

Т. ФЕКЛИСТОВА

РАСЧЕТ ЛИНИЙ СИИ ДЛЯ ОБЛАСТИ ВАКУУМНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТА В-ЗВЕЗД

Изучение возбужденных состояний иона СИИ, дающих линии в вакуумной ультрафиолетовой области спектра, представляет для астрофизики уже не только теоретический интерес. При внеатмосферных наблюдениях δ и π Скорпиона [1] были отождествлены 36 линий иона СИИ, наблюдаемых в поглощении, большинство из которых (29 линий) образуется при возбуждении внутреннего $2s$ электрона до $2p$ состояния. Это переходы типа $2s3s^3S-2p3s^3P^0$ с длинами волн 1426,45—1428,53 Å. При возбуждении внешнего электрона образуются линии типа $2s3p^1P^0-2s4d^1D_2$ с длиной волны 1531,85 Å.

Оценим вероятности спонтанных электрических дипольных переходов и силы осцилляторов наблюдаемых линий.

Рассмотрим следующие дипольные переходы:

$2s3s^3S_1-2p3s^3P_2^0$	λ в Å: 1426,45	$2s3d^3D_3-2p3d^3F_4^0$	λ в Å: 1576,49
$^3S_1-^3P_1^0$	1427,85	$^3D_2-^3F_3^0$	1577,32
$^3S_1-^3P_0^0$	1428,53	$^3D_3-^3F_3^0$	1577,40
$2s3p^3P_1^0-2p3p^3P_2$	1427,93	$^5D_1-^3F_2^0$	1577,89
$^3P_2^0-^3P_2$	1428,19	$^3D_2-^3F_2^0$	1577,94
$^3P_0^0-^3P_1$	1428,56	$^3D_3-^3F_2^0$	1578,02
$^3P_1^0-^3P_1$	1428,68	$2s3p^3P_2^0-2p3p^3D_3$	1576,89
$^3P_2^0-^3P_1$	1428,94	$^3P_1^0-^3D_2$	1577,53
$^3P_1^0-^3P_0$	1429,11	$^3P_2^0-^3D_2$	1577,85
$2s3d^3D_2-2p3d^3D_3^0$	1477,61	$^3P_0^0-^3D_1$	1578,03
$^3D_3-^3D_2^0$	1477,68	$^3P_1^0-^3D_1$	1578,17
$^3D_1-^3D_2^0$	1478,00	$^3P_2^0-^3D_1$	1578,48
$^3D_2-^3D_2^0$	1478,05	$2s3s^1S_0-2p3s^1P_1$	1591,45
$^3D_3-^3D_2^0$	1478,12	$2s3p^3P_2^0-2s4d^3D_3$	1620,05
$^3D_1-^3D_1^0$	1478,30	$^3P_1^0-^3D_2$	1620,33
$^3D_2-^3D_1^0$	1478,35	$^3P_0^0-^3D_1$	1620,61
$2s3p^1P_1^0-2s4d^1D_2$	1531,85	$^3P_2^0-^3D_2$	1620,67
		$^3P_1^0-^3D_1$	1620,76
		$^3P_2^0-^3D_1$	1621,09

В этом списке приведены лабораторные длины волн [2], которые и были использованы в расчетах.

Вероятность спонтанного электрического дипольного перехода с уровня $a'J'$ на уровень aJ определяется известной формулой

$$A(a'J', aJ) = \frac{2,68 \cdot 10^9}{2J' + 1} i^3 S \text{ сек}^{-1}. \quad (1)$$

Здесь $2J' + 1$ — статистический вес верхнего уровня; i — волновое число (в *ридбергах*) и

$$S = \sigma^2 S_{LL} \cdot s / \sum s \quad (2)$$

— сила линии электрического дипольного перехода, причем S_{LL} — сила мультиплета, $s/\sum s$ — теоретическая интенсивность рассматриваемой линии по отношению ко всему мультиплету и

$$\sigma^2 = \frac{|Q_{nn'}|^2}{4l_1^2 - 1} \quad (3)$$

— радиальная часть, где

$$Q_{nn'} = \int_0^\infty r P(nl|r) P(n'l'|r) dr \quad (4)$$

и l — большее из двух азимутальных квантовых чисел электрона, участвующего в переходе.

