

А. НИКИТИН, Т. ФЕКЛИСТОВА

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИССИОННОГО СПЕКТРА ЗВЕЗД WR

I. О СТРУКТУРЕ СПЕКТРОВ CIII, NIV, OV, СВЯЗАННЫХ С ВЕРХНИМИ ВОЗБУЖДЕННЫМИ КОНФИГУРАЦИЯМИ $2pn, pd$

Как известно, в эмиссионном спектре звезд WR наблюдаются многочисленные линии CIII, NIV и, отчасти, OV. До недавних пор изучалась только видимая часть спектра, однако в последнее время появились возможности изучения спектра звезд WR в инфракрасной (ИК) и ультрафиолетовой (УФ) областях [1].

Расширение наблюдаемого диапазона поставило и новые задачи в проблеме теоретической интерпретации появления линий эмиссии в спектрах WR. Необходимой составной частью такого теоретического исследования стало детальное изучение энергетической схемы того или иного многоэлектронного атома, линии которого наблюдаются.

Для атомов типа водорода или гелия энергетическая схема проста, однако дело существенно меняется в случае более сложных атомов. Тип векторной связи (или отсутствие ее), влияние межконфигурационных эффектов, наличие автоионизационных состояний, значения радиационных параметров и т. д. — все это должно быть предварительно изучено и рассмотрено при постановке астрофизической задачи: построения модели эмиссионного звездного спектра [2, 3].

Успехи в развитии теоретической спектроскопии [4] позволяют в настоящее время произвести детальное теоретическое изучение того или иного спектра многоэлектронного атома. На начальном этапе обычно рассматривается вопрос о применимости одноконфигурационного приближения и LS -связи при переходе от нижних термов к верхним и вдоль изoeлектронной последовательности. Именно это и составляет содержание первого раздела настоящей статьи. Нахождению верхних неизвестных уровней конфигураций $2pn, pd$ ионов изoeлектронной последовательности CIII, NIV и OV посвящен второй раздел. Исследуются ионы CIII, NIV, OV, которые наиболее интересны при изучении спектров звезд WR. Изучаемые конфигурации в большинстве случаев связаны с линиями, наблюдаемыми в указанных звездных спектрах, особенно в ИК и видимой областях.

Нужно обратить особое внимание на то обстоятельство, что в спектрах звезд WR хорошо наблюдаются линии, связанные как с основными конфигурациями $2snl$, так и с $2pnl$, т. е. учесть, что наблюдаются линии, в которых возбуждены оба внешних электрона. Наличие линий как первого, так и второго классов представляет одну из наиболее заметных особенностей спектров звезд WR.

Раздел I

В одноконфигурационном приближении при использовании LS -связи для конфигураций $2pn$, pd энергии уровней определяются известными формулами (см. [5]). В случае конфигурации $2p^2$ имеем

$${}^1S = F_0 + 10F_2, \quad {}^1D = F_0 + F_2, \quad {}^3P = F_0 - 5F_2, \quad (1)$$

для конфигурации $2pnp$

$${}^1S, {}^3S = F_0 + 10F_2 \pm (G_0 + 10G_2), \quad {}^1P, {}^3P = F_0 - 5F_2 \mp (G_0 - 5G_2), \quad (2)$$

$${}^1D, {}^3D = F_0 + F_2 \pm (G_0 + G_2)$$

и для конфигурации $2pnd$

$${}^1P, {}^3P = F_0 + 7F_2 \pm (G_1 + 63G_3), \quad {}^1D, {}^3D = F_0 - 7F_2 \mp (3G_1 - 21G_3), \quad (3)$$

$${}^1F, {}^3F = F_0 + 2F_2 \pm (6G_1 + 3G_3).$$

Прямые и обменные радиальные интегралы $F_0, F_2, G_0, G_1, G_2, G_3$ будем считать искомыми параметрами, при этом обычно G_2 и G_3 сравнительно невелики.

Таблица 1

Рассмотрим термы конфигурации $2p^2$ ионов CIII, NIV и OV. Данные наблюдений [6-9] приведены в табл. 1. Энергия в ридбергах отсчитывалась от основного уровня. Для терма 3P проводилось усреднение по уровням.

Терм	Элемент		
	CIII	NIV	OV
$2p^2 {}^1S$	1,663244	2,144843	2,623632
1D	1,329321	1,721224	2,111601
3P	1,252789	1,600817	1,947805

В качестве контрольного терма для CIII и NIV выберем 3P , а для OV — 1D .

