АСТРОФИЗИКА

ТОМ 25 АВГУСТ, 1986 ВЫПУСК 1

УДК 524.354—86

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВОЛОКОН КРАБОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ. I. НАБЛЮДАЕМЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ В СПЕКТРАХ ВОЛОКОН

В. В. ГОЛОВАТЫЙ, В. И. ПРОНИК

Поступила 4 апреля 1985
Принята к печати 25 марта 1986

Проведен анализ имеющихся в литературе результатов спектрофотометрических наблюдений волокон Крабовидной туманности. Показано, что существующие различия в спектрах отдельных конденсаций являются реальными. Исследованы закономерности наблюдаемого разнообразия спектров волокон. В силу этих закономерностей наблюдаемый в волокнах диапазон интенсивностей спектральных линий представлен тремя средними спектрами, содержащими интенсивности всех необходимых линий. Выяснено, что корреляция между линиями [O III]/Hβ и [O II]/Hβ существует только для волокон Крабовидной туманности и волокнистой туманности «Петля в Лебеде» (тоже остатке сверхновой) и не наблюдается ни для одной из диффузных или планетарных туманностей.

1. *Введение.* Волокна Крабовидной туманности являются остатком атмосферы сверхновой звезды, вспыхнувшей в 1054 г. в созвездии Тельца. Свечение газа в волокнах возбуждается L_c — излучением т. н. «аморфной массы» туманности, представляющим собой свечение релятивистских электронов в магнитном поле [1]. Еще в 1973 г. нами было отмечено [2], что относительные интенсивности эмиссионных линий, выраженные в единицах интенсивности H_β, сильно меняются от волокна к волокну, коррелируя при этом друг с другом. Это различие оказалось настолько большим, что не может быть объяснено лишь ошибками наблюдений, а, очевидно, отражает реальную дисперсию какого-то физического параметра в волокнах. Было высказано предположение, что таким параметром может быть химический состав в них. Однако единственным источником информации о наблюдаемых спектрах волокон, на котором основывается этот вывод, была имеющаяся в то время работа Волчера [1], в которой приведены данные об интенсивностях основных линий лишь в области длин волн от λ 3726+29 [O II] до λ 4959+5007 [O III] для 47 конденсаций.

В последнее время опубликован ряд других работ, в которых содержатся результаты спектральных наблюдений еще около 20 отдельных конденсаций в диапазоне λ 3345+426 [Ne V] ÷ λ 7320+30 [O II] [3—7]. Эти данные совместно с наблюдениями Волчера [1] позволяют более полно исследовать наблюдаемые закономерности в спектрах волокон и в дальнейшем выяснить причины дисперсии интенсивностей спектральных линий.

2. *Наблюдаемые закономерности в спектрах волокон.* Спектральные наблюдения отдельных волокон Крабовидной туманности проводились многими авторами [1, 3—7]. К настоящему времени изучены спектры около 60 отдельных конденсаций, расположенных более или менее равномерно по всей туманности. Собранные нами сведения об относительных интенсивностях эмиссионных линий в отдельных волокнах вместе с соответствующими обозначениями волокон и библиографическими ссылками приведены в табл. 1 в порядке возрастания интенсивности линии [O II]/H_β. Тем не менее, достаточно полные спектральные данные, необходимые для определения физических характеристик газа в волокнах, имеются лишь для нескольких ярких конденсаций. Для получения недостающих сведений об интенсивностях необходимых эмиссионных линий обычное осреднение не годится, так как не известно, по каким признакам следует группировать волокна — по их яркости, пространственному расположению или же по относительным интенсивностям эмиссионных линий. Но поскольку главной нашей целью является выяснение возможного различия в химическом составе волокон, которое должно отразиться на их спектрах, то при группировании волокон мы отдали предпочтение последнему признаку. Средний спектр «ярких» и «слабых» волокон, как будет показано ниже, отличается мало. Сначала, однако, мы попытались выявить закономерности в соотношениях между относительными интенсивностями разных эмиссионных линий для разных волокон.

Как уже отмечалось [2], анализ спектров отдельных конденсаций показал, что относительные интенсивности эмиссионных линий [O II]/H_β, [O III]/H_β, He I/H_β, He II/H_β и [Ne III]/H_β меняются от волокна к волокну, в среднем увеличиваясь с удалением волокна от центра туманности (такая корреляция наблюдается по данным Волчера [1]). Изменение интенсивностей одних эмиссионных линий, как правило, сопровождается соответствующим изменением интенсивностей других линий, что свидетельствует о реальности такого изменения ([2], рис. 3). Дальнейшие наблюдения спектров волокон не только подтвердили существование таких зависимостей, но и позволили установить диапазон изменения отношений интенсивностей линий. Спектральные наблюдения т. н. «фона» с южной стороны туманности [5] и «выброса» с ее северной стороны [3], физическое представление о которых, казалось бы, должно отличаться от существую-

Таблица 1

ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭМИССИОННЫХ ЛИНИЙ В ВОЛОКНАХ КРАБОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ

($I(H_\beta) = 1$)

