

УДК: 524.354.2—36

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВОЛОКОН КРАБОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ. II. ДИСПЕРСИЯ СОДЕРЖАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ВОЛОКНАХ

В. В. ГОЛОВАТЫЙ, В. И. ПРОНИК

Поступила 16 апреля 1985

Принята к печати 25 мая 1986

Излагаются результаты количественного анализа химического состава волокон Крабовидной туманности, наблюдательной базой которого послужили опубликованные к настоящему времени многочисленные спектры отдельных волокон. В основу метода положено сравнение полученных из наблюдений относительных содержаний двух смежных стадий ионизации одного элемента (например, O^{++}/Ne^+ и O^+/He^+) с аналогичными отношениями, вычисленными для модели с известным химическим составом и с такой же ионизацией газа. Построены номограммы, удобные для быстрого определения химического состава. Показано, что среднее содержание гелия в волокнах в несколько раз больше нормального, а диапазон значений He/H составляет от 0.2 до 1.4 в разных волокнах. Значительная дисперсия содержания имеется также для тяжелых элементов. Однако сильная зависимость наблюдаемого количества ионов, излучающих запрещенные линии, от электронной температуры и большая неопределенность последней делают невозможным уверенное определение их содержания.

1. *Введение.* Вопрос о химическом составе волокон Крабовидной туманности дискутируется астрофизиками уже на протяжении многих лет [1—10]. Имеющиеся, однако, сведения о содержании химических элементов в волокнах не являются однозначными: соответствующие данные, полученные разными авторами для разных волокон, сильно различаются между собой (табл. 1). Особенно это касается гелия, содержание которого к тому же значительно отличается от «нормального». Различие химического состава в волокнах не может быть обусловлено неточностью наблюдений или неточностью существующих методов его определения и является, очевидно, реальным [4].

В данной работе излагаются результаты количественного анализа химического состава волокон Крабовидной туманности, предпринятого с целью проверки его возможной дисперсии. Хотя возможность существования дисперсии химического состава в волокнах некоторыми авторами до-

пускалась (см., например, [8]), главной целью всех предыдущих исследований было определение среднего содержания химических элементов в них.

Таблица 1

СОДЕРЖАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ВОЛОКНАХ
КРАБОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ ПО ДАННЫМ РАЗНЫХ АВТОРОВ

Источник	He/H	O/H	N/H	Ne/H	S/H	Примечание
[1]	{0.40 0.45 0.62}	7.0—4 ^{a)} 6.1—4 3.4—4	2.7—3 1.1—3 3.1—4	2.0—3 6.2—4 1.2—4	8.6—4 3.5—4 8.4—5	*
[2]	{0.45 1.0}	1.1—4 2.0—4	9.0—4 6.0—4	5.0—4 5.0—4	— —	**
[3]	{2.1 0.86}	1.8—4 2.7—4	4.3—4 8.8—4	— —	— —	**
[7]	0.46	6.1—5	2.3—4	4.2—5	—	3*
[8]	{0.60 0.46 0.70 0.87}	— 1.8—4 — —	2.9—3 — 1.4—3 1.2—3	9.2—4 — 6.0—4 4.9—4	1.3—4 1.3—4 1.9—5 —	4*
[5, 6]	0.3—0.6	(1—3)—4	(3—9)—4	(1—5)—4	—	5*
[9]	{0.19 1.5 2.9}	2.8—4 2.0—4 1.8—4	5.5—4 8.9—4 1.2—3	2.0—4 3.6—4 6.2—4	3.8—5 2.2—4 2.0—5	6*
[10]	{0.70 0.70}	1.4—4 1.4—4	2.4—3 2.0—3	8.6—4 6.9—4	4.0—5 4.0—5	7*

a) $7.0-4=7.0 \cdot 10^{-4}$

Примечание. * — для $T_e = 8000, 10\ 000$ и $17\ 000$ К (сверху вниз по строкам);

** — принималось автором для объяснения спектра волокон в разных моделях свечения;

3* — соответствует области «Jet»; 4* — определено для разных конкретных волокон;

5* — диапазон содержания по разным волокнам; 6* — найдено при разных предполо-

жениях о количестве излучения в линии H β , вырабатываемого в зонах свечения H $^+$.

He $^+$ и O $^{++}$; 7* — принималось автором для объяснения спектра яркого волокна в соответствующих моделях.

Наблюдательной основой данного исследования послужили спектры отдельных волокон, опубликованные к настоящему времени [1, 7—10, 12, 13]. Главной нашей целью было выяснение следующих проблем: 1) отличается ли содержание химических элементов в волокнах от «нормального» и 2) существует ли действительно дисперсия химического состава в них? Для определения химического состава волокон использовался метод, основанный на построении фотоионизационных моделей их свечения [11]. В

отличие от предыдущих расчетов [4, 11], настоящие являются более полными: в уравнения ионизационного равновесия включены ионизация ударом и реакция перезарядок, а в уравнения термического равновесия — дополнительные процессы охлаждения газа; кроме того, более тщательно учитывается диффузное излучение.

