

ХРОМОСФЕРЫ ЗВЕЗД ТИПА UV СЕТ

Р. Е. ГЕРШБЕРГ

Поступила 20 ноября 1969

Приведены результаты спектрофотометрического изучения 5 вспыхающих звезд типа UV Set в спокойном состоянии: относительные интенсивности эмиссионных линий, их абсолютные светимости и контуры эмиссионной линии H_{α} . Эти данные сопоставляются с соответствующими характеристиками солнечной хромосферы, причем частично учитываются различные условия видимости протяженной хромосферы Солнца и „точечной“ звездной хромосферы. Из такого сопоставления следует значительное сходство областей в солнечной и звездных хромосферах, ответственных за излучение бальмеровских линий, но плотность в этих областях на вспыхающих звездах, по-видимому, в десятки раз выше, чем на Солнце. Кратко обсуждаются свойства нижних хромосфер и корон вспыхающих звезд.

В спектрах вспыхающих звезд типа UV Set, полученных во время спокойного состояния этих объектов, обнаруживаются сильные эмиссионные линии водорода и ионизованного кальция. Это обстоятельство дает основание подозревать существование хромосфер—то есть областей с инверсным температурным градиентом—у звезд типа UV Set. На спектрограмме EV Lac, полученной с высокой дисперсией в спокойном состоянии звезды, Вильсон [1] обнаружил еще несколько эмиссионных линий нейтральных атомов, характерных для спектра солнечной хромосферы: линии гелия, железа, кремния; по ширине водородных линий он оценил $T_e \leq 14\,000^\circ \text{K}$, что также не противоречит хромосферной природе этой эмиссии. Исследования вспышек звезд типа UV Set обнаружили ряд важных аналогий между этими эруптивными процессами и хромосферными вспышками на Солнце. Наконец, согласно современным представлениям о внутреннем строении звезд, красные карлики являются полностью конвективными звездами, и с теоретической точки зрения у них можно ожидать сильные конвектив-

ные движения под фотосферой и заметный нерадиативный поток энергии в фотосфере, что должно привести к появлению хромосферы и короны.

В течение нескольких лет на 2.6 м рефлекторе им. академика Г. А. Шайна (ЗТШ) проводились спектрографические исследования вспыхающих звезд. Полученный материал позволяет определить некоторые количественные характеристики спокойных атмосфер звезд типа UV Cet и сопоставить их со свойствами солнечной хромосферы.

Относительные интенсивности эмиссионных линий, бальмеровский декремент. В табл. 1 перечислены спектрограммы EV Lac и AD Leo, сфотографированные на щелевом спектрографе СП-72 (с дисперсией 80 Å/мм) и использованные для определения относительных интенсивностей эмиссионных линий. Все снимки получены на пластинках ОаО. Наблюдения велись вблизи меридиана, так что эффекты атмосферной экстинкции и дифференциальной рефракции оказались пренебрежимо малы. При обработке снимков использовалась спектральная чувствительность инструментальной системы, определенная А. А. Боярчуком в ходе спектрофотометрических исследований симбиотических звезд в те же наблюдательные сезоны. Во время большей части экспозиции 11.1.66 (3^h 45^m) блеск звезды AD Leo находился под непрерывным фотовольтрическим контролем, который проводился Т. С. Белякиной на 64 см менисковом телескопе; при этом не было обнаружено каких-либо изменений блеска звезды. Результаты обработки спектрограмм [приведены в табл. 1. В последней строке таблицы даны относительные интенсивности эмиссионных линий в спектре EV Lac перед вспышкой 11.12.65, вычисленные по данным В. Е. Кунеля [2].

Таблица 1

Звезда	Дата	Экспозиция	Относительные интенсивности линий								
			H _β	H _γ	H _δ	H+H _ε	K	H ₉	H ₉	λ4471	λ4026
EV Lac	11. 8.64.	4 ⁿ	1	0.72	0.52	0.78	0.69	0.25	0.18	<0.08	<0.08
	11. 8.65.	4 40 ^m	1	0.72	0.48	0.72	0.72			<0.07	<0.09
	19. 8.65.	4 50	1	0.73	0.42	0.91	0.94	0.30			
AD Leo	10. 1.66.	5 20	1	0.91	0.63	1.26	1.30	0.39			
	11. 1.66	5 30	1	0.63	0.52	0.91	0.98	0.26	0.16		
EV Lac	11.12.65.		1	0.96	0.44	0.70					

В общем бальмеровский эмиссионный декремент EV Lac и AD Leo оказывается весьма пологим. Все три крымских определения бальмеровского декремента EV Lac находятся в хорошем согласии друг с

другом. К этому декременту EV Lac близок и эмиссионный декремент AD Leo, полученный по снимку 11.1.66, когда звезда с наибольшей степенью вероятности была в спокойном состоянии. Но относительные интенсивности эмиссионных линий в спектре AD Leo 10.1.66 заметно отличаются от этого „среднего“ декремента; на этой спектрограмме также аномально мал скачок непрерывного излучения звезды у предела молекулярной полосы Ti 0,4954 Å: $J_{\lambda+}/J_{\lambda-} = 0.67$, тогда как на снимках 12.6.65. и 11.1.66. он равен 0.42 и 0.41 соответственно. Можно подозревать, что во время получения этого снимка AD Leo была в возбужденном состоянии, так как декремент AD Leo 10.1.66 самый пологий и приближается к виду, характерному для вспышек этих звезд [2, 3].