№	Линии	[6] Пол. 3	[3] A7	[6] Пол. 5′	[6] Пол. 2	[1] 2100 V6a	[1] 2102 V10	[5] C1	[6] Пол. 8′	[6] Пол. 4	[3] A9
1	3726+29 [O II]	3.49:	4.93	5.12	5.64:	6.5	6.0	6.57	6.9	7.36	7.37
2	3869+968 [Ne III]	—	1.75*	2.3*	1.0*	1.73	1.25	1.8	—	1.1*	2.3*
3	4068+76 [S II]	—	—	—	—	0.18	0.69	0.26	—	0.38:	0.38:
4	4101 H_δ	—	—	—	—	0.40	—	—	—	0.28:	—
5	4340 H_γ	—	—	—	0.47	0.49	0.55	0.37	—	0.32	—
6	4363 [O III]	—	<0.59:	—	—	0.12	0.075	0.26	—	—	<0.5
7	4471 He I	0.10***	0.35:	0.14***	0.20***	0.40	—	<0.12:	—	0.07***	<0.38
8	4686 He II	0.55:	0.59:	0.59	0.81	1.22	—	0.47	—	0.14	0.25:
9	4959+5007 [O III]	4.51	15.9	7.4	8.1	—	5.5	13.5	8.0	4.73	16.5
10	5198+5201 [N I]	—	—	—	—	—	—	—	—	0.08	—
11	5755 [N II]	—	—	—	—	—	—	—	—	0.07	—
12	5876 He I	0.28:	—	0.42	0.56	—	—	0.20	—	0.20	—
13	6300+63 [O I]	0.90****	0.71**	—	0.36****	—	—	0.27****	2.1****	1.38	—
14	6563 H_α	2.99:	2.8**	2.46:	3.24	—	—	2.55	2.71:	2.54	—
15	6548+84 [N II]	4.3:	3.18**	0.55:	1.1:	—	—	4.18	8.9:	4.01	—
16	6716+31 [S II]	3.2:	1.1**	1.57	3.50	—	—	1.73	—	4.78	—
17	7320+30 [O II]	—	—	—	—	—	—	—	—	0.17:	—

№	[6] Пол. 10	[1] 2102 r9	[6] Пол. 7	[1] 2100 r5	[1] 2102 r5	[3] A1
1	7.4	7.5	7.54	7.5	7.8	7.8:
2	1.1*	1.73	1.65*	2.5*	1.89	3.4*
3	0.80	0.38	—	0.50	—	—
4	0.24	0.23	—	—	—	—
5	0.50	0.77	—	—	—	—
6	0.16	0.206	—	—	—	—
7	0.18	0.25	0.07***	0.24:	—	0.6:
8	0.40	0.50:	—	0.64:	0.94:	0.8:
9	9.0	7.3	8.2	10.4	8.5	26.8
10	—	—	<0.22	—	—	—
11	—	—	<0.15	—	—	—
12	0.53	—	0.19	—	—	—
13	1.60	—	1.09	—	—	—
14	3.75:	—	3.08	—	—	2.8**
15	3.7:	—	12.9	—	—	4.0**
16	12.5	—	4.35	—	—	2.6**
17	0.42	—	—	—	—	—

Таблица 1 (продолжение)

[6]	[5]	[1]	[1]	[6]	[3]
Пол. 6	B8	2131 r8	2100 V6b	Пол. 5	Ярк. волок.
8.08	8.31	9.1	9.0	9.22	10.0
1.75*	1.6*	1.90*	3.0*	1.4*	2.0*
0.54	0.47	0.70	—	0.51	0.4:
—	0.25	0.20	—	0.25	—
0.56	0.45	0.68	—	0.49	—
—	0.14	0.047	0.052	<0.26	0.2
0.093***	0.16	0.19	—	0.05***	0.3
0.22:	0.40	0.72:	0.93	0.30	0.7
5.25	10.4	7.1	16.4	8.24	13.4
—	—	—	—	0.11	—
<0.22	—	—	—	0.10	—
0.28	0.61	—	—	0.17	—
1.49	1.1*	—	—	1.03	1.30**
3.14	3.31	—	—	2.49	2.8**
9.6:	3.50	—	—	9.28	3.2**
5.58	0.21	—	—	4.28	5.50**
—	—	—	—	—	—

№	[7] Пол. 1	[1] 2130 r4	[4] Пол. 1	[4] Пол. 1′	[1] 2127 r5/V5
1	10.0	10.2	10.2	—	10.5
2	2.3*	1.9*	1.6*	—	2.81
3	0.24:	0.97	0.87	—	0.20
4	—	0.20	0.31	—	—
5	0.48	0.72	0.80	—	—
6	0.15	0.26	0.19	—	0.42
7	0.23	0.30	0.27	—	—
8	0.68	0.46	0.58	0.41	0.49
9	14.5	10.4	10.8	8.9	11.5
10	—	—	—	—	—
11	—	—	0.19	0.02	—
12	0.74	—	0.69	0.55	—
13	1.34	—	1.88	1.74	—
14	2.98	—	2.8**	3.52	—
15	3.96	—	6.5	4.13	—
16	3.51	—	14.0	14.2	—
17	—	—	0.61	—	—

Таблица 1 (продолжение)