2. *Расчет фотоионизационных моделей.* Основным механизмом возбуждения свечения газа в волокнах, несомненно, является фотоионизация атомов синхротронным L_c -излучением «аморфной массы» туманности (см., например, [1]). Об этом свидетельствует наблюдаемый бальмеровский декремент в волокнах, который для большинства из них соответствует чисто рекомбинационному, и малый вклад ударноволновых эффектов в свечение газа [6].

Расчет ионизации атомов в волокнах осуществляется совместным решением уравнений ионизационно-рекомбинационного равновесия и энергетического баланса. Соответствующие выражения, а также методика расчетов описаны в работе [11]. В последнее время выяснилось, однако, что важную роль в установлении ионизационного равновесия могут играть реакции перезарядок между атомами H° , а в ряде случаев и He° , и ионами тяжелых элементов: $Z^{i+1} + A^{\circ} \rightleftharpoons Z^i + A^+$, где A относится к H или He . Число таких перезарядок равно $Z^{i+1} \cdot A^{\circ} \cdot \bar{k}$ $\text{см}^{-3} \text{с}^{-1}$ для прямого процесса (ионизационной перезарядки) и $Z^i A^+ \bar{k}$ $\text{см}^{-3} \text{с}^{-1}$ для обратного (рекомбинационной перезарядки). Букву N , указывающую на концентрацию частиц, здесь и в дальнейшем мы опускаем. Учитываемые нами реакции перезарядок и их сечение приведены в табл. 2; ссылки на них имеются в работе [14].

Уравнения, описывающие фото- и ударные ионизации атомов на оптической толщине $\tau_s(A)$ с учетом упомянутых выше процессов, в общем виде запишутся так:

$$\frac{A^+}{A^{\circ}} = \frac{\frac{1}{h} F(A^{\circ}) \sigma_0(A^{\circ}) \cdot \int_1^{\infty} x^{\alpha+s-1} e^{-\tau_s(A)} dx + N_s \cdot C(A^{\circ}) + \sum Z^{i+1} \cdot \bar{k}}{N_s \alpha_p(A^+) + \sum Z^i \bar{k}}$$

$$\frac{Z^{i+1}}{Z^i} = \frac{\frac{1}{h} F(Z^i) \sigma_0(Z^i) \cdot \int_1^{\infty} x^{\alpha+s-1} e^{-\tau_s(A)} dx + N_s \cdot C(Z^i) + \sum A^+ \cdot \bar{k}}{N_s \alpha_p(Z^{i+1}) + \sum A^{\circ} \cdot \bar{k}}$$

Таблица 2

ПРИНЯТЫЕ ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕЗАРЯДОК

Реакция	$\bar{k}(Z^{i+1}, H^0)$	$\bar{k}(Z^i, H^+)$	$\bar{k}(Z^{i+1}, H_0)$	$\bar{k}(Z^i, H_0^+)$
$O^+ + A^0 \rightleftharpoons O^0 + A^+$	1.0-9*	9.1-10	0	0
$O^{2+} + A^0 \rightleftharpoons O^+ + A^+$	7.7-10	0	3.2-10	0
$O^{3+} + A^0 \rightleftharpoons O^{2+} + A^+$	8.6-9	0	1.0-9	0
$O^{4+} + A^0 \rightleftharpoons O^{3+} + A^+$	2.6-10	0	6.5-10	0
$O^{5+} + A^0 \rightleftharpoons O^{4+} + A^+$	0	0	0	0
$N^+ + A^0 \rightleftharpoons N^0 + A^+$	1.0-12	1.2-12	0	0
$N^{2+} + A^0 \rightleftharpoons N^+ + A^+$	8.6-10	0	3.3-10	4.1-12
$N^{3+} + A^0 \rightleftharpoons N^{2+} + A^+$	2.9-9	0	1.1-10	0
$N^{4+} + A^0 \rightleftharpoons N^{3+} + A^+$	1.6-10	0	2.0-9	0
$N^{5+} + A^0 \rightleftharpoons N^{4+} + A^+$	0	0	0	0
$Ne^+ + A^0 \rightleftharpoons Ne^0 + A^+$	0	0	0	0
$Ne^{2+} + A^0 \rightleftharpoons Ne^+ + A^+$	3.0-10	0	1.0-14	0
$Ne^{3+} + A^0 \rightleftharpoons Ne^{2+} + A^+$	5.7-9	0	1.0-14	0
$Ne^{4+} + A^0 \rightleftharpoons Ne^{3+} + A^+$	6.6-9	0	1.7-9	0
$Ne^{5+} + A^0 \rightleftharpoons Ne^{4+} + A^+$	0	0	0	0
$S^+ + A^0 \rightleftharpoons S^0 + A^+$	3.0-15	1.0-9	0	0
$S^{2+} + A^0 \rightleftharpoons S^+ + A^+$	1.0-14	0	0	2.5-11
$S^{3+} + A^0 \rightleftharpoons S^{2+} + A^+$	2.3-9	0	1.1-9	1.3-11
$S^{4+} + A^0 \rightleftharpoons S^{3+} + A^+$	6.5-9	0	7.6-13	0
$S^{5+} + A^0 \rightleftharpoons S^{4+} + A^+$	0	0	0	0
$He^+ + H^0 \rightleftharpoons He^0 + H^+$	8.0-16	0	0	0
$He^{++} + H^0 \rightleftharpoons He^+ + H^+$	1.6-13	0	0	0

* 1.0-9 = 1.0 · 10⁻⁹.