На рис. 1 приведено сопоставление относительных интенсивностей эмиссионных линий водорода в спектрах вспыхивающих звезд и в сол-

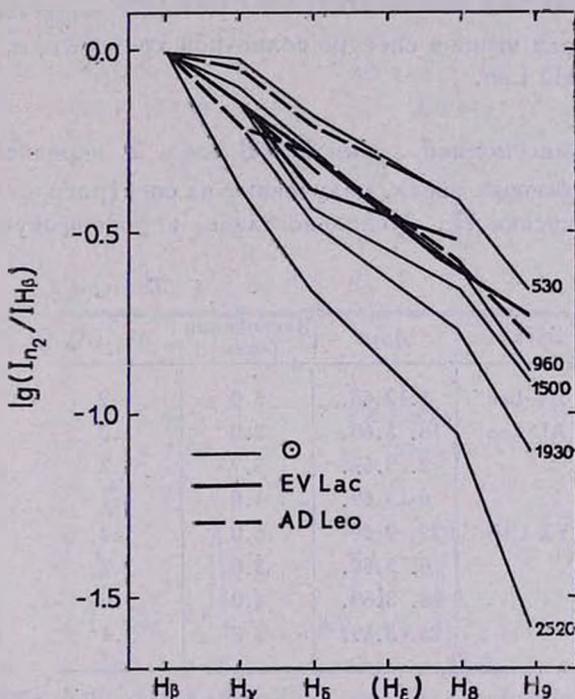


Рис. 1. Относительные интенсивности эмиссионных линий водорода в спектрах солнечной хромосферы—тонкие линии; в спектрах EV Lac—толстые линии и AD Leo—пунктир. Цифры справа соответствуют высотам в хромосфере над солнечным диском (в километрах).

нечной хромосфере [4]; последние данные были получены во время солнечного затмения при разных высотах края Луны над лимбом Солн-
2—135

ца. Из рисунка следует, что бальмеровский эмиссионный декремент EV Lac и AD Leo в спокойном состоянии неплохо согласуется с интегральным спектром средней хромосферы, а самый пологий бальмеровский декремент AD Leo 10.1.66. близок к декременту в спектре хромосферы, когда луч зрения проходит через нижние слои хромосферы в непосредственной близости от солнечного лимба (При таком сопоставлении следует иметь в виду, что в нижней хромосфере Солнца существенный вклад в эмиссионную линию H_α дает рассеянный свет фотосферы; в линии H_β он мал и в более высоких членах серии, а также по мере подъема, во всех линиях серии становится пренебрежимым.)

Если считать, что верхние границы интенсивностей гелиевых линий, приведенные в табл. 1, близки к реальным интенсивностям этих линий, то отношение $J_{H\alpha}/J_{H\beta}$ в спектре EV Lac в несколько раз выше, чем в солнечной хромосфере. Но отношение $J_{Ca+}/J_{H\beta}$ определено в несколько раз выше в спектре солнечной хромосферы, чем в спектрах EV Lac и AD Leo.

Контуры эмиссионной линии H_α . В табл. 2 перечислены спектрограммы вспыхивающих звезд, полученные на спектрографе кудэ ЗТШ для изучения эмиссии H_α . Использовалась короткофокусная камера

Таблица 2

Звезда	Дата	Экспозиция (часы)	$\Delta\lambda_{1/2}$ (Å)
EV Lac	3.12.68.	5.0	1.2
AD Leo	18. 5.68.	2.0	1.3
	2. 3.69.	2.7	1.2
	6. 3.69.	1.0	1.1
YZ CMi	22. 2.69.	6.0	1.2
	6. 3.69.	3.0	1.2
	23. 3.69.	4.0	1.0
	26. 3.69.	3.8	1.4

спектрографа с дисперсией 24 Å/мм и астрономическая пленка А—700. Во время спектрографирования YZ CMi 23 и 26.2.69. Н. И. Шаховская на 64 см менисковом телескопе вела фотovoltaическое патрулирование блеска звезды, но плохая погода резко снизила эффективность такого патруля; ни в ходе этих фотovoltaических наблюдений, ни при

визуальном гидировании на щели спектрографа блеск исследуемых звезд не испытывал заметных глазу изменений, которые можно было бы уверенно отличить от изменений условий видимости.

На всех этих спектрограммах были профотометрированы эмиссионные линии H_{α} в звездных спектрах и по 2—4 линии неона в спектрах сравнения, причем линии неона выбирались близкими к линии H_{α} по длине волны и по интенсивности. Измерения проводились через 0.01 мм со щелью, соответствующей 0.02 мм на негативе.