Расчеты сил осцилляторов проводились при помощи формулы

$$f(aJ, a'J') = \frac{i}{3} \frac{\sigma^2}{2J + 1} S_{LL} \cdot s / \sum s, \quad (5)$$

где $2J + 1$ — статистический вес нижнего уровня.

Во всех рассмотренных переходах имеется два неэквивалентных электрона вне остова, причем изучаются следующие два типа переходов: $l_1 l_2 - l_1 l_3$ и $l_1 l_2 - l_3 l_2$.

Значения относительных сил линий в дипольных мультиплетах $s/\sum s$ взяты из таблиц [3], а силы мультиплетов S_{LL} для указанных двух типов переходов определены по формулам [4] (см. гл. VI, § 36). В рассмотренных переходах оба уровня довольно хорошо описываются нормальной (LS) связью, что подтверждается приближенным выполнением правила интервалов ($\Delta E_{J, J+1} = \xi(L, S)(J+1)$).

Значения радиального фактора σ^2 определялись при помощи таблиц Бейтса и Дамгард [4] (см. приложение). В дальнейшем предполагается провести более точные расчеты радиальных интегралов.

Все величины, необходимые для расчета вероятностей дипольных переходов и сил осцилляторов иона CIII, и полученные результаты приведены в табл. 1.

Для вычисления эквивалентных ширин рассмотренных линий следует по формулам Больцмана и Саха оценить число атомов CIII над 1 см^2 фотосферы, находящихся на уровнях, при переходах с которых возникают интересующие нас линии.

Эффективное число атомов над 1 см^2 фотосферы ($\lg N = 23$) и электронное давление в $\text{дин} \cdot \text{см}^{-2}$ ($\lg P_e = 3,4$) для В0-звезд взяты из [3]. Для эффективной температуры принято значение $25000 \text{ }^\circ\text{K}$. Степень ионизации и сумма по состояниям для CIII найдены по таблицам [5]. Результаты оценок числа атомов CIII над 1 см^2 фотосферы на различных уровнях приведены в табл. 2.

В случае тонкого слоя эквивалентная ширина слабой линии определяется формулой

Таблица 1

Переход	$J-J'$	i	$S_{LL'}$	s/Ss	σ^2	$f_{\alpha J, \alpha' J'}$	$A_{\alpha' J', \alpha J, \text{сек}^{-1}}$	$W_{\lambda, \text{м\AA}}$
	2	3	4	5	6	7	8	9
$2s\ 3s\ ^3S-2p\ 3s\ ^3P^0$	1-2 1-1 1-0	0,639 0,638 0,638	9	5/9 1/3 1/9	0,828 0,828 0,839	0,294 0,176 0,059	$5,79 \cdot 10^8$ $5,77 \cdot 10^8$ $5,85 \cdot 10^8$	432 259 88
$2s\ 3p\ ^3P^0-2p\ 3p\ ^3P$	1-2 2-2 0-1 1-1 2-1 1-0	0,6380 0,6380 0,6379 0,6378 0,6377 0,6376	9	$3,75/27$ $11,25/27$ 1/9 $2,25/27$ $3,75/27$ 1/9	$3,46 \cdot 10^{-3}$	$0,306 \cdot 10^{-3}$ $0,551 \cdot 10^{-3}$ $0,736 \cdot 10^{-3}$ $0,183 \cdot 10^{-3}$ $0,184 \cdot 10^{-3}$ $0,245 \cdot 10^{-3}$	$6,03 \cdot 10^5$ $1,81 \cdot 10^6$ $8,04 \cdot 10^5$ $6,00 \cdot 10^5$ $1,00 \cdot 10^6$ $2,40 \cdot 10^6$	0,13 0,39 0,11 0,08 0,13 0,10
$2s\ 3d\ ^3D-2p\ 3d\ ^3D^0$	2-3 3-3 1-2 2-2 3-2 1-1 2-1	0,6167 0,6167 0,6165 0,6165 0,6165 0,6164 0,6164	15	$3,9/75$ $31,1/75$ $3,75/75$ $17,4/75$ $3,9/75$ $11,25/75$ $3,75/75$	$1,655 \cdot 10^{-1}$	$0,53 \cdot 10^{-2}$ $3,02 \cdot 10^{-2}$ $0,85 \cdot 10^{-2}$ $2,36 \cdot 10^{-2}$ $0,38 \cdot 10^{-2}$ $2,55 \cdot 10^{-2}$ $0,51 \cdot 10^{-2}$	$1,16 \cdot 10^7$ $9,26 \cdot 10^7$ $1,56 \cdot 10^7$ $7,22 \cdot 10^7$ $1,62 \cdot 10^7$ $7,78 \cdot 10^7$ $2,59 \cdot 10^7$	2,2 18,0 2,1 10,0 2,2 6,5 2,1
$3p\ ^1P^0-4d\ ^1D$	1-2	0,595	30		$10,86 \cdot 10^{-2}$	0,215	$3,68 \cdot 10^8$	110
$2s\ 3d\ ^3D-2p\ 3d\ ^3F^0$	3-4 2-3 3-3 1-2 2-2 3-2	0,5780 0,5777 0,5777 0,5775 0,5775 0,5775	21	$45/105$ $31,1/105$ $3,9/105$ $21/105$ $3,9/105$ $0,11/105$	$1,46 \cdot 10^{-2}$	$0,361 \cdot 10^{-2}$ $0,350 \cdot 10^{-2}$ $0,031 \cdot 10^{-2}$ $0,393 \cdot 10^{-2}$ $0,044 \cdot 10^{-2}$ $0,009 \cdot 10^{-2}$	$7,55 \cdot 10^6$ $6,71 \cdot 10^6$ $8,41 \cdot 10^6$ $6,33 \cdot 10^6$ $1,18 \cdot 10^6$ $3,32 \cdot 10^4$	0,81 1,68 0,21 1,13 0,21 0,006