Из экспериментальных данных и формул (1) находим

$$F_0 = 1,292219, \quad F_2 = 0,037102 \quad \text{для CIII,}$$

$$F_0 = 1,674125, \quad F_2 = 0,047069 \quad \text{для NIV,}$$

$$F_0 = 2,173081, \quad F_2 = 0,045055 \quad \text{для OV.}$$

Вычисленные значения энергии терма 3P для CIII — 1,106706 Ry, для NIV — 1,438811 Ry, для энергии терма 1D OV — 2,218136 Ry. При этом правило интервалов выполняется плохо: теоретическое значение отношения интервалов равно $\frac{{}^1S - {}^1D}{{}^1D - {}^3P} = 1,5$, а из наблюдений получаются значения 4,36 для CIII, 3,52 для NIV и 3,13 для OV. Следовательно, в пределах одноконфигурационного приближения хорошего согласия нет и, по-видимому, следует учитывать влияние других конфигураций ($2s^2 {}^1S$).

Рассмотрим далее термы конфигурации $2pnp$ для исследуемой изоэлектронной последовательности. Данные наблюдений [6-9] приведены в табл. 2.

Для термов 3P и 3D проводилось усреднение по уровням.

Из экспериментальных данных находим для CIII

$$\begin{aligned}
 F_0 &= 2,979967, \\
 F_2 &= 0,008359, \quad {}^3P = 2,962834, \\
 G_0 &= 0,043503, \quad {}^3D = 2,941056. \\
 G_2 &= 0,003768;
 \end{aligned}$$

Таблица 2

Согласие между вычисленными значениями энергии термов 3P и 3D для CIII и данными наблюдений (табл. 2) хорошее.

Для NIV контрольным термом выбран 3D . По формулам (2) были найдены следующие значения радиальных интегралов и энергия терма 3D :

$$\begin{aligned}
 F_0 &= 4,474045, \\
 F_2 &= 0,006106, \\
 G_0 &= 0,071483, \quad {}^3D = 4,406646. \\
 G_2 &= 0,002022;
 \end{aligned}$$

Терм	Элемент		
	CIII	NIV	OV
$2p3p^1S$	3,144741	—	6,448450
1P	2,913507	4,382140	6,130038
1D	3,035597	4,553656	6,353083
3S	2,982379	4,443406	6,232517
3P	3,004673	4,504890	6,284168
3D	2,944438	4,416421	6,173409
$2p4p^3S$	—	—	7,582372
3D	—	—	7,573869
3P	—	—	7,609767
1P	—	—	7,559845
1D	—	—	7,635098

В пределах одноконфигурационного приближения согласие хорошее. Для конфигурации $2p3p$ OV контрольными термами выбраны 3P и 3D , а для конфигурации $2p4p$ OV — терм 3D . Значения наблюдаемых и вычисленных по формуле (2) энергий для OV приведены в табл. 3.

Таблица 3

Согласие между вычисленными значениями энергии термов и экспериментальными хорошее, и, следовательно, одноконфигурационное приближение и LS-связь можно использовать.

Были определены отношения интервалов для исследуемых конфигураций $2pnp$ CIII, NIV и OV. Для CIII эти отношения равны $\frac{{}^3S - {}^3D}{{}^3D - {}^1P} = 1,23$; для NIV — 0,79; для OV — 1,36 (конфигурация $2p3p$) и 0,61 ($2p4p$). Теория дает здесь значения 1,5.

Рассмотрим далее термы конфигурации $2pnd$ исследуемой изоэлектронной последовательности. Данные наблюдений [⁶⁻⁹] приведены в табл. 4. Проводилось усреднение по уровням для термов 3P , 3D и 3F . Как и ранее, энергии отсчитывались от нижнего уровня*.

Конфигурация	Радиальные интегралы	Энергия термов	
		Вычисленная	Измеренная
$2p3p$ OV	$F_0 = 6,253340$ $F_2 = 0,008714$ $G_0 = 0,089144$ $G_2 = 0,001882$	${}^3P = 6,289501$ ${}^3D = 6,171029$	6,284168 6,173409
$2p4p$ OV	$F_0 = 7,599113$ $F_2 = 0,002861$ $G_0 = 0,031758$ $G_2 = 0,001360$	${}^3D = 7,568856$	7,573868

Таблица 4

Терм	Элемент		
	CIII	NIV	OV
$2p3d$ 1P	3,159479	4,733286	6,554516
1D	3,031706	4,540938	6,333061
1F	3,110801	4,613607	6,497002
3P	3,099355	4,661454	6,452234
3D	3,077124	4,607377	6,417840
3F	3,038356	4,515407	6,313836
$2p4d$ 1P	—	—	7,722625
1D	3,515825	—	7,634897
1F	3,542760	—	7,719672
3P	3,540208	—	7,683452
3D	3,532955	—	7,666160
3F	3,515905	—	—

* В связи с появлением в печати статьи Michels D. J., Tilford S. G., Quinn J. W., J.O.S.A., 61, 625 (1971), где даны более точные значения энергий, расчеты верхних уровней NIV могут быть уточнены.