Полученные таким образом контуры звездной эмиссии H_{α} и инструментальные контуры приведены на рис. 2. Как следует из графиков, измеренные полуширины эмиссионных линий H_{α} в спектрах звезд примерно лишь в два раза превышают полуширины инструментальных контуров, так что в данном случае не удастся уверенно учесть эффект инструментального уширения и можно обсуждать лишь самые общие свойства контуров.

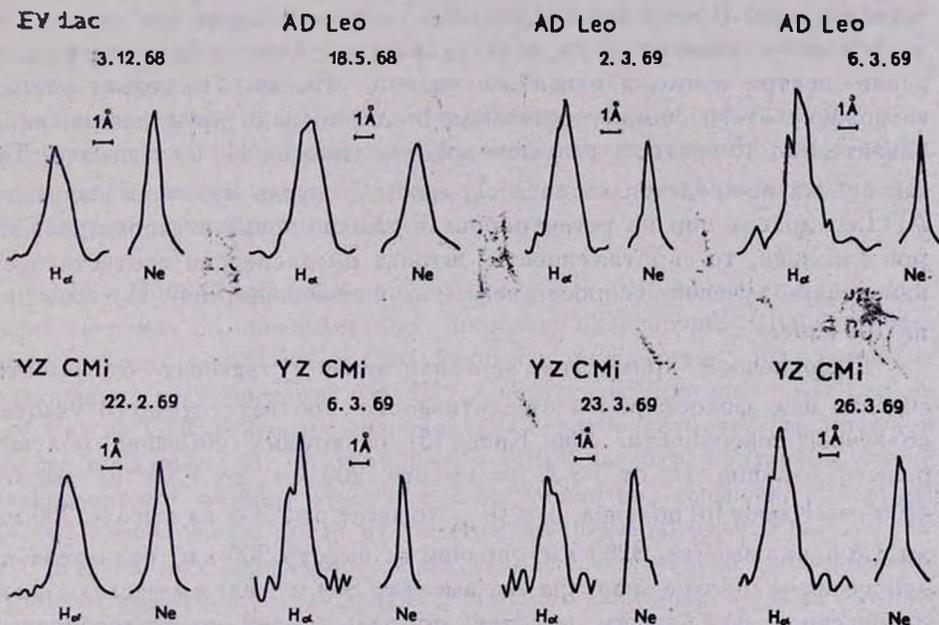


Рис. 2. Контурсы эмиссионной линии H_{α} в спектрах вспыхивающих звезд и соответствующие им инструментальные контурсы.

Построенные контурсы эмиссии H_{α} в пределах точности измерений имеют, как правило, простой колоколообразный вид, без заметной асимметрии, депрессии в центре или широких крыльев. Небольшие „зазубрины“ на трех профилях линии H_{α} в спектрах YZ CMi не

превышают ширины шумовой дорожки. Приближенно истинную полуширину таких эмиссионных линий можно оценить как квадратный корень из разности квадратов наблюдаемой звездной и инструментальной полуширин; такие оценки приведены в последнем столбце табл. 2. Однако спектр AD Leo 6.3.69. отличен от других снимков тем, что обнаруживает неоднородность эмиссии по высоте спектра: в направлении, перпендикулярном дисперсии, видна эмиссионная линия, сходная с эмиссией на других спектрограммах, но недалеко от края этой обычной линии ее пересекает под заметным углом короткий и довольно резкий штрих, длина которого составляет примерно треть нормальной высоты щели. Эта деталь дает вторичный максимум на контуре линии с коротковолновой стороны от главного максимума. Тщательное рассмотрение этого штриха не позволяет с полной уверенностью отбросить возможность дефекта эмульсии. Другая возможность—привлечение гипотезы о кратковременной вспышке, давшей всплеск яркости в линии H_{α} со смещением по частоте и растянутую по высоте расширением спектра. В этой дополнительной детали содержится около 1/30 полной интенсивности линии, и ее излучение с учетом скорости расширения спектра могло длиться не более 6—10 сек. Поскольку полная экспозиция этого снимка составляла 1 час, то надо предполагать приблизительно 15-кратное усиление яркости эмиссии H_{α} во вспышке. Такая оценка не представляется абсурдной, но столь коротких вспышек AD Leo до сих пор не регистрировали. Если принять гипотезу быстрой вспышки, то протяженность штриха по дисперсии соответствует изменению лучевой скорости вещества в этой возможной H_{α} -вспышке на 100 км/сек.