[5]	[1]	[1]	[1]	[6]	[7]	[1]
E2	2100 V3	2126 r5	2104 r7	Пол. 1	Пол. 2	2127 r8
11.0	11.1	11.5	12.0	12.0	12.4	12.5
2.0*	—	2.58:	—	2.5*	2.6*	2.56*
0.21	—	0.20	—	0.31:	0.50	—
0.24	0.60	—	—	—	—	—
0.45	0.13	—	—	0.48	0.45	—
0.13	—	—	0.35	0.26	0.13:	0.43:
0.19	—	0.19	—	0.24	0.37	0.32:
0.54	0.56:	0.54:	—	0.88	0.87	—
13.9	11.8	13.9	13.8	19.7	17.2	15.5
—	—	—	—	<0.13	—	—
—	—	—	—	<0.11	—	—
0.67**	—	—	—	0.77	—	—
0.52**	—	—	—	0.57	—	—
3.49**	—	—	—	3.22	—	—
9.95**	—	—	—	5.03	—	—
3.50	—	—	—	3.14:	—	—
—	—	—	—	—	—	—

№	[5]	[4]	[1]	[1]	[1]	[1]	[6]
	B6	Пол. 2′	2102 V5	2127 V4	2103 V13	2100 V7/V8	Пол. 8
1	11.6	12.8	13:2	12.9	14.0	14.2	14.9
2	2.5*	2.8*	2.5*	2.8*	1.96*	3.05	2.3*
3	<0.50	0.50	0.13	0.26	—	0.35	0.34
4	0.35	0.31	0.20	0.28:	—	0.094	0.28
5	0.50	0.46	—	0.90	—	0.36:	0.49
6	0.26	0.13	0.43:	0.25:	—	0.24:	0.30
7	0.20	0.38	0.17	—	—	0.13:	0.17
8	0.57	0.87	1.00:	1.07	0.97	1.00	0.29
9	17.9	17.2	15.5	18.3	11.3	13.9	12.9
10	—	—	—	—	—	—	0.09
11	—	—	—	—	—	—	0.07
12	0.49**	—	—	—	—	—	0.44
13	0.78**	—	—	—	—	—	2.08
14	3.51**	—	—	—	—	—	3.47
15	2.9**	—	—	—	—	—	3.80
16	8.2**	—	—	—	—	—	5.58
17	—	—	—	—	—	—	0.45

Таблица 1 (продолжение)

[4]	[5]	[6]	[1]	[1]	[1]	[1]
Пол. 2	D1	Пол. 7′	2131 V4+r2	2130 V11	2131 V6	2131 r5
14.9	15.0	17.1	17.5	17.7	17.7	18.1
3.7*	2.7*	—	2.66*	3.50	3.18	5.5*
0.38	0.39	—	0.52	0.34	—	0.54
0.30	0.28	—	0.14	0.17	—	—
0.63	0.48	—	—	0.45	—	—
0.18	0.23	—	0.75:	0.33:	0.31:	0.54
0.28	0.11	—	—	—	0.33	—
0.83	0.26	—	—	1.30:	—	—
18.9	13.3	11.0	13.0	19.0	20.2	15.1
—	—	—	—	—	—	—
0.039	—	—	—	—	—	—
0.89	0.47	—	—	—	—	—
1.22	1.8****	—	—	—	—	—
2.8**	3.84	—	—	—	—	—
5.24	4.14	25.2:	—	—	—	—
4.50	5.96	4.01	—	—	—	—
0.39	—	—	—	—	—	—

Таблица 1 (окончание)

№	[1] 2103 V3	[3] Пол. B1	[1] 2126 r7	[5] D3	[6] Пол. 9	[5] D2	[5] B1	[5] B3	[1] 2127 V1	[1] 2100 r3	[3] B2	[1] 2103 V14	[1] 2127 SV1	[1] 2100 V2
1	18.1	19.3	20.4	20.7	22.1	23.2	23.8	25.5	27.9	30.0	34.3	35.2	28.2	48.0
2	4.02	8.0*	4.28	3.6*	2.8*	3.3*	9.3*	8.4*	3.8*	6.4*	6.5*	7.43	9.4*	—
3	—	—	—	0.28	0.33	<0.38	—	—	1.83	1.27	—	1.31	2.58	—
4	0.50	—	—	—	0.35	0.25	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	0.64	0.56	0.48	—	—	—	—	—	—	—
6	0.64:	0.66:	—	—	0.12	0.25	1.08	0.91	1.09:	0.98:	0.68	0.14:	0.21:	0.24:
7	0.28	<0.33	—	0.24	0.36	0.24	<0.48	0.68	0.18:	—	0.40	—	—	0.85
8	—	0.33	0.77	0.58	0.51	0.63	0.72	<0.68	1.64	—	0.81	1.36	—	0.95:
9	16.0	45.0	17.3	19.8	17.0	19.3	52.9	60.3	34.0	21.0	35.9:	25.1	38.6	32.8
10	—	—	—	—	0.07:	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	—	—	—	0.58	—	1.06	0.84	1.95	—	—	—	—	—	—
13	—	—	—	0.80****	—	2.0****	0.8****	—	—	—	1.08**	—	—	—
14	—	2.8**	—	2.8**	—	4.12	3.68	2.82	—	—	2.8**	—	—	—
15	—	3.33**	—	13.0	—	11.0	4.88	1.64	—	—	17.6**	—	—	—
16	—	1.33**	—	2.04	—	4.26	1.6	3.36	—	—	1.62**	—	—	—
17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. *— интенсивность линии λ 3968 [Ne III] определялась через интенсивность линии λ 3889 [Ne III] и отношение соответствующих вероятностей спонтанных переходов; ** — для определения интенсивностей соответствующих линий использовалось отношение $H_\alpha/H_\beta = 2.8$; *** — интенсивность линии λ 4471 He I вычислялась через интенсивность линии λ 5876 He I; **** — интенсивность линии λ 6363 [O I] определялась через интенсивность линии λ 6300 [O I] и отношение соответствующих вероятностей спонтанных переходов.

