами бальмеровской серии, но и по имеющемуся материалу можно сказать, что изменение градиента лучевой скорости происходит лишь в самых верхних слоях. На рис. 4 приведены кинематические разрезы в различных фазах орбитального периода (вариант *b*) по спектрограммам с линейной дисперсией (9 Å/мм). Отсутствующая скорость  $H_8-H_{12}$  заменялась ее значением по Болтону. Бралась четыре характерные фазы на кривой  $v_r$ : в максимуме, минимуме и местах смены знака скорости. Максимальный градиент обнаруживается в фазе, близкой к минимуму лучевой скорости, т. е. в той квадратуре, когда сверхгигант движется по орбите к наблюдателю.

В заключение можно сказать, что при построении кинематического разреза

HDE 226868 — оптической компоненты Лебеда X-1 прослеживаются некоторые особенности: асимметрия верхних слоев атмосферы, большая протяженность области истечения вещества, нежелательны в одиночных сверхгигантах. Подтверждение этих особенностей требует дальнейших высокодисперсионных наблюдений.

#### Литература

1. С п е к т р оптического компонента Лебеда X-1 / О. Э. Ааб, Л. В. Бычкова, И. М. Копылов и др. — *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), 1982, 16, с. 3—11.
2. С п е к т р о с к о п и ч е с к о е исследование оптической компоненты Лебеда X-1 / О. Э. Ааб, Л. В. Бычкова, И. М. Копылов и др. — *Письма в АЖ*, 1981, 7, с. 417—421.
3. W r i g h t S. L., A r g y r o s J. D. Atlas 5 at the University of London (SAM 1). 1. Programming and implementation. — *Communications University London Observ.*, 1975, No 75.
4. С н е ж к о Л. И. К методике расчета контуров линий поглощения. — *Сообщ. САО*, 1971, 3, с. 3—16.
5. А а б О. Э. Новые лучевые скорости сверхгиганта в системе Лебедь X-1. — *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), 17, с. 6—17.
6. Г р и м Г. Спектроскопия плазмы. М.: Атомиздат, 1969. 452 с.
7. Ч е н д о в Е. Л., С н е ж к о Л. И. Расширение атмосферы как причина дифференциальных сдвигов линий в спектре сверхгиганта  $\beta$  Ori. — *Сообщ. САО*, 2, 1970, 2, с. 60.
8. C a s t e l l i F. Fine analysis of the F component of the  $\epsilon$  Aurigae system. — *Astron. and Astroph.*, 1978, 69, p. 23.
9. Ч е н д о в Е. Л. Спектроскопические проявления нестационарности белых сверхгигантов. Автореф. канд. дис., 1980.
10. B o l t o n C. T. Orbital elements and an analysis of models for HDE 226868=Cygnus X-1. — *Astrophys. J.*, 1975, 200, p. 269—277.

Поступила в редакцию 22.03.82