

УДК 524.37—36

СОДЕРЖАНИЕ УГЛЕРОДА В ПЛАНЕТАРНЫХ ТУМАННОСТЯХ

А. Ф. ХОЛТЫГИН

Поступила 8 февраля 1983

Принята к печати 15 декабря 1983

Рассчитаны интенсивности рекомбинационных линий иона C III. По интенсивностям наблюдаемых линий ионов C II, C III, C IV определено содержание ионов C III, C IV, CV и полное содержание углерода в сорока шести планетарных туманностях.

1. В спектрах планетарных туманностей (ПТ) наблюдается большое число линий ионов C II, C III, C IV видимой области спектра. Эти линии, как правило, слабы и имеют, по-видимому, рекомбинационное происхождение. Интенсивности этих линий могут быть использованы для определения содержания соответственно ионов C III, C IV, CV и полного содержания углерода в планетарных туманностях. Преимущество, по сравнению с другими методами, использования для определения содержаний элементов в туманностях интенсивностей рекомбинационных линий состоит в том, что вследствие их слабой зависимости от физических условий они определяются в основном полным содержанием ионов рассматриваемого элемента в туманности.

Переход от интенсивностей к содержаниям элементов требует расчета соответствующих рекомбинационных спектров. Такие расчеты для иона C III проведены в работах [1—2], в которых также показано рекомбинационное происхождение наблюдаемых в ПТ линий C III. Рекомбинационный спектр C IV рассчитан в работе [3]. Интенсивности рекомбинационных линий ионов C II—C IV получены также Пенжелли, некоторые результаты этих расчетов цитируются Ситоном [4], однако в этих расчетах использовались недостаточно точные вероятности переходов, вычисленные методом Бейтса—Дамтаард.

В расчетах [1—2] использованы более точные вероятности, полученные в одноконфигурационном приближении [5].

Эти вероятности в дальнейшем были уточнены переходом от одноконфигурационного к многоконфигурационному приближению в работе [6]. В этой работе для расчета вероятностей переходов использован метод наложения конфигураций [7]. Нами были рассчитаны интенсивности реком-

бинационных линий С III с вероятностями, полученными в [6], в частности с учетом запрещенных в одноконфигурационном приближении двух-электронных переходов. Наблюдение в спектрах многих ПТ линий двух-электронного перехода С III $\lambda 4156$ ($2p3p^3D - 2s5f^3F^0$) [8] указывает на важность учета таких переходов. Результаты расчетов показали, что для уровней с главным квантовым числом $n = 5, 6$ существенны переходы с высоковозбужденных уровней $n \geq 7$. Для учета этих переходов использовалась асимптотика скоростей фоторекомбинации $C_{nl}(T_e) = C_0(T_e)/n^2$, где параметры $C_0(T_e)$ и n^2 определялись по рассчитанным скоростям фоторекомбинации [9] на термы с $n \leq 6$. Некоторые результаты расчетов интенсивностей рекомбинационных линий даны в табл. 1. Сравнение с наблюдаемыми интенсивностями [8] показывает справедливость предположения о прозрачности ПТ для излучения в линиях С III (модель А по Мензелу), поэтому приведены интенсивности только в этой модели. Согласно

Таблица 1

ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛИНИЙ РЕКОМБИНАЦИОННОГО СПЕКТРА С III — I_R И НАБЛЮДАЕМЫЕ В СПЕКТРАХ ПТ — I_N ($\tau^{\text{eff}}(\lambda 4650) = 2.1 \cdot 10^{-13} \text{ см}^3/\text{с}$ И $1.85 \cdot 10^{-13} \text{ см}^3/\text{с}$ ПРИ $T_e = 10000 \text{ К}$ И 20000 К СООТВЕТСТВЕННО)

λ (А)	I_R		I_N			
	10 000 К	20 000 К	NGC 2440	NGC 6572	NGC 7027	NGC 7662
3609	9	8	11	—	—	—
3884	26	22	—	37	—	—
4056	11	9	—	37	—	—
4070	85	67	—	156	75	70
4156	17	15	5	—	18	10
4187	33	25	29	31	41	41
4516	12	12	19	—	3	—
4650	100	100	100	100	100	100
9713	0.2	0.2	—	—	—	—

наблюдаемых и рассчитанных интенсивностей с учетом существующей в настоящее время значительной неопределенности в определении интенсивностей слабых линий в спектрах ПТ [10] достаточно хорошее. Полностью результаты расчетов рекомбинационного спектра С III мы предполагаем опубликовать отдельно.

2. Содержание элементов по интенсивностям рекомбинационных линий — I_k удобнее всего находить через эффективные коэффициенты

рекомбинации (ЭКР) — α_{ki}^{eff} , определенные таким образом [11], что энергия, излучаемая единичным объемом в линии $k-i$ за 1 с, равна $h\nu_{ik} \alpha_{ki}^{\text{eff}} n_e n^+$, где $h\nu_{ik}$ — энергия перехода, n_e — электронная концентрация, n^+ — концентрация ионов рассматриваемого элемента. Перейдя от частот к длинам волн в A и отнеся содержание ионов элемента A — N_A к содержанию ионизованного водорода N_H^+ , получим:

$$N_A^+/N_H^+ = \frac{\lambda_{ik}^A \alpha_{ki}^{\text{eff}}(H\beta)}{4861 \alpha_{ki}^{\text{eff}}(A)} \frac{I_{ik}^A}{I(H\beta)}, \quad (1)$$