В солнечной хромосфере профили линии H_{α} зависят от высоты области над фотосферой и от активности соответствующего участка солнечной поверхности. Еще Кинан [5] обнаружил убывание полуширины $\Delta\lambda_{1/2}$ линии H_{α} от 1.9 Å на высоте 200 км до 1.3 Å на высоте 4500 км. Клюбс [6] получил, что $\Delta\lambda_{1/2}$ убывает от 2.3 Å на высоте 200 км до 1.6 Å на высоте 3200 км, причем на высоте 200 км видна слабая депрессия в центре контура, на высотах 800 и 1400 км — следы этой депрессии, и на больших высотах профиль имеет колоколообразный вид. Наиболее детальная спектрофотометрия эмиссии H_{α} в солнечной хромосфере выполнена Кратами [7], Смит [8] и Кононовичем [9]. Кра-ты нашли $\Delta\lambda_{1/2} = 1.8 + 1.4$ Å на высотах 1110—4450 км для одной области, $\Delta\lambda_{1/2} = 2.1$ Å для 900—2200 км в другой области и $\Delta\lambda_{1/2} = 2.5 + 2.0$ Å для 3700 + 6450 км в области над факельной площадкой; в последнем случае депрессия в центре контура была видна вплоть до 6450 км,

тогда как в двух предыдущих областях профили становились одновершинными уже на высоте около 3000 км. Смит построила профили H_{α} от основания хромосферы до 12500 км и нашла, что $\Delta\lambda_{1/2}$ изменяется от 2.0 до 1.4 Å, причем центральная депрессия видна вплоть до высоты 5000 км. Кононович нашел, что на высоте 1500 км $\Delta\lambda_{1/2} = 1.0$ Å и боковые максимумы на 40% превышают интенсивность в центре линии; на высоте 3000 км полуширина линии практически такая же, но боковые максимумы едва заметны на краях плоской вершины контура; на высоте 5600 км колоколообразный профиль имеет полуширину 0.8 Å.

Сопоставляя эти многочисленные данные по контурам H_{α} в солнечной хромосфере с приведенными выше результатами изучения H_{α} эмиссии в хромосфере UV Set-звезд, можно лишь заключить, что контуры звездной эмиссии, по-видимому, несколько уже, чем в нижней и средней хромосферах Солнца. В контурах звездной эмиссии не обнаруживается столь характерная для солнечной хромосферы центральная депрессия профиля, но для уверенной констатации этого различия необходимы наблюдения звезд с лучшим разрешением по спектру. С другой стороны, возможно, что различие реально, но связано оно не с различием самих хромосфер, а с разным вкладом рассеянного хромосферой света фотосферы в контур эмиссионной линии H_{α} : на Солнце этот вклад весьма существенный [7, 9], а на вспыхивающих звездах он, видимо, пренебрежимо мал.

Абсолютные светимости эмиссионных линий. В табл. 3 собраны сведения об эквивалентных ширинах эмиссионных линий в спектрах 5 звезд типа UV Set, полученных в результате наблюдений на различных спектрографах ЗТШ. Спектрографирование AD Leo и UV Set на СПЭМ-2 велось параллельно с фотовольтрическим патрулем блеска этих звезд П. Ф. Чугайновым [10], так что соответствующие эквивалентные ширины измерены определенно вне вспышек, но постоянство блеска звезд, когда их спектры фотографировались на СП-72 и СПП-16, подтверждалось лишь в ходе визуального гидирования. Помимо крымских наблюдений в табл. 3 включены также эквивалентные ширины эмиссионных линий в спектре EV Lac 11.12.65., вычисленные по данным Кункеля [2].

Судя по табл. 3, имеют место различия эквивалентных шириин на разных спектрах одной и той же звезды. Эмиссия кальция, например, в спектре EV Lac 8.8.68. явно слабее, чем в спектрах 11.8.64. и 11.8.65.; столь же явно кальциевая эмиссия усилена на спектре AD Leo 11.1.66. Следует, однако, иметь в виду, что различия эквивалентных шириин в

табл. 3 могут быть не только отражением реальных, физических различий, но и следствием случайных фотометрических ошибок (видимо, до 30% в W_λ) и результатом сопоставления спектров разной чистоты.

Таблица 3

Звезда	Дата	Спектрограф	Дисперсия ($\text{\AA}/\text{мм}$)	Эквивалентные ширины линий (\AA)						
				H_α	H_β	H_γ	H_δ	$H_\epsilon + H_6$	K	H_8
EV Lac	11. 8.64.	СП-72	80		6.7	4.6	4.7	12	13	5.4
	11. 8.65.	"	80		7.5	5.5	5.9	14		
	19. 8.65.	"	80		5.6	5.4	5.1			
	11.12.65.	[2]	260		5.2	11	6.1	19		
	8. 8.68.	СП-72	160		5.5	5.2	4.7	7.2	7.8	4.5
	9. 8.68.	"	160	6.0						
	3.12.68.	кудэ	24	2.6						
AD Leo	19. 3.65.	СПЭМ-2	55*	7.5						
	3. 6.65.	"	55	7.5						
	4. 6.65.	"	55	8.4	6.8	7.4	3.5	8.0	6.0	
	14. 6.65.	СП-72	80		3.4	2.7	2.4			
	11. 1.66.	"	80		4.7	5.4	3.6	16	14	5.7
	22. 5.68.	СПП-16	375		4.2		5.0	7.2	9.5	
	18. 5.68.	кудэ	24	2.5						
UV Cet	21. 9.65.	СПЭМ-2	55		14					
	23. 9.65.	"	55		18					
	24. 9.65.	"	55		21					
	25. 9.65.	"	55	1.5						
	26. 9.65.	"	55		23					
	YZ CMi	22. 2.69.	кудэ	24	7.5					
26. 3.69.		"	24	4.2						
Wolf630	11. 8.68.	СП-72	160	5.5	2.0					