Первое уравнение записано для N^+/N^0 и He^+/He^0 , второе для остальных атомов Z^{i+1}/Z^i . Здесь $F = F_0 + F_{\text{диф}}$, где F_0 — поток синхротронного L_c -излучения от туманности на границе поглощения данным сортом атомов Z^i (на внутренней стороне волокон), а $F_{\text{диф}}$ — поток диффузного L_c -излучения в волокне; $\alpha_p = \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n^r + \alpha^d$ — коэффициент комбинации (радиативной, просуммированной по всем энергетическим уровням n , и диэлектронной), являющийся лишь функцией T_e ; C — коэффициент ударной ионизации с первого уровня. Поток L_c -излучения представлялся степенным законом типа $F_\lambda = F_0 [\lambda/\lambda_0 (H^0)]^z$, где z — спектральный индекс синхротронного излучения за лавмановским

пределом. Методика учета диффузного излучения описана в работе [15].

Уравнение энергетического баланса и выражения, описывающие процессы нагрева и охлаждения газа, приведены в [11]. Основным механизмом образования электронов и нагрева газа в волокнах являются фотоионизации L_c -излучением «аморфной массы». Процессами, приводящими к охлаждению газа в областях Н II, считались: возбуждение запрещенных линий, возбуждение и ионизация атомов H^0 электронными столкновениями, а также непрерывное излучение в результате $f-f$ и $f-b$ — переходов. В областях Н I эффективными уже становятся потери энергии на возбуждение электронным ударом линий, возникающих при переходах между подуровнями тонкой структуры атомов и ионов N, O, Ne и др. Аналитические выражения, необходимые для учета этих процессов, мы заимствовали из работ [16, 17].

Рассчитывалась ионизация атомов H, He, N, O, Ne и S, линии которых наблюдаются в волокнах. Учитывалось 5 стадий ионизации. Постановщиком электронов считались все перечисленные выше атомы, однако источником нагрева — только фотоионизации атомов H и He. Ионизационная структура волокна определяется только изменением оптической толщины водорода и гелия с глубиной, поэтому содержание тяжелых элементов на их ионизацию не влияют. В результате расчетов находились значения N_e , T_e и $N(A^i)$ в каждом тонком для L_c -излучения геометрическом слое, на которые разбивалось волокно в направлении распространения излучения. Суммарное количество ионов Z^i по отношению к числу протонов вычислялось так:

$$Z^i/H^+ = \sum_m Z_m^i V_m / \sum_m H_m^+ V_m, \quad (2)$$

где суммирование проводилось по объемам всех m слоев.

Волокно в наших расчетах представлялось частью шарового пояса, ограниченного по линейной толщине в радиальном направлении заданной оптической толщиной $\tau_0(H^0) \lesssim 10$; другие размеры этого пояса (длина и ширина) соответствовали той оптической толщине, до которой влияние диффузного L_c -излучения на ионизацию рассчитываемых атомов было еще заметным, т. е. до $\tau_0(H^0) \sim 10$ [15]. Ясно, что в разных моделях геометрическая форма волокна может быть различной, но это различие на ионизацию атомов диффузным излучением не влияет.

Значения различных атомных констант, необходимых для расчета ионизационной структуры газа в волокнах, взяты из работ, ссылки на которые приведены в [11], а величины сечений ударной ионизации — из [18].

3. *Определение химического состава.* Свободными параметрами в уравнениях ионизационного и термического равновесия являются F_0 , α , плотность атомов водорода $N(H)$ и содержание химических элементов Z/H , а также оптическая (или геометрическая) толщина волокон $\tau_0(A)$.

Для определения содержания химических элементов в волокнах мы использовали методику, описанную и примененную нами к планетарным туманностям [19]. Она основана на сравнении наблюдаемых и вычисленных (для различных фотоионизационных моделей свечения волокон) зависимостей между относительными обилиями ионов двух химических элементов, атомы одного из которых находятся в двух смежных стадиях ионизации. Рассматривались зависимости между следующими парами отношений ионов: He^{++}/H^+ и He^+/H^+ ; O^{++}/H^+ и O^+/H^+ ; O^+/H^+ и O^0/H^+ ; O^{++}/He^+ и O^+/He^+ ; O^{++}/Ne^{++} и O^+/Ne^{++} ; O^{++}/N^+ и O^+/N^+ ; O^{++}/S^+ и O^+/S^+ , обилие которых уверенно можно определить в волокнах.