щего представления о волокнах, также согласуются с найденными зависимостями. Это говорит о том, что природа указанных образований и волокон, как и механизм возбуждения их свечения, одни и те же.

В результате предпринятого нами анализа спектров отдельных волокон рассмотрен и в дальнейшем использован для определения физических характеристик волокон и их химического состава ряд следующих зависимостей между интенсивностями разных эмиссионных линий.

Прежде всего, это хорошо выраженные зависимости между отношениями λ 4686 He II/H_3 и λ 4471 He I/H_3 (рис. 1a), а также между λ 4959+5007 [O III]/H_β и λ 3726+29 [O II]/H_3 (рис. 1b). На рисунках они сравниваются с соответствующими зависимостями для планетарных туманностей (заштрихованные области). Интенсивности линий He и O для последних взяты из каталога Калера [8]. Незаполненными большими кружками на этих и остальных рисунках обозначены наблюдения слабого ореола на краю Крабовидной туманности [5]. К сожалению, подобные соотношения нельзя построить для атомов N, Ne и S, так как спектральные линии соответствующих ионов в смежных стадиях ионизации в волокнах не наблюдаются.

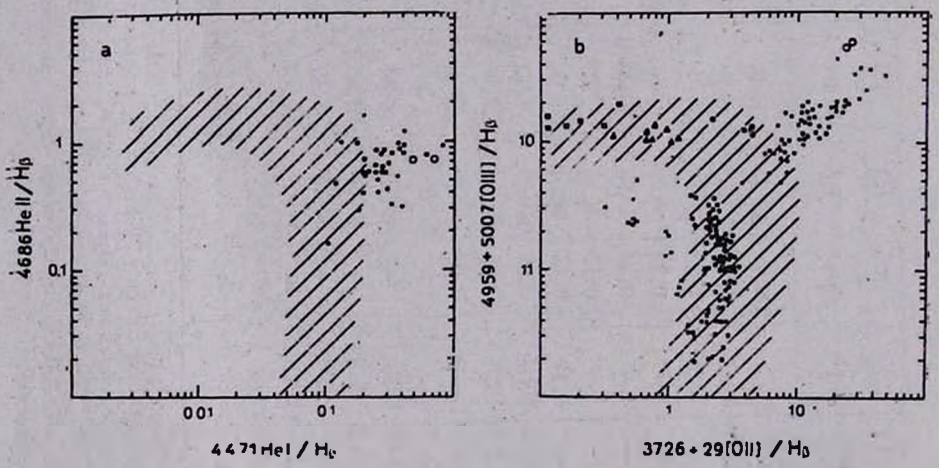

Рис. 1. a) Зависимость между отношениями интенсивностей линий λ 4686 He II/H_β и λ 4471 He I/H_3 для волокон Крабовидной туманности (точки) и планетарных туманностей (заштрихованная область). Незаполненные большие кружки — наблюдения слабого ореола на краю Крабовидной туманности. b) Зависимость между отношениями интенсивностей λ 4959+5007 [O III]/H_β и λ 3726+29 [O II]/H_β для волокон Крабовидной туманности (точки); для планетарных туманностей (заштрихованная область, а также △ — NGC 2392, □ — NGC 7662, ⊙ — NGC 6853); для туманности Ориона (крестики) и для диффузной туманности „Лагуна" (пустые кружки малого размера).

Далее обнаружена зависимость между интенсивностью линий λ 4959+5007 [O III]/Hβ и интенсивностями таких линий, как λ 3346+426 [Ne V]/Hβ, λ 3869+968 [Ne III]/Hβ, λ 4363 [O III]/Hβ, λ 4471 He I/Hβ, λ 4686 He II/Hβ, λ 5876 He I/Hβ и λ 7320+30 [O II]/Hβ. Большинство из этих зависимостей показаны на рис. 2.

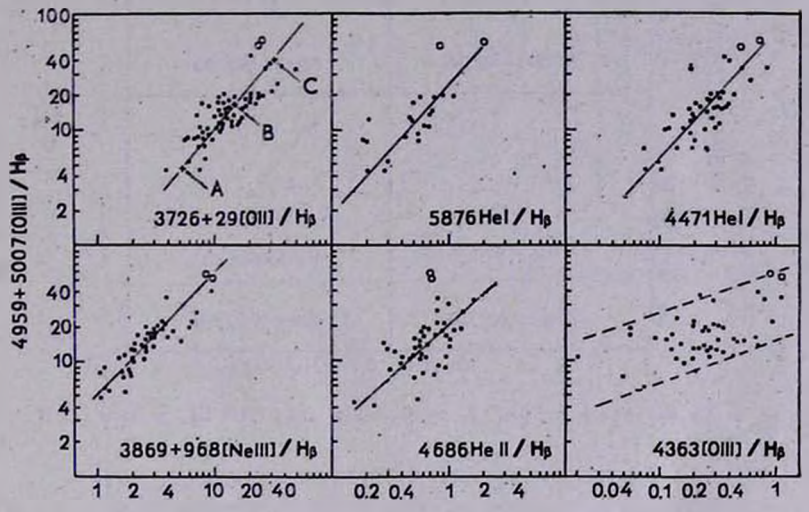

Рис. 2. Зависимости между отношениями интенсивностей линий λ 4959+5007 [O III]/Hβ и I(λ)/Hβ для волокон Крабовидной туманности (для линий [O II], [Ne III], He I, He II).