Таблица 5

Конфигурация и элемент	Радиальные интегралы	Энергия термов	
		Вычисленная	Измеренная
2p3d CIII	$F_0 = 3,075013$	${}^3P = 3,080002$ ${}^3F = 3,064784$	3,099355 3,038356
	$F_2 = 0,006389$		
	$G_1 = 0,003547$		
	$G_3 = 0,000574$		
2p3d NIV	$F_0 = 4,644221$	${}^3P = 4,538591$ ${}^3D = 4,583593$	4,661454 4,607377
	$F_2 = 0,005262$		
	$G_1 = 0,007109$		
	$G_3 = 0,002149$		
2p3d OV	$F_0 = 6,391022$	${}^3P = 6,328310$ ${}^3D = 6,351200$	6,452234 6,417840
	$F_2 = 0,007199$		
	$G_1 = 0,014481$		
	$G_3 = 0,001565$		
2p4d OV	$F_0 = 7,675590$	${}^3D = 7,661386$	7,666160
	$F_2 = 0,003921$		
	$G_1 = 0,005932$		
	$G_3 = 0,000217$		
2p4d CIII	$G_3 < 0$		

Термы 3P и 3F выбраны контрольными для конфигурации 2p3d CIII, термы 3P и 3D — для конфигурации 2p3d NIV и OV, и терм 3D — для конфигурации 2p4d OV. Считая радиальные интегралы подлежащими определению параметрами, находим по (3) для конфигураций 2p3d и 2p4d элементов CIII, NIV и OV следующие, приведенные в табл. 5, значения.

В пределах LS-связи согласно следует считать хорошим для 2p4d OV, удовлетворительным — для 2p3d CIII, NIV и OV. При описании уровней энергии кон-

Таблица 6

Теория $\frac{{}^3P - {}^3F}{{}^1F - {}^1D}$	Наблюдения				
	CIII 2p3d	NIV 2p3d	OV 2p3d	CIII 2p4d	OV 2p4d
0,555	0,770	2,000	0,345	0,902	0,348

фигурации 2p4d CIII одноконfigurационное приближение не подходит ($G_3 < 0$). Правило интервалов для исследуемых конфигураций 2p3d, 2p4d CIII и OV выполняется не очень хорошо и плохо для конфигурации 2p3d NIV (см. табл. 6).

Как и следовало ожидать, одноконfigurационное приближение и LS-связь в общем имеют место почти для всех изучаемых конфигураций. При увеличении Z , т. е. при переходе от CIII к NIV и OV, согласие между теорией и наблюдениями улучшается. Однако это согласие в общем грубое, так как в указанных спектрах наблюдаются многочисленные линии, связанные с многоконfigurационным (МК) приближением. Более точный анализ линий, связанных с этими конфигурациями, с помощью полуэмпирических методов проводится в разделе II.

Раздел II

В настоящем разделе находятся с помощью известных наблюдательных данных энергетические состояния верхних неизвестных уровней ионов изоэлектронной последовательности CIII, NIV, OV. Вычисление этих уровней необходимо потому, что для элементов с большим Z линии их спектров, расположенные в близком УФ, видимой и особенно в ИК части, связаны с этими уровнями. Хотя лабораторный спектр CIII, NIV, OV достаточно полон, однако есть основания ожидать, что в сильно развитых спектрах звезд WRC и WRN, особенно в ИК области,

Таблица 7

n	$2prp^1D_2$ CIII	$2prp^1P_1$ CIII	$2prp^3D_3$ CIII	$2prp^3P_2$ CIII	$2prp^3P_1$ CIII
3	117 687,49	130 977,65	127 665,37	121 062,13	121 099,23
4	65 167,6	69 592,6	68 795,8	66 400,3	66 440,8
5	41 299,8	43 267,1	42 979,8	41 880,8	
6			29 373,8	28 786,8	
7			21 408,8	21 041,8	

n	$2pnd^1D_2$ CIII	$2pnd^1F_4$ CIII	$2pnd^3D_3$ CIII	$2pnd^3P_2$ CIII	$2pnd^3F_4$ CIII
3	118 006,72	109 434,76	113 117,66	110 703,86	117 358,46
4	64 880,8	62 032,8	63 108,8	62 312,8	64 979,8
5	41 015,1		40 220,8	39 913,8	
6			27 873,8	27 696,8	

наблюдаются или должны наблюдаться линии, принадлежащие вычисляемым уровням. Полуэмпирический метод, используемый при решении задачи, позволяет, с одной стороны, вычислить достаточно точное значение энергии n , с другой — определить степень влияния межконфигурационных термов или уровней. Нахождение этих состояний особенно необходимо при вычислении радиационных параметров, характерных для того или иного спектра. Впоследствии учет МК эффектов будет проведен с помощью более точной теории.