Для перехода от эквивалентных ширины к абсолютной светимости эмиссионных линий необходимо знать абсолютную интенсивность непрерывного излучения исследуемых звезд. На рис. 3 приведены относительные распределения энергии в спектрах EV Lac и AD Leo, построенные по спектрограммам, снятым на ЭТШ, по трехцветным фо-

* Реальное разрешение спектрограмм, полученных на СПЭМ-2, соответствует снимкам на обычных спектрографах с дисперсией 100–150 $\text{\AA}/\text{мм}$.

тоэлектрическим наблюдениям этих звезд [11] и по спектрофотометрии EV Lac [2]. Как показал Чугайнов [11], эмиссионные М-карлики обнаруживают при широкополосных фотометрических наблюдениях систематические избытки в ультрафиолете по сравнению с неэмиссионными dM-звездами соответствующих спектральных классов. Учет этого эффекта эмиссии понизит на рис. 3 точку U-континуума примерно на $\Delta \lg J \approx 0.15$,

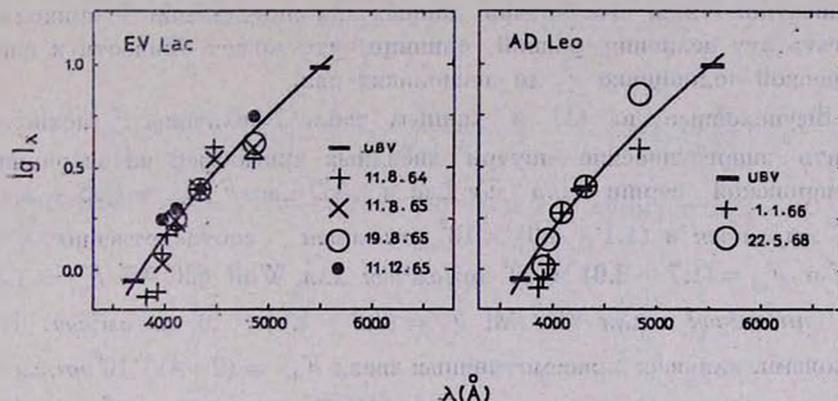


Рис. 3. Относительные распределения энергии в спектрах EV Lac и AD Leo по UBV - фотометрии и по снимкам, полученным в разные дни.

после чего согласие спектрофотометрических фотографических данных и широкополосных фотоэлектрических результатов оказывается вполне удовлетворительным. Используя это обстоятельство, можно принять яркостную температуру поверхности звезд в частотах рассматриваемых хромосферных линий равной цветовой температуре, определяемой по UBV-фотометрии; для UV Cet получается $T_{UBV} = 2700 \pm 100^\circ \text{K}$, для остальных звезд табл. 3 — $3000 \pm 100^\circ \text{K}$. По-видимому, такая оценка абсолютной поверхностной яркости звезды может дать ошибку не более, чем в два раза. Абсолютный поток в линии с 1 см^2 поверхности хромосферы F_λ можно подсчитать тогда по формуле

$$F_\lambda = \pi B_\lambda(T_{UBV}) W_\lambda \Phi, \quad (1)$$

где W_λ — измеренная эквивалентная ширина линии, $B_\lambda(T_{UBV})$ — функция Планка и Φ — фактор, учитывающий эффект двойственности звезд. Как известно, звезды типа UV Cet — это в большинстве случаев слабые компоненты в двойных системах, состоящих из звезд близких спектральных классов, причем яркий компонент часто вообще не имеет эмиссионных деталей в спектре. В последнем случае имеет место простое соотношение:

$$\Phi = 10^{0.41m} + 1, \quad (2)$$

где Δm — разность блеска компонентов системы. К сожалению, оно не применимо ни к одной из рассмотренных выше звезд. В системе L — 726 — 8 AB, куда входит UV Cet, оба компонента имеют заметную эмиссию; в системе Wolf 630 AB компоненты столь близки, что нет сведений об их спектральных различиях. О двойственности AD Leo и EV Lac свидетельствуют, видимо, лишь некоторые астрометрические особенности этих объектов, а о двойственности YZ CMi вообще ничего не известно. Из-за отсутствия данных для определения Φ приходится полагать эту величину равной единице, что может привести к систематической недооценке F_λ до нескольких раз.