Однако не все линии коррелируют с отношением интенсивностей [O III]/Hβ. В частности, очень слабая корреляция обратного знака имеется для линий λ 4068+76 [S II]/Hβ, λ 5755 [N II]/Hβ, λ 6300+63 [O I]/Hβ, λ 6548+84 [N II]/Hβ и λ 6716+31 [S II]/Hβ (рис. 3). Поэтому мы использовали линейную корреляцию между отношением интенсивностей [O III]/Hβ, с одной стороны, и каждым из следующих отношений λ 3726+29 [O II]/λ 4068+76 [S II], λ 3726+29 [O II]/λ 5755 [N II], λ 3726+29 [O II]/λ 6300+63 [O I], λ 3726+29 [O II]/λ 6548+84 [N II], λ 3726+29 [O II]/λ 6716+31 [S II], с другой стороны (рис. 4).

Наконец, рассмотрен ряд других соотношений между относительными интенсивностями разных эмиссионных линий, принадлежащих разным химическим элементам (рис. 5). Все соотношения на рис. 5, за исключением зависимости между небулярными линиями [OIII]/[NeIII] и [OII]/[NeIII], в которой соответствующие точки группируются в небольшом эллипсе, показывают хорошо выраженные зависимости, лежащие примерно под углом 45°.

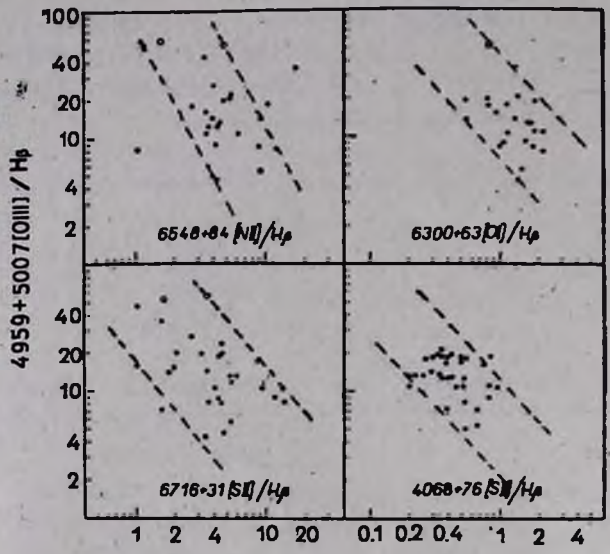

Рис. 3. То же, что и на рис. 2, только для линий [N II], S II] и [O I].

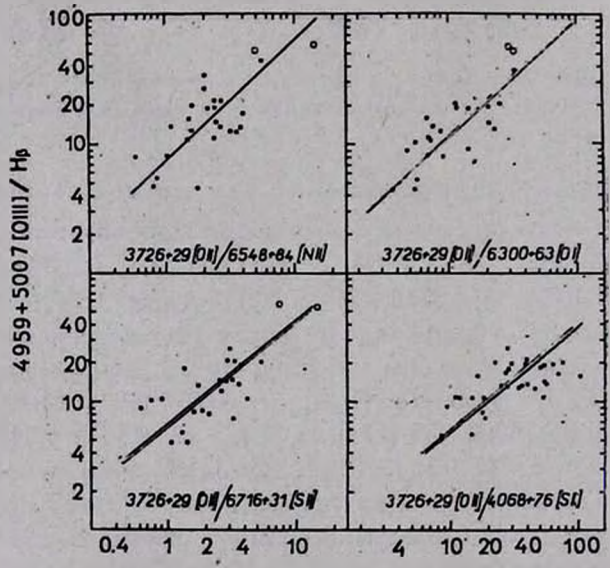

Рис. 4. Зависимость между отношениями интенсивностей линий $\sum_{\lambda}^{\lambda}$ 4959+5007 [O III]/Hβ и 3726+29 [O II]/$I(\lambda)$ для волокон Крабовидной туманности (для линий [N II], [S II] и [O I]).

Найденные таким образом корреляции между относительными интенсивностями эмиссионных линий в волокнах Крабовидной туманности были использованы для определения трех средних спектров, охватывающих весь наблюдаемый диапазон спектральных особенностей. Такое группирование спектров, как уже отмечалось, предпринято в связи с трудностями построения фотоионизационной модели свечения отдельных волокон, когда