Из наблюдений [6-8] известны термы (в $см^{-1}$) конфигураций $2pr, pd$ ионов CIII, NIV и OV, которые приведены соответственно в табл. 7—9.

Таблица 8

n	$2prp^1D_2$ NIV	$2pnd^3D_3$ NIV
3	205 880,7	199 956,0
4	114 545	111 811
5		71 381

Интересующими нас неизвестными уровнями иона CIII являются следующие: $2r6p^1D_2$, $2r7p^1D_2$, $2r6p^1P_1$, $2r7p^1P_1$, $2r5p^3P_1$, $2r6p^3P_1$, $2r7p^3P_1$,

Таблица 9

n	$2prp^1D_2$ OV	$2prp^1P_1$ OV	$2prp^3D_3$ OV	$2prp^3P_2$ OV	$2prp^3P_1$ OV	$2prp^3S_1$ OV
3	318 390,8	342 337,2	337 899,3	325 855,8	326 046,6	331 621,4
4	117 706	185 434	184 230	180 422	180 592	183 492
5	113 119	116 451	116 072	114 399		
6	78 220	79 938	79 798	78 938		
7			58 250	57 714		

n	$2pnd^1D_2$ OV	$2pnd^1F_3$ OV	$2pnd^3D_3$ OV	$2pnd^3D_2$ OV	$2pnd^3P_2$ OV	$2pnd^3P_1$ OV
3	320 387,2	302 597,5	311 216	311 322	307 583,1	296 286,1
4	177 198	168 425	174 246	174 369	172 453	168 101
5	112 340	109 158	111 246		110 754	
6			—			
7			56 548			

$2p6d^1D_2$, $2p7d^1D_2$, $2p5d^1F_3$, $2p6d^1F_3$, $2p7d^1F_3$, $2p7d^3D_3$, $2p7d^3P_2$, $2p5d^3F_4$, $2p6d^3F_4$, $2p7d^3F_4$.

Для иона NIV искомыми являются уровни $2p5p$, $2p6p$ и $2p7p$ терма 1D_2 и уровни $2p6d$, $2p7d$ терма 3D_3 .

Для иона OV определяемыми уровнями являются следующие: $2p7p^1D_2$, $2p7p^1P_1$, $2p5p^3P_1$, $2p6p^3P_1$, $2p7p^3P_1$, $2p5p^3S_1$, $2p6p^3S_1$, $2p7p^3S_1$, $2p6d^1D_2$, $2p7d^1D_2$, $2p6d^1F_3$, $2p7d^1F_3$, $2p6d^3D_3$, $2p6d^3P_2$, $2p7d^3P_2$, $2p5d^1P_1$, $2p6d^1P_1$, $2p7d^1P_1$, $2p5d^3D_2$, $2p6d^3D_2$, $2p7d^3D_2$.

Более высокие уровни рассматривать не будем.

При расчете уровней воспользуемся формулой А. Г. Шенстона и Х. Н. Рассела [10]

$$T_n = \frac{Z^2R}{[n + \mu + \alpha T_n + \beta (T_n - T_0)^{-1}]^2}, \quad (4)$$

где T_n представляет собой абсолютное значение n -го терма, отсчитанного от границы серии; R — постоянная Ридберга; T_0 — терм взаимодействующей конфигурации; Z равно 3 для CIII, 4 для NIV и 5 для OV; μ , α , β — постоянные, которые нужно определить с помощью наблюдаемых уровней ионов CIII, NIV и OV.

Наиболее сильное возмущение на уровни исследуемой конфигурации будут оказывать уровни тех электронных конфигураций, которые имеют те же главные квантовые числа и значения L и S , что и уровни исследуемой конфигурации. Кроме того, уровни должны совпадать по четности и разница в энергиях не должна быть большой [11].

Для каждого уровня исследуемой конфигурации можно найти соответствующий возмущающий уровень взаимодействующей конфигурации (в некоторых случаях нужен учет нескольких уровней). Однако для нахождения неизвестных уровней конфигураций $2pn, pd$ достаточно ограничиться для каждой группы уровней (табл. 7—9) лишь одним взаимодействующим уровнем. В табл. 10 приведены уровни взаимодействующих конфигураций [6—8].