Для построения теоретических зависимостей между перечисленными выше отношениями ионов был рассчитан ряд фотоионизационных моделей волокон, различающихся значениями параметров F_0 , α и $N(H)$ (плотность атомов водорода $N(H)$ считалась постоянной по толщине волокна). Расчеты проводились при фиксированном содержании химических элементов, близком к «среднему» содержанию в планетарных туманностях, а также при увеличенном в 2 и 4 раза и уменьшенном во столько же раз. Большинство расчетов проведено для случая $\tau_0(H^0) \approx 10$. С целью изучения влияния оптической толщины волокон на вычисленные отношения ионов несколько моделей рассчитано для различных значений $\tau_0(H^0)$, в том числе для $\tau_0(H^0) > 10$.

Найденные зависимости между указанными выше отношениями ионов при фиксированном химическом составе показаны на рис. 1—6 кривыми линиями для трех значений спектрального индекса λ .

Изменение параметров F_0 , $N(H)$ и $\tau_0(H^0)$ (т. е. изменение ионизации в волокне) при постоянном химическом составе приводит к смещению точки на каждом из рисунков 1—6 вдоль кривой. Увеличение или же уменьшение относительного содержания химических элементов приводит к поступательному перемещению кривых под углом 45° относительно координатных осей. Линейная зависимость отношений ионов от химического состава позволила нам установить шкалы на этих рисунках для определения относительного содержания химических элементов. Таким образом, рис. 1—6 являются удобными номограммами, позволяющими с достаточной точностью определить химический состав волокон. В отличие от эмпирических соотношений, которыми пользуется большинство исследователей (они приведены, например, в [20]), здесь учтено возможное при низ-

ких ионизациях присутствие в волокнах нейтральных атомов H^0 и He^0 . Важным преимуществом метода является возможность определения содержания того или иного химического элемента по одной наблюдаемой линии, например, $[Ne III]$, $[N II]$ или $[S II]$.

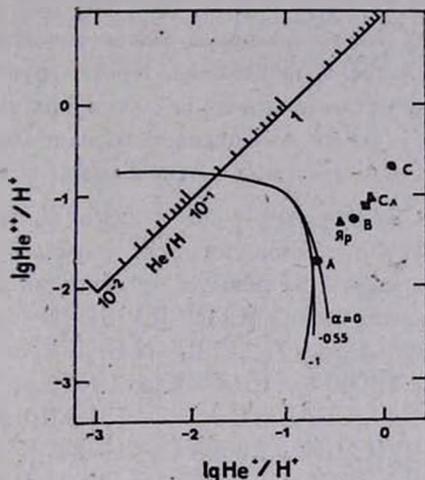


Рис. 1. Ионизационные кривые гелия по отношению к водороду:

$$He^{++}/H^+ = f(He^+/H^+) \text{ при } He/H = 0.19.$$

Неуверенность в определении химического состава волокон этим способом может вносить неопределенность оптической толщины волокон, действительная величина которой для них неизвестна. Расчеты показали, что при $\tau_0(H^0) \geq 100$ ошибка в определении относительного содержания химических элементов может достигать фактора $\sim 2-3$.

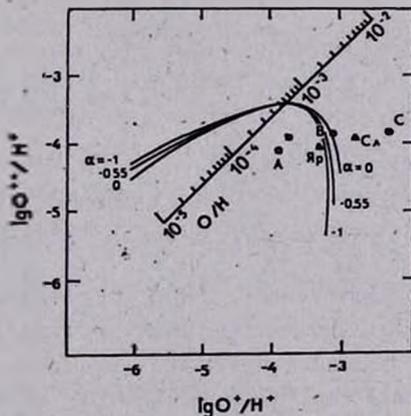


Рис. 2. Ионизационные кривые кислорода по отношению к водороду:

$$O^{++}/H^+ = f(O^+/H^+) \text{ при } O/H = 5.9 \cdot 10^{-4}.$$

Нами использовались средние спектры трех групп волокон А, В и С (статья 1, [21]). Группирование и осреднение спектров предпринято нами в связи с тем, что наблюдаемые спектры отдельных волокон не являются полными: из-за переналожения многочисленных компонентов интенсивности многих линий в спектрах не определены. Поэтому средние спектры являются более полными и в то же время они достаточно хорошо отражают диапазон разнообразия спектров волокон. Кроме групп А, В и С химический состав определялся также отдельно для ярких и слабых волокон по их средним спектрам, а также для отдельного наиболее яркого волокна.