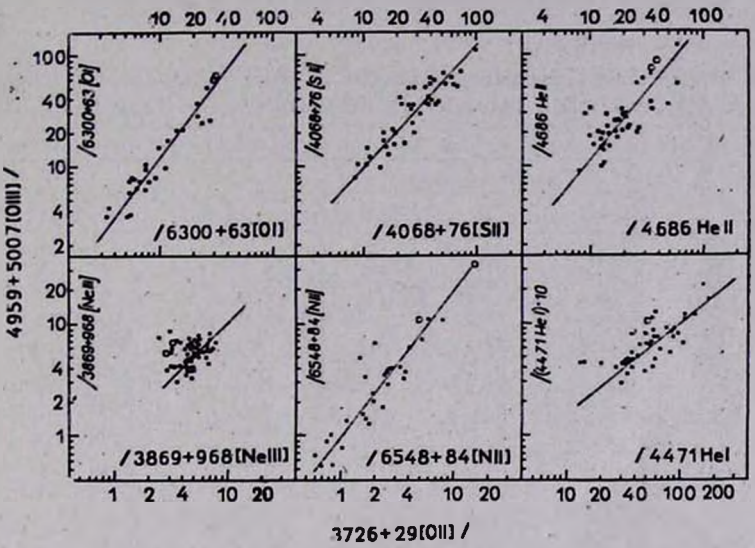

Рис. 5. Зависимости между отношениями интенсивностей линий 4959+5007 [O III]/I (λ) и 3726+29 [O II]/I (λ) для волокон Крабовидной туманности (для линий [Ne III], [O I], He I, He II, [S II], [N II]).

в их спектрах отсутствуют линии того или иного химического элемента. Заметим, что расчет фотоионизационных моделей свечения волокон является наиболее точным методом определения физических характеристик волокон и туманности в целом (химического состава, оптической толщины, параметров поля L_c-излучения и др.). В результате наблюдаемые спектры волокон, взятые из работ [1, 3—7], мы представили тремя синтетическими спектрами A, B и C, которые содержат все необходимые для анализа физических условий линии и в которых отношения интенсивностей λ 4959+5007 [O III]/H_β приняты равными 5, 16 и 40 соответственно. Эти значения соответствуют примерно минимальной, средней и максимальной величине интенсивности [O III]/H_β, наблюдаемой в волокнах. Заметим, что большинство волокон, спектры которых до сих пор изучались, принадлежит к группе *B*.

Для определения относительных интенсивностей других эмиссионных линий мы использовали корреляции между [O III]/H_β и соответствую-

щими отношениями $I(\lambda)/H_\beta$ (рис. 2). Интенсивности недостающих линий определялись через хорошо выраженные линейные зависимости между [O III]/H_β и [O II]/$I(\lambda)$ (рис. 4). При этом использовались интенсивности линий [O II]/H_β, найденные по зависимости между [O III]/H_β и [O II]/H_β. Найденные таким образом относительные интенсивности основных эмиссионных линий, наблюдаемых в волокнах Крабовидной туманности, для каждой из групп волокон A, B и C приведены в табл. 2.

Таблица 2

ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ОСНОВНЫХ ЭМИССИОННЫХ ЛИНИЙ, НАБЛЮДАЕМЫХ В ВОЛОКНАХ КРАБОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ

Линия	$I(\lambda)/I(H_\beta)$					
	Группа волокон			Яркие	Слабые	Яркое волокно
	A	B	C			
3346+425 [Ne V]	0.07	0.70	3.9*	0.38	1.2	0.70
3726+29 [O II]	5.5	15.0	30.0	10.5	20.0	14.9
3869+968 [Ne III]	1.0	2.9	7.0	2.2	4.0	3.4
4068+76 [S II]	0.64	0.40	0.30**	0.55	0.44	0.45
4101 H_δ	0.23	0.27	0.30 ***	0.24	0.28	—
4340 H_γ	0.43	0.45	0.50 ***	0.51	0.49	—
4363 [O III]	0.028	0.24	1.0	0.15	0.40	0.18
4471 He I	0.030	0.26	0.63	0.21	0.37	0.28
4686 He II	0.23	0.85	2.4	0.58	1.2	0.83
4959+5007 [O III]	*5.0*	*16.0*	*40.0*	10.8	22.2	20.9
5198+5200 [N I]	—	—	—	0.13	0.08	0.10
5755 [N II]	0.089	0.080	0.058**	0.081	0.061	0.04
5876 He I	0.25	0.70	1.6	0.44	0.82	0.89
6300+63 [O I]	1.4	1.1	0.83**	1.2	1.0	1.2
6563 H_α	2.8	2.9	3.0****	3.0	3.7	3.2
6548+84 [N II]	8.7	6.8	5.0 **	7.2	6.7	4.5
6716+31 [S II]	7.3	4.7	3.0 **	5.8	4.3	4.5
7320+30 [O II]	0.15	0.58	1.6 **	0.38	0.72	0.39

Примечание. * — зависимость между [O III]/H_β и [Ne V]/H_β построена по нескольким измерениям интенсивности линии [Ne V]/H_β, поэтому данные значения неуверенные; ** — соответствующие значения найдены по зависимости между интенсивностями линий [O III]/H_β и [O II]/$I(\lambda)$; *** — значения, найденные по зависимости между H_α/H_β и H_γ/H_β, H_δ/H_β; **** — значения найдены по зависимости [O III]/H_β и H_α/H_β.

Для сравнения в табл. 2 приводится также спектр «ярких» и «слабых» волокон (такое разделение волокон часто употребляется в литературе).

Интенсивности линий для этих волокон определялись обычным осреднением наблюдаемого линейчатого спектра. В качестве разделяющего фактора служила интенсивность линии [O III]/H_β. Яркими считались те волокна, у которых [O III]/$H_\beta > 15.0$, а слабыми — у которых [O III]/$H_\beta <$ < 15.0. Как видно, спектры «ярких» и «слабых» конденсаций не так сильно отражают разнообразие наблюдаемых спектров волокон, как группы волокон A, B и C. В табл. 2 приведен также индивидуальный спектр отдельного, т. н. «яркого волокна», соответствующие интенсивности эмиссионных линий для которого взяты из работы [9]. Интенсивности всех спектральных линий в табл. 2 исправлены за межзвездное поглощение $A_V = 1^m.6$.