Вычисленные по (1) и данным табл. 3 величины F_λ позволяют оценить энергетические потери звездных хромосфер на излучение в бальмеровской серии: для EV Lac и AD Leo $F_{\alpha\beta\gamma\delta} = (1.5 + 2.4) \times 10^6 \text{ эрг/см}^2\text{сек}$ и $(1.1 + 3.0) \times 10^6 \text{ эрг/см}^2\text{сек}$ соответственно, для UV Cet $F_{\alpha\beta} = (1.7 + 2.0) \times 10^6 \text{ эрг/см}^2\text{сек}$ для Wolf 630 AB $F_{\alpha\gamma} = 1.3 \times 10^6 \text{ эрг/см}^2\text{сек}$ и для YZ CMi $F_\alpha = (0.9 + 1.6) \times 10^6 \text{ эрг/см}^2\text{сек}$. Иными словами, для всех 5 рассмотренных звезд $F_{B\alpha} = (2 + 4) \times 10^6 \text{ эрг/см}^2\text{сек}$. В солнечной хромосфере, согласно [12, 13], $F_{B\alpha} = (1 + 2) \times 10^6 \text{ эрг/см}^2\text{сек}$.

Обсуждение результатов. Сопоставление звездных хромосфер, наблюдаемых в интегральном свете точечного источника, и хромосферы Солнца, видимой в различных точках над фотосферой и над лимбом, требует предварительной оценки тех эффектов усреднения, которые неизбежны при наблюдениях звездных оболочек. Существующие экспериментальные возможности приводят к усреднению характеристик звездных хромосфер, по крайней мере, на трех „уровнях“: усреднение микрохарактеристик масштаба спиккулярной структуры и хромосферной сетки, размазывание по всей поверхности звезды возможных образований типа активных областей и усреднение систематических различий оптических свойств хромосферы на диске и над лимбом звезды. Наблюдения UV Cet-звезд не дают пока какой-либо информации о микроструктуре хромосферы. Неоднородности типа активных областей можно было бы, видимо, обнаружить с помощью статистической обработки продолжительных рядов фотометрических наблюдений. Что касается усреднения на третьем „уровне“, то здесь можно получить некоторые количественные оценки.

Рассмотрим простейшую модель: звезда радиуса R окружена сферически симметричной оболочкой с экспоненциально убывающей плотностью

$$n(h) = n_0 e^{-h/h_0} \quad (3)$$

(постоянство h_0 соответствует барометрической модели с пренебрежимо малыми градиентами температуры и силы тяжести). Можно показать, что в такой оболочке отношение массы вещества в единичном столбе, расположенном на расстоянии $r = R + h$ от центра звезды (рис. 4), к массе вещества в единичном столбе, перпендикулярном поверхности звезды, определяется соотношением:

$$\begin{aligned} \frac{m(R+h)}{m_{\perp}} &= 2 \frac{R+h}{h_0} e^{R/h_0} K_1 \left(\frac{R+h}{h_0} \right) = \\ &= \sqrt{2\pi} \left(\frac{R+h}{h_0} \right)^{1/2} e^{-h/h_0} \left[1 + \frac{3h_0}{8(R+h)} + \dots \right] \approx 2.5 \left(\frac{R}{h_0} \right)^{1/2} e^{-h/h_0}. \end{aligned} \quad (4)$$

Если просуммировать эту величину по всем r и сумму отнести к диску звезды, то

$$\begin{aligned} \frac{\bar{m}}{m_{\perp}} &= 2 \left\{ 1 + 2 \frac{h_0}{R} + 2 \left(\frac{h_0}{R} \right)^2 + e^{R/h_0} K_2 \left(\frac{R}{h_0} \right) \right\} = \\ &= 2 \left\{ 1 + \sqrt{\frac{\pi h_0}{2R}} + 2 \frac{h_0}{R} + \dots \right\} \approx 2. \end{aligned} \quad (5)$$

(K_1 и K_2 — цилиндрические функции соответствующих порядков).

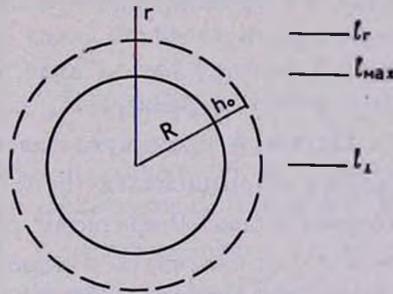


Рис. 4.