Для определения наблюдаемых отношений ионных концентраций Z'/N^+ нужно знать электронную плотность N_e и температуру T_e в каждой из групп волокон. Значения этих параметров были получены методом пересечения кривых равных отношений интенсивностей небулярных и авроральных линий [O II], [O III], [N II] и [S II], зависящих от N_e и T_e . В результате, T_e [O II, N II, S II] = 11 000 К, 9500 К и 8000 К, а T_e [O III] = 11 000 К, 15 000 К и 19 000 К для групп волокон А, В и С соответственно. Аналогично, T_e [O II, N II, S II] = 9500 К, 9000 К и 9000 К, а T_e [O III] = 14 500 К, 16 000 К и 13 500 К соответственно для ярких волокон, слабых волокон и яркого волокна. Для других спектральных линий во всех случаях предполагалось, что T_e [Ne III, He II] = T_e [O III], T_e [He I, S III] = 11 000 К и T_e [O I, N I] = 8000 К. Значения N_e определяются менее уверенно, однако для каждой из групп волокон они были меньше $(2 \div 3) \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$. При таких значениях N_e ее неопределенность практически не изменит величины ионных концентраций, поэтому в вычислениях мы приняли $N_e = 10^3 \text{ см}^{-3}$. Найденные нами значения N_e и T_e хорошо согласуются с соответствующими данными, полученными другими авторами [7, 8, 22, 23].

Наблюдаемые концентрации ионов Z'/N^+ , используемые для определения химического состава волокон, приведены в табл. 3. Отметим, что величины ионных концентраций, найденные по небулярным, авроральным или трансавроральным линиям, хорошо согласуются между собой. При осреднении соответствующих величин Z'/N^+ больший вес придавался значениям, полученным по более интенсивным и, следовательно, более точным линиям.

Процедура определения относительного содержания элементов проста: на каждом из рисунков теоретическую кривую следует смещать по диагонали до совмещения ее с точкой, представляющей наблюдаемое отношение концентрации ионов соответствующих элементов. Тогда пересечение кривой с наклонной шкалой содержания дает нам искомое значение относительного содержания соответствующих элементов. Значение параметра α

во всех случаях принималось $\alpha = -0.55$ [24]. Его неопределенность в пределах $0 \div -1$ не сильно влияет на величину химического состава.

Таблица 3

ОТНОСИТЕЛЬНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ИОНОВ В ВОЛОКНАХ
КРАБОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ

Ионы	Принятое содержание ионов Z^I/H					
	A	B	C	Яркие	Слабые	Яркое волокно
He ⁺	0.18	0.53	1.23	0.37	0.70	0.55
He ⁺⁺	0.020	0.075	0.22	0.051	0.11	0.072
N ^o	—	—	—	1.64—4	1.46—5	1.81—5
N ⁺	8.46—5	1.03—4	1.37—4	1.08—4	1.16—4	7.83—5
O ^o	2.61—4	2.10—4	2.62—4	2.23—4	3.10—4	2.81—4
O ⁺	1.23—4	7.58—4	4.33—3	5.53—4	1.38—3	1.48—4
O ⁺⁺	8.52—5	1.44—4	1.58—4	9.23—5	1.39—4	1.38—4
Ne ⁺⁺	5.13—5	6.81—5	6.67—5	5.16—5	6.05—5	8.54—5
Ne ⁴⁺	6.94—6	1.88—5	3.90—5	1.05—5	1.99—5	1.60—5
S ⁺	1.92—5	3.65—5	1.10—4	3.50—5	5.00—5	3.17—5
S ⁺⁺	—	—	—	1.60—5	2.06—5	1.0—5

* 8.46—5=8.46.10⁻⁵.

Для определения относительного содержания кислорода O/N мы использовали зависимость между O⁺⁺/N⁺ и O⁺/N⁺ (рис. 2). Значение O/N можно найти также и по зависимости между O⁺/N⁺ и O^o/N⁺, однако оно отличается от предыдущего почти в два раза. Принимая во внимание трудности с объяснением наблюдаемой интенсивности линии нейтрального кислорода $\lambda 6300 + 63$ [O I], мы отдаем предпочтение содержанию O/N, найденному по линиям $\lambda 3727 + 29$ [O II] и $\lambda 4959 + 5007$ [O III].

Содержание кислорода мы определяли также и по отношению к гелию, используя зависимость между O⁺⁺/He⁺ и O⁺/He⁺ (рис. 3); содержание гелия He/N находилось по зависимости между He⁺⁺/N⁺ и He⁺/N⁺ (рис. 1). Взаимное согласие между независимо найденными величинами He/N, O/He и O/N свидетельствует о том, что содержания He/N и O/N определены уверенно. Это дает основание считать, что содержания других элементов, таких, как Ne, N и S, каждое из которых находится по отношению к кислороду или гелию (исходя из одной наблюдаемой линии), отражают действительный состав волокон-

Принятое содержание химических элементов в волокнах А, В и С приведено в табл. 4. Для сравнения, в этой таблице приводится найденный таким же методом химический состав ярких волокон, слабых волокон и наиболее яркого волокна. В конце приведено содержание химических элемен-