3. *Обсуждение.* Зависимости между отношениями [O III]/H_β и $I(\lambda)/H_\beta$ (рис. 2, 3) показывают, что интенсивности линий [O III], [Ne III], [O II], He I и He II меняются примерно в одинаковой пропорции при переходе от одного волокна к другому. Несколько отличающееся поведение линии λ 4363 [O III], очевидно, обусловлено дисперсией электронной температуры T_e в волокнах, а возможно и ошибками наблюдений (линия λ 4363 [O III] одна из самых слабых). Поведение линий [S II], [N II] и [O I] (рис. 3) отличается от поведения остальных линий. Несмотря на большой разброс точек на рис. 3, видно, что интенсивности этих линий в среднем уменьшаются с увеличением интенсивности [O III]/H_β. Линии [S II], [N II] и [O I] довольно яркие, поэтому разброс точек на рис. 3 скорее всего реальный; частично он может быть связан с дисперсией T_e в волокнах.

Зависимости, представленные на рис. 5, подтверждают сделанный выше вывод о характере поведения разных линий. В частности, большая концентрация точек вблизи средних значений отношения [O III]/[Ne III] и [O II]/[Ne III] (рис. 5, слева внизу) свидетельствует о том, что потоки в линиях [O III], [O II] и [Ne III] связаны между собой линейно с коэффициентом пропорциональности, близким к 1. Эти линии образуют первую группу линий. Зависимости, включающие линии второй группы [S II], [N II], [O I] (рис. 5), согласуются с большой дисперсией точек на рис. 3 и свидетельствуют о том, что эта дисперсия не может быть обусловлена только электронной температурой T_e: отношения запрещенных линий на рис. 5 меняются больше чем на порядок величины, в то время как они слабо зависят от T_e в диапазоне $T_e = (10—20) \cdot 10^3$ K, наблюдаемом в волокнах. Реальная дисперсия интенсивностей линий [O I], [N II], [S II] может быть связана с разной геометрической толщиной оптически толстых волокон, что приводит к разной ширине зоны свечения низкоионизованных атомов, либо же с дисперсией химического состава газа в волокнах.

Из рис. 5 видно также, что поведение линий He I и He II такое же, как поведение линий [O I], [N II] и [S II]. Этого, однако, нельзя сказать,

если сравнивать рис. 2 и 3. Следовательно, линии He I и He II образуют третью группу линий. Поскольку зависимости, включающие линии He I и He II на рис. 5, похожи на зависимость [O III]/H_3 — [O II]/H_3 (рис. 2), то линия H_3 также относится к этой группе.

Таким образом, наблюдаемые в спектрах волокон Крабовидной туманности эмиссионные линии по своему поведению относительно остальных линий делятся на три группы: к первой группе линий относятся [O III], [O II] и [Ne III], ко второй — [S II], [N II] и [O I] и к третьей — H_β, He I, He II. Любые соотношения между относительными интенсивностями линий внутри каждой из групп (см. рис. 1а и рис. 5 слева внизу) не показывают никаких зависимостей, а показывают только разброс точек, который наименьший в первой группе и наибольший во второй. Величина разброса не связана с яркостью линий в данной группе. Следует отметить, что группы линий, обсуждаемые здесь, не связаны с группами волокон, обсуждаемыми выше.

Чем же обусловлено наблюдаемое разнообразие спектров волокон Крабовидной туманности? Некоторые рассуждения на эту тему изложены в работе [2]; сделанные там выводы подтверждаются сейчас новыми наблюдениями. Большую роль, несомненно, играет дисперсия ионизации атомов в разных волокнах, обусловленная разными размерами волокон и значениями плотности газа в них, а также разными расстояниями их от центра туманности, т. е. разными характеристиками поля ионизирующего излучения «аморфной массы». Однако одной лишь дисперсией ионизации нельзя объяснить наблюдаемые зависимости He II/H_3 — He I/H_3 и [O III]/H_β — [O II]/H_3 на рис. 1. Как показали расчеты [2], при фиксированном значении содержания гелия или кислорода дисперсия ионизации приводит к зависимостям между указанными выше отношениями линий, напоминающим таковые для планетарных туманностей (заштрихованные области). Дисперсия T_e, в принципе, может объяснить зависимости между линиями кислорода (рис. 1b), однако она не в состоянии объяснить зависимость между линиями гелия (рис. 1а). Ударное возбуждение линий водорода и гелия в волокнах при наблюдаемых температурах $T_e \lesssim 2 \cdot 10^4$ K также не может объяснить наблюдаемые зависимости на рис. 1.

Кроме дисперсии ионизации и T_e в волокнах важную роль при интерпретации спектров играет дисперсия содержания химических элементов. Этот вопрос, однако, требует специального рассмотрения и будет обсуждаться во второй части нашего исследования.