В применении к Солнцу ($R = 7 \times 10^{10}$ см, $h_0 \approx 5 \times 10^7$ см [4]) отношение (4) показывает, что масса вещества в хромосфере на луче зрения l_{max} , касательном к диску ($h = 0$), в 100 раз больше, чем на луче зрения l_{\perp} , проходящем через центр диска. На луче зрения, проходящем на высоте $h = (1.5 + 3) h_0$, где, согласно рис. 1, бальмеровский декремент солнечной хромосферы близок к бальмеровскому декременту в интегральном спектре спокойных UV Set-звезд, масса вещества

примерно в $5 + 20$ раз больше, чем на луче зрения I_{\perp} . С другой стороны, согласно (5), бальмеровский декремент в интегральном свете звезды соответствует декременту „удвоенной“ звездной хромосферы. Строго говоря, бальмеровский декремент может зависеть от нескольких физических параметров излучающей среды: от конкретного механизма возбуждения, от электронной температуры и характерных внутренних движений, от оптической толщи в линиях. Общность механизма возбуждения солнечной и звездных хромосфер лежит в основе всей рассматриваемой концепции. Судя по числу и виду эмиссионных линий звездных хромосфер, внутреннее состояние вещества, где эффективно излучает водород, в обоих случаях также достаточно близко; следовательно, при наблюдаемом сходстве декрементов должны быть сходны и оптические толщи в частотах бальмеровских линий. Таким образом, наблюдаемый бальмеровский декремент спокойных UV Cет-звезд позволяет заключить, что общее число атомов водорода на втором уровне (N_2) над 1 см^2 фотосферы вспыхивающей звезды в $3 + 10$ раз больше, чем над 1 см^2 солнечной фотосферы.

Исследование абсолютной светимости хромосферных линий показывает, что интенсивность излучения хромосферного столба единичного сечения вспыхивающих звезд в частотах бальмеровских линий примерно вдвое превышает соответствующую интенсивность излучения в солнечной хромосфере. Поскольку бальмеровский декремент свидетельствует о самопоглощении, то хромосферное излучение в водородных линиях не может соответствовать линейной части кривой роста; но оно не может соответствовать и верхней части этой кривой, так как контуры H_{α} не обнаруживают столь характерных для этой части кривой роста сильных крыльев. Остается промежуточная часть кривой роста, где выход энергии из слоя пропорционален $(\ln N_2)^{1/2}$; различие в светимости вдвое соответствует здесь 50-кратному различию в N_2 .

В оптически тонкой среде плотность водородных атомов на втором уровне пропорциональна квадрату полной плотности вещества. Но в хромосфере, где $\tau_{\alpha} > 1$, эта зависимость приближается к линейной. Следовательно, на основании всех предыдущих оценок можно утверждать, что общее число атомов водорода над 1 см^2 фотосферы звезды типа UV Cет в $3 + 50$ раз больше, чем над 1 см^2 солнечной фотосферы.

Заключение. Теоретическое рассмотрение звездной хромосферы и короны в принципе сводится к расчету самосогласованной задачи об энергетическом балансе среды, которая нагревается потоком нерадиативной энергии и охлаждается за счет излучения во всем объеме и за

счет расширения короны. Независимой переменной в этой задаче является мощность приходящего потока энергии, параметрами—условия на границе „невозмущенной“ фотосферы: сила тяжести, плотность и химический состав вещества, его температура. Решение такой задачи сопряжено с громоздкими расчетами радиативных потерь среды сложного химического состава с заметными градиентами температуры и плотности и со значительной оптической толщиной в частотах многих линий. В зависимости от конкретного вида нерadiативного потока энергии, приходящего снизу, в хромосфере и короне могут диссипировать и переходить друг в друга различного вида гидродинамические и гидромагнитные возмущения, и расчет такой стационарной системы возмущений представляет принципиальную трудность в теоретическом расчете звездных хромосфер. Поэтому с помощью наблюдений приходится решать обратную задачу: по физическим параметрам реальных хромосфер оценивать мощность идущего снизу потока энергии.

Основной результат изложенного выше исследования сводится к утверждению, что в единичном столбе звездной хромосферы число водородных атомов, эффективно излучающих в бальмеровской серии, в 3–50 раз больше, чем соответствующее число в солнечной хромосфере. Геометрическая структура хромосферы определяется величиной h_0 , которая, в свою очередь, зависит от тепловой (и турбулентной) энергии газа—выше отмечалось, что они достаточно близки к соответствующей энергии в солнечной хромосфере—и от гравитационного потенциала. Для UV Cet

$$\frac{M_*}{R_*} = \frac{0.04M_{\odot}}{0.08R_{\odot}} = 0.5 \frac{M_{\odot}}{R_{\odot}} \quad (6)$$

для других звезд табл. 3 данных об их массах нет, но вообще для вспыхивающих звезд характерно соотношение $M_*/R_* \approx M_{\odot}/R_{\odot}$. Поэтому $h_0^*/R_* = h_0^{\odot}/R_{\odot}$ и геометрические структуры солнечной и звездной хромосфер должны быть сходны. Следовательно, плотности вещества в тех слоях хромосфер, где эффективно излучает водород, на вспыхивающих звездах в десятки раз выше, чем на Солнце.