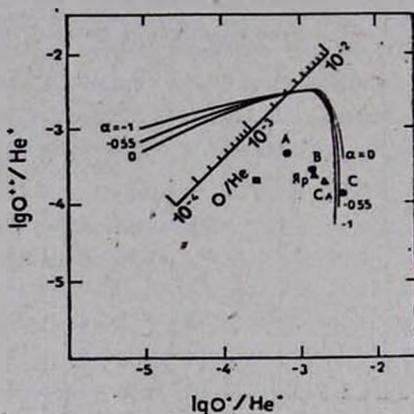


Рис. 3. Ионизационные кривые кислорода по отношению к гелию:

$$O^{++}/He^{+} = f(O^{+}/He^{+}) \text{ при } O/He = 3.1 \cdot 10^{-3}.$$

Таблица 4

СОДЕРЖАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ВОЛОКНАХ
КРАБОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ

Хим. элемент	А	В	С	Яркие	Слабые	Яркое волокно	План. туманн.
He/H	0.20	0.51	1.4	0.37	0.80	0.68	0.12
O/He	9.0—4*	16.0—4	35.0—4	13.0—4	17.5—4	4.0—4	—
O/H	1.8—4	7.6—4	42.0—4	4.8—4	14.0—4	2.7—4	3.6—4
O/N	1.5	7.0	38.0	3.2	11.7	0.70	—
N/H	1.2—4	1.1—4	1.3—4	1.5—4	1.2—4	3.8—4	1.1—4
O/Ne	2.3	3.0	4.0	2.8	2.7	1.6	—
Ne/H	0.78—4	2.5—4	10.0—4	1.7—4	5.2—4	1.7—4	0.76—4
O/S	8.0	27.0	60.0	16.0	25.0	6.0	—
S/H	0.22—4	0.28—4	0.67—4	0.30—4	0.56—4	0.45—4	0.23—4

* 9.0—4 = 9.0 · 10⁻⁴.

тов в планетарных туманностях, полученное Г. С. Хромовым (частное сообщение) в результате осреднения имеющихся в литературе соответствующих значений Z/H для большого числа объектов. Из табл. 4 видно, что относительное содержание всех рассматриваемых химических элемен-

тов сильно меняется при переходе от группы волокон А к группе С. Исключения составляют отношения N/H и, возможно, S/H , которые остаются постоянными. Химический состав волокон группы А при этом очень близок к химическому составу планетарных туманностей; наибольшие разли-

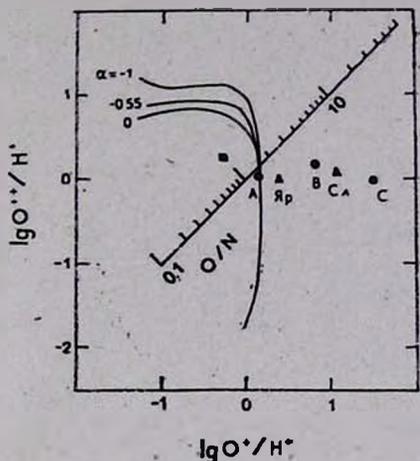


Рис. 4. Ионизационные кривые кислорода по отношению к азоту:

$$O^{++}/N^+ = f(O^+/N^+) \text{ при } O/N=1.6.$$

чия имеются лишь в содержаниях He/H и O/H . В волокнах группы В наблюдается избыток He/H , O/He , O/H , O/N , Ne/H и O/S , который усиливается в волокнах группы С. Из табл. 4 видно также, что содержание химических элементов в ярких и слабых волокнах не так сильно отличается, как в волокнах групп А и С. Химический состав газа в ярком волокне близок к содержанию химических элементов, найденному в работе [10], однако имеется различие в содержании He/H и O/H .

4. *Обсуждение.* Вывод о возможной дисперсии химического состава в волокнах Крабовидной туманности был сделан в 1973 г. [4] на основании анализа спектров отдельных конденсаций, опубликованных Волчером [1]. Вывод основывался на следующих предположениях: 1) в волокнах имеет место ионизационно-рекомбинационное равновесие; 2) свечение газа в них возбуждается синхротронным L_c -излучением «аморфной массы»; 3) волокна прозрачны для $H\beta$ -квантов; 4) электронная температура газа в волокнах находится в равновесии с ионизирующим излучением. Эти предположения неоднократно обсуждались [1, 4, 6, 25] и их достоверность не вызывает сомнений. Следует отметить, что отсутствие ионизационного равновесия в волокнах приведет к тем же зависимостям между отношениями различных ионов, которые на рис. 1—6 представлены соответствующими.

равновесными кривыми. Ударные процессы, судя по наблюдаемому среднему бальмеровскому декременту (табл. 2 статьи I), также не являются существенными.