Нетривиальность предположения о дисперсии химического состава в волокнах Крабовидной туманности заставила нас выяснить, имеются ли зависимости, аналогичные показанным на рис. 1—5, в других туманностях (диффузных и планетарных), спектры которых заметно меняются по

поверхности. Легче всего это проследить по линиям λ 4959 + 5007 [O III] и λ 3726 + 29 [O II], которые наблюдаются в спектре практически любой туманности.

Хорошо известно, что спектр туманности Ориона (NGC 1976) характеризуется максимальным возбуждением в ее центральной части вблизи Трапеции [10]. Там отношение [O III]/H_β максимально. Отношение же [O II]/H_β в центре туманности минимально и увеличивается наружу. На рис. 1b, зависимость между [O III]/H_β и [O II]/H_β для туманности Ориона отмечена крестиками. Как видно, характер этой зависимости не такой, как для волокон Крабовидной туманности. Он целиком объясняется изменением ионизации кислорода внутри туманности по мере удаления от возбуждающей звезды θ' Ориона.

Аналогичную зависимость мы построили для диффузной туманности «Лагуна» (NGC 6523) по данным наблюдений [11]. На рис. 1b она отмечена незаполненными кружками. И эта зависимость также соответствует изменению ионизации кислорода в туманности. Небольшое различие между ходом зависимостей для туманности Лагуна и Ориона связано с тем, что излучение центральной части NGC 1976 (на рис. 1b это область больших значений [O III]/H_β) испытывает поглощение пылью, перемешанной с газом. Учет этого поглощения не изменит отношения [O III]/H_β, но увеличит [O II]/H_β.

Такие же зависимости мы попытались построить для некоторых планетарных туманностей, спектры которых приведены в каталоге [8]. Наиболее подходящими для нашей цели оказались три туманности — NGC 2392, NGC 6853 и NGC 7662. К сожалению, диапазон изменения относительной интенсивности линий кислорода в каждой из этих трех туманностей невелик, к тому же все они являются объектами высокого возбуждения. Тем не менее, даже эти короткие участки зависимостей указывают на изменение ионизации газа в туманностях.

Наиболее полную зависимость между [O III]/H_β и [O II]/H_β (к тому же, весьма близкую к теоретической [2]) представляет набор планетарных туманностей с примерно одинаковым химическим составом. Ионизация газа, а следовательно, и наблюдаемые спектры в разных туманностях сильно отличаются, но все вместе образуют четкую зависимость. На рис. 1b она представлена «заштрихованной областью». Такая же зависимость показана на рис. 1a между отношениями интенсивностей линий He II/H_β и He I/H_β.

Из всех рассмотренных нами туманностей только в волокнистой туманности «Петля в Лебеде» (NGC 4449), также остатке Сверхновой, имеется зависимость, подобная той, что наблюдается для волокон Крабовидной туманности. Согласно одной из последних работ [12], посвящен-

ных интерпретации спектров волокон NGC 4449, существующие модели свечения волокон в результате прохождения ударной волны не в состоянии объяснить наблюдаемого многообразия спектров волокон. Таким образом, спектры волокон Крабовидной туманности и туманности «Петля в Лебеде» похожи между собой не только большой яркостью запрещенных линий, но и своим многообразием, заключающемся в широком диапазоне значений относительных интенсивностей эмиссионных линий для разных волокон.

Львовский государственный
университет
Крымская астрофизическая
обсерватория

THE CHEMICAL COMPOSITION OF CRAB NEBULAE FILAMENTS. I. THE OBSERVED REGULARITIES IN THE SPECTRA OF FILAMENTS

V. V. GOLOVATY, V. I. PRONIK

The analysis of the available published spectroscopic observations of the Crab Nebulae filaments has been carried out. It has been shown that the relative intensities of the emission lines differ rather strongly from filament to filament and these differences are real. The regularity in the observed variety of spectra has been studied. Owing to the regularity, the range of intensities of the observed lines is represented by means of three average spectra containing the intensities of all necessary lines. It is ascertained that the dependence between ratios [O III]/H_β and [O II]/H_β is observed not only in the Crab Nebulae but also in filaments of nebulae Cygny Loop (remnant supernovae) and in no other diffuse or planetary nebulae.

ЛИТЕРАТУРА

1. *L. Woltjer*, Bull. Astron. Inst. Netherl., 14, 483, 1958.
2. *В. В. Головатый, В. И. Проник*, Астрон. ж., 50, 1147, 1973.
3. *K. Davidson*, Astrophys. J., 220, 177, 1978.
4. *J. Miller*, Astrophys. J., 220, 490, 1978.
5. *K. Davidson*, Astrophys. J., 228, 179, 1979.
6. *R. Fesen, R. Kirshner*, Astrophys. J., 258, 1, 1982.
7. *K. Davidson, T. R. Gull, S. P. Maran, T. P. Stecher, R. A. Fesen, R. A. Parise, C. A. Harvell, M. Kafatos, V. Trimble*, Astrophys. J., 253, 696, 1982.
8. *J. B. Kaler*, Astrophys. J. Suppl. Ser., 31, No. 4, 517, 1976.
9. *D. Pequignot, M. Dennefeld*, Astron. and Astrophys., 120, 249, 1983.
10. *D. Osterbrock, E. Flatter*, Astrophys. J., 129, 26, 1959.
11. *В. И. Проник*, Изв. Крым. обсерв., 23, 3, 1960.
12. *R. Fesen, W. Blair, R. Kirshner*, Astrophys. J., 262, 171, 1982.