Таблица 10

Исследуемая конфигурация и элемент	Взаимодействующая конфигурация и значение ее терма T_0 , $см^{-1}$
$2pnp^1D_2$ CIII	$2s5d^1D_2$ 39 555,56
$2pnp^1P_1, ^3P_{2,1}$ CIII	—
$2pnp^3D_3$ CIII	$2s3d^3D_3$ 116 199, 16
$2pnd^1D_2, ^3D_3$ CIII	—
$2pnd^1F_3$ CIII	$2s4f^1F_3$ 63 511,88
$2pnd^3P_2$ CIII	$2s5p^3P_2$ 41 980,92
$2pnd^3F_4$ CIII	$2s4f^3F_4$ 64 195,93
$2pnp^1D_2$ NIV	$2s4d^1D_2$ 110 217,0
$2pnd^3D_3$ NIV	—
$2pnp^1D_2$ OV	$2s3d^1D_2$ 306 041,4
$2pnp^1P_1, ^3P_{2,1}$ OV	—
$2pnp^3D_3$ OV	$2s7d^3D_3$ 56 864,0
$2pnp^3S_1$ OV	$2s3s^3S_1$ 371 687,6
$2pnd^1D_2, ^3D_{3,2}$ OV	—
$2pnd^1F_3$ OV	$2s4f^1F_3$ 168 816,5
$2pnd^1P_1$ OV	$2s4p^1P_1$ 180 776,2
$2pnd^3P_2$ OV	$2s5p^3P_2$ 115 782,0

Используя данные наблюдений (табл. 7—10), по формуле Шенстона—Рассела (для CIII взята постоянная Ридберга для углерода $R = 109\,732,3\,см^{-1}$, а для NIV и OV — постоянная Ридберга для беско-

нечной массы $R_\infty = 109\,737,3 \text{ см}^{-1}$) легко получить перечисленные ниже результаты.

$$2pnp\ ^1D_2 \text{ CIII}$$

$\mu = -0,10403652$; $\alpha = 0,0008337$; $\beta = -0,00001816$. С помощью этих параметров вычислены значения неизвестных термов: $T_6 = 28\,405,94 \text{ см}^{-1}$, $T_7 = 20\,766 \text{ см}^{-1}$.

$$2pnp\ ^1P_1 \text{ CIII}$$

$\mu = -0,20890635$; $\alpha = -0,03783558$; $T_5 = 43\,293 \text{ см}^{-1}$. Наблюденное значение терма $T_5 = 43\,267,1 \text{ см}^{-1}$. Различие между наблюдаемым значением T_5 и найденным составляет приблизительно 0,06%. Значения неизвестных термов: $T_6 = 29\,551,9 \text{ см}^{-1}$ и $T_7 = 21\,460,7 \text{ см}^{-1}$.

$$2pnp\ ^3P_2 \text{ CIII}$$

$\mu = -0,14290175$; $\alpha = -0,00083993$; $T_5 = 41\,867,8 \text{ см}^{-1}$; $T_6 = 28\,790,2 \text{ см}^{-1}$; $T_7 = 21\,004,7 \text{ см}^{-1}$. Наблюденные значения термов: $T_5 = 41\,880,8 \text{ см}^{-1}$; $T_6 = 28\,786,8 \text{ см}^{-1}$ и $T_7 = 21\,041,8 \text{ см}^{-1}$.

$$2pnp\ ^3P_1 \text{ CIII}$$

$\mu = -0,1449747$; $\alpha = 0,00064247$. Найденны значения неизвестных термов: $T_5 = 41\,893,8 \text{ см}^{-1}$; $T_6 = 28\,806,8 \text{ см}^{-1}$; $T_7 = 21\,015,7 \text{ см}^{-1}$.

$$2pnp\ ^3D_3 \text{ CIII}$$

$\mu = -0,19862325$; $\alpha = -0,01912877$; $\beta = 0,0002334$; $T_6 = 29\,398,56 \text{ см}^{-1}$; $T_7 = 21\,374,37 \text{ см}^{-1}$. Наблюденные значения $T_6 = 29\,373,8 \text{ см}^{-1}$ и $T_7 = 21\,408,8 \text{ см}^{-1}$.

$$2pnd\ ^1D_2 \text{ CIII}$$

$\mu = -0,08803548$; $\alpha = -0,01771731$; $T_5 = 41\,043 \text{ см}^{-1}$. Наблюденное значение $T_5 = 41\,015,1 \text{ см}^{-1}$. Найденны значения неизвестных термов: $T_6 = 28\,299,9 \text{ см}^{-1}$ и $T_7 = 20\,691,6 \text{ см}^{-1}$.