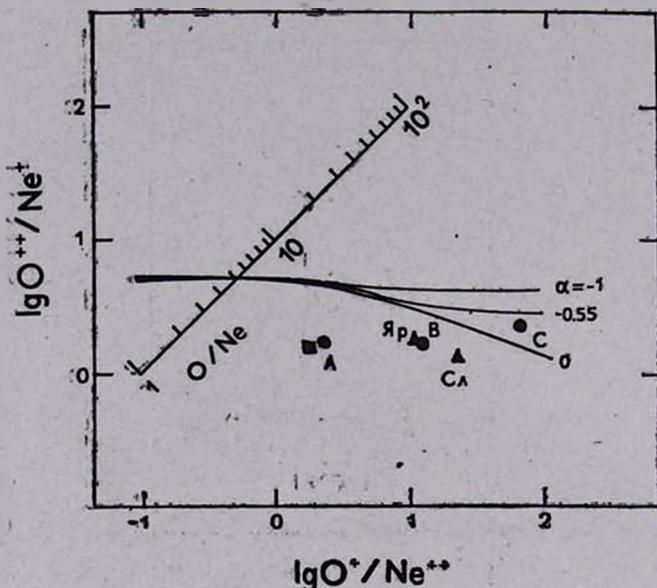


Рис. 5. Ионизационные кривые кислорода по отношению к неону:

$$O^{++}/Ne^{++} = f(O^{+}/Ne^{++}) \text{ при } O/Ne = 5.0.$$

Однако вопрос об электронной температуре в волокнах требует обсуждения, поскольку наблюдаемое количество ионов, светящихся в запрещенных линиях, сильно зависит от принятого значения T_e .

Из табл. 3 видно, что основной вклад в содержание O/H в волокнах группы В и С дают ионы O^+ . Их содержание определяется интенсивностью линий $\lambda 3726 + 29 [O II]/H\beta$ и величиной T_e . Чем выше T_e , тем меньше количество ионов O^+ требуется для излучения линии $[O II]$ заданной интенсивности. Поэтому достаточно предположить, что в каждой группе $T_e [O II] = T_e [O III]$ (значение последней растет от групп А, В к С и равно соответственно 11 000 К, 15 000 К и 19 000 К) и тогда относительное содержание кислорода для волокон всех трех групп будет одинаковым. Если же при этом электронную температуру для линий $[S II]$ и $[N II]$ (т. е. $T_e [S II, N II]$) оставить наблюдаемой для каждой из групп, то не только исчезнет дисперсия в содержании тяжелых элементов, но и само содержание будет близким к нормальному.

Однако в газовых туманностях области свечения [O II], [S II] и [N II] всегда совпадают, поэтому предположение $T_e[\text{O II}] = T_e[\text{O III}]$ означает, что $T_e[\text{S II}, \text{N II}]$ и $T_e[\text{O III}]$ также равны. Равенство всех температур в каждой из групп говорит о том, что все ионы светятся в одном и том же объеме, что возможно только в случае оптически тонких волокон, $\tau_{L_e} \ll 1$. Тогда химический состав волокон в группах А и С будет следующий: $\text{He}/\text{H} = (0.2 - 1.4)$; $\text{O}/\text{H} = 1.6 \cdot 10^{-4}$; $\text{N}/\text{H} = (1.0 - 0.2) \cdot 10^{-4}$; $\text{Ne}/\text{H} = (0.80 - 0.53) \cdot 10^{-4}$, $\text{S}/\text{H} = (0.20 - 0.04) \cdot 10^{-4}$.

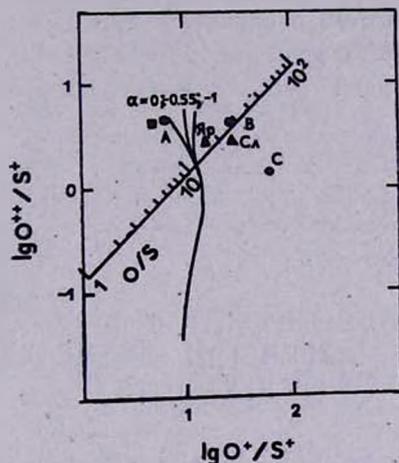


Рис. 6. Ионизационные кривые кислорода по отношению к сере:

$$\text{O}^{++}/\text{S}^+ = f(\text{O}^+/\text{S}^+) \text{ при } \text{O}/\text{S} = 12.$$

Дисперсия содержания тяжелых элементов по-прежнему остается, за исключением кислорода, однако если в первом варианте (табл. 4) содержание тяжелых элементов в группе С было больше, чем в группе А, то сейчас наоборот: содержание N, Ne и S в группе С меньше, чем в группе А. Совершенно очевидно, что в такой ситуации делать какие-либо определенные выводы о содержании тяжелых элементов в волокнах Крабовидной туманности — преждевременно.