$$W_{\lambda} = \frac{2J' + 1}{2J + 1} \frac{A\lambda^4}{8\pi c} N, \quad (6)$$

Таблица 2

где A — вероятность перехода; N — число атомов над 1 см^2 фотосферы, участвующих в образовании линии; $2J' + 1$ и $2J + 1$ — статистические веса верхнего и нижнего состояний соответственно. Результаты расчетов эквивалентных ширин линий приведены в табл. 1.

Сравнивая возможные отождествления линий в наблюдаемом спектре δ и π Скорпиона [1] с результатами расчета эквивалентных ширин линий иона CIII в интервале $1425\text{--}1620 \text{ \AA}$, можно утверждать, что наблюдаемая линия с $\lambda = 1427,27 \text{ \AA}$ (π Sco) и $\lambda = 1426,97 \text{ \AA}$ (δ Sco) возникает при переходе $2s3s^3S\text{--}2p3s^3P^0$, а не при переходе $2s3p^3P^0\text{--}2p3p^3P$, так как эквивалентная ширина в первом случае на три порядка больше, чем в последнем. Наблюдаемая линия с $\lambda = 1577,77 \text{ \AA}$ (δ Sco) возникает при переходе $2s3p^3P^0\text{--}2p3p^3D$, так как эквивалентная ширина этой линии на два порядка больше, чем при переходе $2s3d^3D\text{--}2p3d^3F^0$.

В исследованной области звезды с эффективной температурой $25000 \text{ }^\circ\text{K}$ прозрачность атмосферы, а, следовательно, и масса вещества над фотосферой, несколько больше, чем найденная по визуальной области спектра. Кроме того, с повышением температуры степень возбуждения CIII быстро растет, вследствие чего в излучении, проникающем сквозь атмосферу из подфотосферных слоев, рассмотренные нами линии уже имеются, что вносит значительный добавочный вклад в их эквивалентные ширины. Поэтому наши оценки дают нижнюю границу эквивалентных ширин. Более точные расчеты требуют учета строения атмосферы.

Следует отметить, что полученные нами результаты находятся в согласии с наблюдениями более горячих звезд (O9) Ориона [6]. Так, вычисленная суммарная эквивалентная ширина линий у $\lambda = 1428 \text{ \AA}$ велика ($\sum W_{\lambda} \approx 780 \text{ м\AA}$) и около этой же длины волны наблюдалась широкая линия; совокупность линий у $\lambda = 1578 \text{ \AA}$ ($\sum W_{\lambda} \approx 120 \text{ м\AA}$) наблюдалась как слабая линия, а линия с $\lambda = 1591,5 \text{ \AA}$ ($W_{\lambda} \approx 235 \text{ м\AA}$) отмечена как сильная.