$$2pnd\ ^3D_3 \text{ CIII}$$

$\mu = -0,04270745$; $\alpha = -0,00244969$; $T_5 = 40\,201,8 \text{ см}^{-1}$; $T_6 = 27\,833,8 \text{ см}^{-1}$. Наблюденные значения термов: $T_5 = 40\,220,8 \text{ см}^{-1}$ и $T_6 = 27\,873,8 \text{ см}^{-1}$. Найдено значение неизвестного терма $T_7 = 20\,405,8 \text{ см}^{-1}$.

$$2pnd\ ^1F_3 \text{ CIII}$$

$\mu = 0,00363771$; $\beta = 0,00018321$. Из-за недостатка данных наблюдений значение α принято равным нулю. С помощью параметров μ и β вычислены значения неизвестных термов: $T_5 = 39\,459,4 \text{ см}^{-1}$; $T_6 = 27\,404,9 \text{ см}^{-1}$; $T_7 = 20\,136,64 \text{ см}^{-1}$.

$$2pnd\ ^3P_2 \text{ CIII}$$

$\mu = -0,02702862$; $\alpha = 0,0136041$; $\beta = 0,00006927$; $T_6 = 27\,655,07 \text{ см}^{-1}$. Наблюденное значение терма $T_6 = 27\,696,8 \text{ см}^{-1}$. Определено значение неизвестного терма $T_7 = 20\,298,85 \text{ см}^{-1}$.

$$2pnd\ ^3F_4 \text{ CIII}$$

$\mu = -0,0990743$; $\beta = -0,00001721$. Значение α принято равным нулю. Найденны значения неизвестных термов: $T_5 = 41\,115,56 \text{ см}^{-1}$, $T_6 = 28\,361,48 \text{ см}^{-1}$, $T_7 = 20\,737,5 \text{ см}^{-1}$. Следует отметить, что вычисленные значения термов не совсем точны, так как значение исходного терма T_4 неопределенно ($\sim 50 \text{ см}^{-1}$).

$$2pnp\ ^1D_2 \text{ NIV}$$

$\mu = -0,0842696$; $\beta = 0,00042483$. Значение постоянной α не найдено из-за недостатка данных наблюдений. С помощью параметров μ и β определены значения неизвестных термов: $T_5 = 72\,671,7 \text{ см}^{-1}$, $T_6 = 50\,177 \text{ см}^{-1}$ и $T_7 = 36\,714,3 \text{ см}^{-1}$.

$2pnd\ ^3D_3\ NIV$

$\mu = -0,03793269$; $\alpha = 0,00065236$; $T_5 = 71297,6\ \text{см}^{-1}$. Наблюденное значение терма $T_5 = 71381\ \text{см}^{-1}$. Найдены значения термов: $T_6 = 49389,9\ \text{см}^{-1}$ и $T_7 = 36221,9\ \text{см}^{-1}$.

Для конфигураций $2pn, pd\ OV$, используя формулу (4) и табл. 9—10, можно получить следующие результаты.

 $2pnp\ ^1D_2\ OV$

$\mu = -0,083028$; $\alpha = 0,0073217$; $\beta = -0,0003168$; $T_6 = 78217,9\ \text{см}^{-1}$. Наблюденное значение $T_6 = 78220\ \text{см}^{-1}$. Неизвестный терм $T_7 = 57275\ \text{см}^{-1}$.

 $2pnp\ ^1P_1\ OV$

$\mu = -0,017106$; $\alpha = -0,0807871$; $T_5 = 114321,2\ \text{см}^{-1}$; $T_6 = 78138,2\ \text{см}^{-1}$. Наблюденные [8] значения термов: $T_5 = 116451\ \text{см}^{-1}$, $T_6 = 79938\ \text{см}^{-1}$. Разница между наблюдаемыми и вычисленными значениями для терма T_5 составляет 1,83%, а для T_6 — 2,25%. Считая, что вычисленное значение неизвестного терма T_7 будет отличаться от возможного наблюдаемого значения на 2,5%, найдем $T_7 = 58368,37\ \text{см}^{-1}$.

 $2pnp\ ^3P_2\ OV$

$\mu = -0,1032136$; $\alpha = 0,001614$; $T_5 = 114333\ \text{см}^{-1}$; $T_6 = 78867,8\ \text{см}^{-1}$; $T_7 = 57662,5\ \text{см}^{-1}$. Наблюденные значения термов: $T_5 = 114399\ \text{см}^{-1}$; $T_6 = 78938\ \text{см}^{-1}$, $T_7 = 57714\ \text{см}^{-1}$. Согласие между вычисленными значениями термов и наблюдаемыми хорошее.

 $2pnp\ ^3P_1\ OV$

$\mu = -0,10631$; $\alpha = 0,0023765$. С помощью постоянных μ и α найдем неизвестные значения термов: $T_5 = 114440,9\ \text{см}^{-1}$, $T_6 = 78934,6\ \text{см}^{-1}$ и $T_7 = 57707,6\ \text{см}^{-1}$.