5. *Заключение.* Как уже сказано во введении, наша главная цель состояла в том, чтобы выяснить, отличается ли содержание химических элементов в волокнах от нормального и существует ли дисперсия химического состава в них. К сожалению, уверенно ответить на эти вопросы можно только в отношении гелия: его содержание в среднем по всем волокнам в несколько раз превосходит нормальное (по числу атомов сравнимо с содержанием водорода), а диапазон значений He/H для разных волокон со-

ставляет от 0.2 для волокон группы А до 1.4 для волокон группы С. Любопытно, что волокна группы А характеризуются низкой интенсивностью запрещенных линий [O II], [O III] и [Ne III] по отношению к интенсивности $H\beta$, а волокна группы С — на порядок более высокой.

Сильная зависимость наблюдаемого количества ионов, излучающих запрещенные линии, от электронной аппаратуры и неуверенность в наблюдаемых значениях T_e , определяемых методом пересечения кривых или по линиям [O III], не дает возможности сделать столь уверенный вывод в отношении тяжелых элементов и в первую очередь в отношении кислорода.

Поэтому решение вопроса о содержании тяжелых элементов в волокнах Крабовидной туманности и окончательный вывод относительно однородности химического состава возможны только после того, как будет выяснен вопрос об электронной температуре в волокнах.

Львовский государственный
университет
Крымская астрофизическая
обсерватория

THE CHEMICAL COMPOSITION OF CRAB NEBULAE FILAMENTS. II. DISPERSION OF THE ABUNDANCE OF ELEMENTS

V. V. GOLOVATY, V. I. PRONIK

The results of the analysis of the chemical composition of filaments are given. As an observational material we used numerous spectra of individual filaments which have been obtained and published by many authors up to now. To determine the full ions of the element, we used the photoionization model of filaments. The method is based on the comparison of observed ion numbers of two adjacent states of ionization (for instance O^{++}/He^+ and O^+/He^+) with that calculated in the model with the same ionization and known chemical composition. For the purpose of operative determination, the abundances of elements of the nomograms are given. It has been shown that the mean abundance of helium in filament is several times higher than normal and the interval of He/H values is from 0.2 to 1.4. A considerable dispersion of abundances and their excess over the normal composition have been obtained for heavy elements. However, the strong dependence of observed number of atoms on the electron temperature and high uncertainty of the observed value of T_e made the abundance of heavy elements indefinite.

ЛИТЕРАТУРА

1. *L. Woltjer*, *Bull. Astron. Inst. Netherl.*, 14, No. 483, 39, 1958.
2. *K. Davidson, W. Tucker*, *Astrophys. J.*, 161, 437, 1970.
3. *K. Davidson*, *Astrophys. J.*, 183, 223, 1973.
4. *В. В. Головатый, В. И. Проник*, *Астрон. ж.*, 50, 1147, 1973.
5. *M. Contini, B. Kozlovsky, G. Shaviv*, *Astron. and Astrophys.*, 59, 387, 1977.
6. *M. Contini, B. Kozlovsky, G. Shaviv*, *Astron. and Astrophys.*, 68, 443, 1978.
7. *K. Davidson*, *Astrophys. J.*, 220, 177, 1978.
8. *J. Miller*, *Astrophys. J.*, 220, 490, 1978.
9. *K. Davidson*, *Astrophys. J.*, 228, 179, 1979.
10. *D. Pequignot, M. Dennefeld*, *Astron. and Astrophys.*, 120, 249, 1983.
11. *В. В. Головатый, В. И. Проник, О. С. Яцук*, *Циркуляр Астрон. обсерв. Львов. ун-та*, 51, 3, 1976.
12. *R. Fesen, R. Kirshner*, *Astrophys. J.*, 258, 1, 1982.
13. *K. Davidson, T. Gull, S. Maran, T. Stecher, R. Fesen, R. Parise, C. Harvell, M. Kafatos, V. Trimble*, *Astrophys. J.*, 253, 696, 1982.
14. *S. Butler, T. Heil, A. Dalgarno*, *Astrophys. J.*, 241, 442, 1980.
15. *В. В. Головатый, Б. С. Новосядлый*, *Вопросы астрофизики, Вестн. Львов. ун-та, сер. астрон.*, 57, 22, 1983.
16. *M. Penston*, *Astrophys. J.*, 162, 771, 1970.
17. *A. Dalgarno, R. McCray*, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.*, 10, 375, 1972.
18. *M. Shull, van Stenberg*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 48, No. 1, 95, 1982.
19. *В. В. Головатый, В. И. Проник, О. С. Яцук*, *Изв. Крым. обсерв.*, 59, 164, 1979.
20. *M. Perinotto*, *Diffuse Matter in Galaxies, Cargese*, 1983, p. 205.
21. *В. В. Головатый, В. И. Проник*, *Астрофизика*, 25, 57, 1986.
22. *K. Davidson, Humphreys*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, 88, No. 523, 312, 1976.
23. *D. Osterbrock, J. Miller*, *Astrophys. J.*, 197, 535, 1975.
24. *В. В. Головатый, В. И. Проник*, *Изв. Крым. обсерв.*, 44, 33, 1971.
25. *В. В. Головатый, В. И. Проник*, *Циркуляр Астрон. обсерв. Львов. ун-та*, 50, 10, 1975.