В заключение автор выражает благодарность А. Никитину и А. Сапару за ценные советы и замечания, сделанные в ходе работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Morton D. C., Spitzer L., *Astroph. J.*, **144**, 1 (1966).
2. Moore C. E., *Atomic Energy Levels*, National Bureau of Standards, Washington, 1949.
3. Аллен К. У., *Астрофизические величины*, М., 1960.
4. Левинсон И. Б., Никитин А. А., *Руководство по теоретическому вычислению интенсивностей линий в атомных спектрах*, Л., 1962.
5. Jager C. de, Neven L., *Spectroscopic data for 50 model photospheres*, Ann. Obs. Royal de Belgique, **8**, Fasc. 1 (1957).
6. Morton D. C., Jenkins E. B., Bohlin R. C., *Astroph. J.*, **154**, 661 (1968).

Институт физики и астрономии
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
7/IX 1970

T. FEKLISTOVA

C III JOONTE ARVUTUS B-TÄHTEDE SPEKTRI VAAKUUM-ULTRAVIOLETT-PIIRKONNAS

On leitud D. C. Mortoni ja L. Spitzeri poolt δ ja π Scorpii atmosfäärivälistel vaatlustel avastatud C III iooni spektrijoonete spontaansete elektriliste dipoolsete üleminekute tõenäosused ja ostsillaatorite tugevused spektri piirkonnas 1425—1620 Å ja hinnatud nende joonte ekvivalentlaidused B-tähtede spektris.

T. FEKLISTOVA

CALCULATION OF C III LINES FOR VACUUM ULTRAVIOLET REGION OF B-STARS

Probabilities of spontaneous electric dipole transitions and oscillator strengths of C III ions for wave-length region 1425—1620 Å are calculated for the lines established by D. C. Morton and L. Spitzer from rocket observations of δ and π Scorpii. The equivalent widths of these lines in the spectra of B-stars are estimated.

В исследованной области звездной атмосферы при температуре 25 000° K преобладают атомы и ионы элементов в малом количестве. Для фотоферры несколько больше, чем в атмосфере по выводу из-за части спектра. Кроме того, с повышением температуры степень возбуждения C III быстро растет, вследствие чего в излучении преобладают линии ионы фотоферры из податмосферы слоев, расположенные на меньших высотах, что вносит значительный дополнительный вклад в их эквивалентные ширины. Поэтому наши оценки дают нижнюю границу эквивалентных ширины. Более точные расчеты требуют учета ступенчатой молекулярной атмосферы.

Следует отметить, что эквивалентные ширины элементов в атмосфере с наблюдением более точными методами (O) Orndorff [1961]. Так, эквивалентная суммарная эквивалентная ширина линий $\lambda = 1428 \text{ \AA}$ велика ($\Sigma W \approx 780 \text{ m\AA}$), и около этой же длины волны наблюдается широкая линия; совокупность линий $\lambda = 1578 \text{ \AA}$ ($\Sigma W \approx 128 \text{ m\AA}$) и $\lambda = 1594 \text{ \AA}$ ($\Sigma W \approx 235 \text{ m\AA}$) наблюдаются как слабая, отмечена как сильная.

В заключение автор выражает благодарность А. Никитину и А. С. Бару за ценные советы и замечания, сделанные в ходе работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Morton D. C., Spitzer L., *Astroph. J.* 141, 1 (1965).
2. Moore C. E., *Atomic Energy Levels*, National Bureau of Standards, Washington, 1949.
3. Аален К. Э., *Астрофизические величины*, М., 1963.
4. Ленксон М. В., Никитин А. А., *Работы по спектроскопии*, выпущенно университетом в Стокгольме, 1963.
5. Jager C. de Neven I., *Spectroscopic data for 50 neutral photosphere*, Ann. Obs. Royal de Belgique, fasc. 1 (1957).
6. Morton D. C., Jenkins E. B., *Astroph. J.* 154, 661 (1963).

Получена в редакцию
21X 1970

Напечатано в издательстве
Москвитинского университета СССР