 $2pnp\ ^3D_3\ OV$

$\mu = -0,126878$; $\alpha = -0,0074582$; $\beta = -0,0019401$; $T_6 = 79933,2\ \text{см}^{-1}$; $T_7 = 58380\ \text{см}^{-1}$. Наблюденные значения термов $T_6 = 79798\ \text{см}^{-1}$ и $T_7 = 58250\ \text{см}^{-1}$. Разница между вычисленными и наблюдаемыми значениями мала.

 $2pnp\ ^3S_1\ OV$

$\mu = -0,136901$; $\beta = -0,00443455$; $\alpha = 0$ из-за недостатка данных наблюдений. Вычислены значения неизвестных термов: $T_5 = 115911,9\ \text{см}^{-1}$, $T_6 = 79761,4\ \text{см}^{-1}$, $T_7 = 58218\ \text{см}^{-1}$.

 $2pnd\ ^1D_2\ OV$

$\mu = -0,05470384$; $\alpha = -0,00652787$; $T_5 = 112482,6\ \text{см}^{-1}$. Наблюденное значение $T_5 = 112340\ \text{см}^{-1}$. С помощью постоянных μ и α определены неизвестные термы: $T_6 = 77736,2\ \text{см}^{-1}$ и $T_7 = 56929,4\ \text{см}^{-1}$.

 $2pnd\ ^3D_3\ OV$

$\mu = -0,0334475$; $\alpha = 0,00087729$; $T_5 = 111180,5\ \text{см}^{-1}$, $T_7 = 56520\ \text{см}^{-1}$. Наблюдались значения термов: $T_5 = 111246\ \text{см}^{-1}$ и $T_7 = 56548\ \text{см}^{-1}$. Вычисленные значения термов T_5 и T_7 ниже наблюдаемых приблизительно на 0,055%, поэтому найденное значение неизвестного терма T_6 было увеличено на 0,055%. Получено значение $T_6 = 77090\ \text{см}^{-1}$.

 $2pnd\ ^3D_2\ OV$

$\mu = -0,03598704$; $\alpha = 0,00159414$. Определены неизвестные термы: $T_5 = 111261,7\ \text{см}^{-1}$, $T_6 = 77099,9\ \text{см}^{-1}$ и $T_7 = 56555,2\ \text{см}^{-1}$.

$2pnd\ ^1F_3\ OV$

$\mu = 0,01422439$; $\alpha = -0,001135$; $\beta = -0,00008366$. С помощью постоянных μ , α и β вычислены неизвестные значения термов: $T_6 = 75863,7\text{ см}^{-1}$ и $T_7 = 55769,4\text{ см}^{-1}$.

 $2pnd\ ^1P_1\ OV$

$\mu = 0,04261975$; $\beta = 0,00032341$; $\alpha = 0$. Неизвестные термы: $T_5 = 107911\text{ см}^{-1}$, $T_6 = 75143,6\text{ см}^{-1}$ и $T_7 = 55317,3\text{ см}^{-1}$.

 $2pnd\ ^3P_2\ OV$

$\mu = -0,01080752$; $\alpha = -0,00105648$; $\beta = 0,00050992$. Найдены значения неизвестных термов: $T_6 = 76537\text{ см}^{-1}$ и $T_7 = 56185,5\text{ см}^{-1}$.

Приведем, наконец, в табл. 11 длины волн некоторых линий, связанных с найденными неизвестными уровнями (штрихом отмечены конфигурации, имеющие возбужденный до $2p$ состояния внутренний $2s$ -электрон, например, $2p6p - 6p'$).