Несмотря на сходство „водородных“ областей хромосфер, более глубокие хромосферные слои на Солнце и на вспыхивающих звездах должны существенно различаться. Дело в том, что на Солнце, где эффективная температура поверхности около 6000°K, кинетическая температура в области инверсии около 4200°K, а на вспыхивающих звездах $T_{ef} \approx 3000$ °K; при большой силе тяжести это приводит к большей плотности вещества на поверхности красных карликовых звезд, и

для прогрева этого более плотного и более холодного вещества до хромосферных условий необходим гораздо больший поток нерадиативной энергии. Согласно [13], 18% общих энергетических потерь солнечной хромосферы приходится на излучение в бальмеровских линиях и 70% — на излучение нижних слоев хромосферы; на вспыхивающих звездах относительный вклад бальмеровских линий должен быть существенно меньшим и подавляющая часть излучения хромосферы должна быть связана с радиативным охлаждением нижних слоев. Таким образом, можно думать, что плотность потока нерадиативной энергии в фотосферах вспыхивающих звезд по крайней мере на 1–2 порядка величины превышает соответствующую плотность потока от конвективной зоны на Солнце.

Звездные короны определяются двумя основными параметрами: гравитационным потенциалом и плотностью вещества в основании. Гравитационный потенциал определяет и геометрическую структуру, и температуру короны, и в этом отношении солнечная и звездная короны должны быть подобны. Поскольку температурный режим в звездной хромосфере и в нижней короне оказывается близким к соответствующим условиям на Солнце, то можно ожидать, что и плотность вещества в основании звездных корон в десятки раз превышает соответствующую плотность в солнечной короне. Однако это условие не жесткое: из-за небольших различий в эффективности механизма нагрева „склейка“ хромосферы с короной звезды может произойти на несколько инном расстоянии от основания хромосферы, в результате чего плотность вещества в основании короны может существенно измениться, а на интегральные свойства хромосферы усечение или удлинение экспоненциально убывающей верхушки не скажется. По радиоизлучению вспышки YZ CMi Кан [14] оценил электронную плотность в короне этой звезды $2 \times 10^9 \text{ см}^{-3}$ и $7 \times 10^8 \text{ см}^{-3}$ на высотах $7.5 \times 10^9 \text{ см}$ и $18 \times 10^9 \text{ см}$ над поверхностью звезды соответственно; в солнечной короне на тех же высотах электронная плотность в 20 раз меньше [15]. Следует, однако, иметь в виду, что эти оценки Кана выполнены для сильно возмущенной, а не спокойной короны; кроме того, в [14] сделано допущение, что дрейф по частоте радиоизлучения вспышки обусловлен чисто гидродинамическим распространением возмущающего агента, но справедливость такого допущения не очевидна.

Выражаю глубокую благодарность Т. С. Белякиной, В. И. Бурнашеву, Э. А. Витриченко, П. Ф. Чугайнову и Н. И. Шаховской за фотозлектрическое патрулирование звезд во время получения их спек-

тров, В. И. Пронику и К. К. Чуваеву—за помощь в получении спектрограмм, А. А. Боярчуку, В. П. Гринину, Э. Е. Дубову, С. Б. Пикельнеру и А. Б. Северному — за обсуждение результатов.

Крымская астрофизическая
обсерватория

CHROMOSPHERES OF THE UV CET-TYPE STARS

R. E. GERSHBERG

Results of spectrophotometric investigations of 5 flare UV Cet-type stars in quiet state—relative intensities of emission lines, their absolute luminosities and H_{α} —line emission profiles—are given. These data are compared to corresponding solar chromosphere characteristics taking partly into account the different observational conditions for the extended solar chromosphere and point-like stellar ones. From this comparison one concludes that there is a close similarity between the regions in solar and stellar chromospheres which are responsible for the Balmer line emission; but the densities in these stellar regions seem to be ten times higher compared to solar densities. Low chromospheres and coronae of flare stars are discussed briefly.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. O. C. Wilson, P. A. S. P., 73, 15, 1961.
2. W. E. Kunkel, Dissertation, Austin, 1967.
3. Р. Е. Гершберг, С. А. Каплан, Известия КрАО, 44 (в печати).
4. Р. Томас, Р. Ашей, Физика солнечной хромосферы, Мир, М., 1965.
5. Р. С. Кевлан, Ap. J., 76, 134, 1932.
6. S. V. M. Clube, MN, 118, 18, 1958.
7. В. А. Крат, Т. В. Крат, Известия ГАО, № 153, 1955; № 155, 1956; № 167, 1961.
8. E. v. Smith, Ap. J., 126, 529, 1957.
9. Э. В. Кононович, Вестн. МГУ, № 4, 37, 1958.
10. Р. Е. Гершберг, П. Ф. Чугайнов, Астрон. ж., 43, 1168, 1966; 44, 260, 1967.
11. П. Ф. Чугайнов (в печати).
12. Э. Е. Дубов, Астрон. ж., 42, 1014, 1965.
13. M. Kjerfve, Space Sci. Rev., 9, N 5, 1969.
14. F. D. Kahn, Nature, 222, 1130, 1969.
15. Е. Н. Паркер, Динамические процессы в межпланетной среде, Мир, М., 1965.