Таблица 11

λ , в Å	Переход	λ , в Å	Переход
1531,6	$6p\ ^1P_1 - 6p'\ ^1D_2$ CIII	1209,6	$5p\ ^1P_1^0 - 5p'\ ^1D_2$ NIV
2421,7	$4p\ ^1P_1 - 6d'\ ^1D_2$ CIII	1231,6	$6d\ ^3D - 6d'\ ^3D_3$ NIV
3889,8	$4p\ ^1D_2 - 5d'\ ^1F_3$ CIII	1432,8	$4p\ ^1D_2 - 5d'\ ^1P_1$ OV
4409,1	$4p\ ^3D_3 - 5d'\ ^3F_4$ CIII	1768,6	$4d\ ^3P_2 - 5p'\ ^3S_1$ OV
4725,2	$5p\ ^1D_2 - 7d'\ ^1F_3$ CIII	2680,3	$5p\ ^3P_2 - 6d'\ ^3D_3$ OV
7043,7	$5p\ ^3P_1 - 6d'\ ^3P_2$ CIII	2869,2	$5p\ ^1D_2 - 6d'\ ^1D_2$ OV
7863,6	$5d'\ ^1D_2 - 6p'\ ^1D_2$ CIII	4763,9	$6d'\ ^1D_2 - 7p'\ ^1D_2$ OV
11019,3	$6p\ ^3D_3 - 7d'\ ^3P_2$ CIII	4816,8	$6p\ ^1D_2 - 7d'\ ^1D_2$ OV
11263,8	$6p\ ^3D_3 - 7d'\ ^3D_3$ CIII	5161,0	$6p\ ^3D_3 - 7p'\ ^3P_2$ OV
11753,6	$6p\ ^3P_1 - 7d'\ ^3P_2$ CIII	19387,7	$5p\ ^3S_1 - 5d'\ ^3P_2$ OV
12061,3	$6p\ ^3P_2 - 7d'\ ^3D_3$ CIII	30665,4	$6p\ ^3D_3 - 6d'\ ^3P_2$ OV
53642,3	$5p\ ^3D_3 - 5d'\ ^3F_4$ CIII	42509,8	$6p\ ^1D_2 - 6d'\ ^1F_3$ OV
54336,0	$5p\ ^1D_2 - 5d'\ ^1F_3$ CIII	45355,6	$6p\ ^1P_1 - 6d'\ ^1D_2$ OV
79872,2	$6p\ ^1P_1 - 6d'\ ^1D_2$ CIII	54112,6	$6p\ ^3P_2 - 6d'\ ^3D_3$ OV
90090,1	$7p\ ^3D_3 - 7d'\ ^3P_2$ CIII	69492,7	$7p\ ^1P_1 - 7d'\ ^1D_2$ OV

Более строгий аналитический расчет энергетических состояний CIII, NIV, OV будет приведен в следующих публикациях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никитин А. А., Вестник ЛГУ, № 1, 134 (1971).
2. Никитин А. А., Труды АО ЛГУ, 24, 3 (1967).
3. Никитин А. А., Труды АО ЛГУ, 25, 17, (1968).
4. Никитин А. А., Труды АО ЛГУ, 28, 163 (1971).
5. Кондон Е., Шортли Г., Теория атомных спектров, М., 1949.
6. Bockasten K., Ark. Fys. (Stockholm), 9, Nr. 30, 457 (1955).
7. Hallin R., Ark. Fys. (Stockholm), 32, Nr. 11, 201 (1966).
8. Bockasten K., Johansson K. B., Ark. Fys. (Stockholm), 38, Nr. 31, 563 (1969).
9. Moore C. E., Atomic Energy Levels, National Bureau of Standards, Washington, 1949.
10. Shenstone A. G., Russell H. N., Phys. Rev., 39, 415 (1932).
11. Юцис А. П., ЖЭТФ, 19, 7 (1949).

Ленинградский государственный университет
им. А. А. Жданова

Институт физики и астрономии
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
7/VII 1971

A. NIKITIN, T. FEKLISTOVA

WR-TÜÜPI TÄHTEDE EMISSIOONISPEKTRI UURIMINE.

I. CIII, NIV, OV ülemiste ergastatud konfiguratsioonidega $2pn$, pd seotud spektrite struktuurist

Käsitletakse ühekonfiguratsioonilise lähendi ja LS -seose rakendatavust üleminekute puhul alumistelt seisunditelt ülemistele isoelektronses ioonide jadas CIII, NIV, OV. Näidatakse, et LS -seos ja ühekonfiguratsiooniline lähend on üldiselt rakendatavad peaaegu kõigile konfiguratsioonidele $2pn$, pd , kusjuures kooskõla teooria ja vaatluste vahel paraneb suunas CIII—NIV—OV. Poolempiirilisel meetodil leitakse uuritavate konfiguratsioonide ülemised ergastatud seisundid. Nende seisundite vahelistel üleminekutel tekkivate mõningate spektrijoonte lainepikkuste hinnangud on antud tabelis 11.

A. NIKITIN, T. FEKLISTOVA

A STUDY OF THE EMISSION SPECTRA OF WR STARS.

I. On the structure of the spectra CIII, NIV, OV related to the upper excitation configurations $2pn$, pd

The applicability of the one-configuration approximation and the LS -scheme for the ions of isoelectronic sequence CIII, NIV and OV is discussed. It is shown that in general the LS -scheme and the one-configuration approximation hold almost for all the configurations $2pn$, pd and the agreement between theory and observations becomes better while passing from CIII to NIV and OV. The upper excitation states of the configurations of the ions studied are found by the half-empirical method. The estimates of the energy levels and wave-lengths of some lines corresponding to the transitions between the high-excitation levels obtained, are given in Table 11.