где индекс «A» относится к рассматриваемому элементу. ЭКР для $H\beta$ рассчитаны Брокхерстом [12]. В силу слабой зависимости ЭКР от T_e их отношение можно рассматривать при одной, характерной для ПТ температуре, вносимая при этом ошибка (не более 20%) существенно меньше неточностей в определении интенсивностей слабых рекомбинационных линий. Используя найденные нами ЭКР для наиболее сильных в видимой области спектра линий C III: λ 4070 ($4f^3F^0 - 5g^3G$), λ 4187 ($4f^1F^0 - 5g^1G$), λ 4650 ($3s^3S - 3p^3P^0$) и аппроксимируя степенным законом их зависимость от T_e , найдем:

$$C\text{ IV}/H^+ = 0.122 (T_e/10^4)^{0.04} I(4070)/I(H\beta), \quad (2)$$

$$C\text{ IV}/H^+ = 0.318 (T_e/10^4)^{0.04} I(4187)/I(H\beta), \quad (3)$$

$$C\text{ IV}/H^+ = 0.104 (T_e/10^4)^{-0.32} I(4650)/I(H\beta). \quad (4)$$

Отношение содержаний ионов C^{++} и H^+ для краткости обозначено C^{++}/H^+ .

Из линий иона C II, наблюдаемых в спектрах ПТ, линия λ 4267 ($3d^2D - 4f^2F^0$), наиболее интенсивная линия этого иона в видимой области спектра, имеет, несомненно, рекомбинационное происхождение. Используя вероятности переходов иона C II, полученные в [13], а также рассчитанные методом Хартри—Фока по программе [14], мы определили ЭКР для этой линии. Полученные значения ЭКР практически не отличаются при $T_e = 10\,000 - 20\,000$ К от данных Пенжелли [4]. Согласно расчетам последней работы имеем:

$$C\text{ III}/H^+ = 0.106 (T_e/10^4)^{-0.19} I(4267)/I(H\beta). \quad (5)$$

ЭКР для линии C IV λ 4658, представляющей совокупность линий переходов ($5f^2F^0 - 6g^2G$), ($5g^2G - 6f^2F^0$) и ($5g^2G - 6h^2H^0$), можно найти по рекомбинационным населенностям термов, приведенным в [3]. Подставляя численные значения, найдем:

$$C\text{ V}/H^+ = 0.034 (T_e/10^4)^{0.04} I(4658)/I(H\beta). \quad (6)$$

Для линий С III, как указано в [15], при высоких для ПТ $T_e \geq 15\,000$ К может быть существенна роль диэлектронной рекомбинации. Предположим для простоты, что отношение скоростей диэлектронной и фоторекомбинаций на уровень i равно отношению полных скоростей рекомбинации, тогда интенсивность линии $k \rightarrow i$ с учетом диэлектронной рекомбинации

$$I_{ki}^* = I_{ki}(1 + \alpha^{di}/\alpha^{rad}), \quad (7)$$

что, очевидно, не меняет относительных интенсивностей, приведенных в табл. 1, но приводит к увеличению ЭКР на множитель $1 + \alpha^{di}/\alpha^{rad}$. Используя для полных скоростей диэлектронной рекомбинации — α^{di} сводку [16], а для полных скоростей фоторекомбинации — α^{rad} данные [9], получим для С III:

$$\alpha^{di}/\alpha^{rad} = 916 (T_e/10^4)^{-0.98} e^{-91000/T_e}. \quad (8)$$

При определении содержаний для учета диэлектронной рекомбинации следует умножить правую часть соотношений (2)—(4) на $(1 + \alpha^{di}/\alpha^{rad})^{-1}$.

3. Интенсивность линий С II—С IV составляет не более 0.001—0.02 от интенсивности $H\beta$ и точность их определения, как упоминалось выше, мала, поэтому важно выбрать наиболее надежные и однородные данные по интенсивностям. Используем недавнюю работу [10], по-видимому, наиболее точную в настоящее время, а для NGC 2440 — данные [17], и те из интенсивностей каталога Калера [8], которые получены так же, как в [10], калибровкой фотографических интенсивностей слабых линий по точным фотоэлектрическим.

Остановимся на выборе T_e в формуле (8). Согласно ионизационной модели для NGC 7027 [18] температура в зоне О III всего на 700 К ниже, чем в зоне С IV, где образуются линии С III, и так как по линиям О III T_e определяется наиболее надежно, будем использовать значения T_e , определенные в работе [10] по этим линиям. Эти же значения используем в формулах (2)—(6).

Полное содержание углерода в ПТ будем находить по формуле

$$C/H = [C\ III + C\ IV + C\ V]/H^+. \quad (9)$$

Как показывают расчеты ионизационных моделей ПТ, например, [17, 18] для ПТ высокого и промежуточного возбуждения ($E_w \geq 5$, где E_w — класс возбуждения ПТ, определенный согласно [19]), это соотношение справедливо с точностью не менее 1%. Для туманностей низкого возбуждения с $E_w \leq 4$ значительная часть углерода содержится в виде

нейтрального — С I и однократно ионизованного углерода — С II, и формула (9) дает только нижнюю границу полного содержания С. В табл. 2 даны полученные относительные содержания ионов С III—С V и полные содержания С согласно (9). Классы возбуждения туманностей взяты из работы [10] и справочника [20]. Усредненные по классам возбуждения — E_w отношения С III/С, С IV/С, С V/С регулярно зависят от E_w . Указанная зависимость приведена на рис. 1. Отношение С V/С хорошо аппроксимируется линейной зависимостью: $C V/C = 0.031 (E_w - 5) + 0.01$, которая использовалась при определении С V/H⁺ для ПТ, в спектре которых не наблюдалась линия С IV λ 4658.

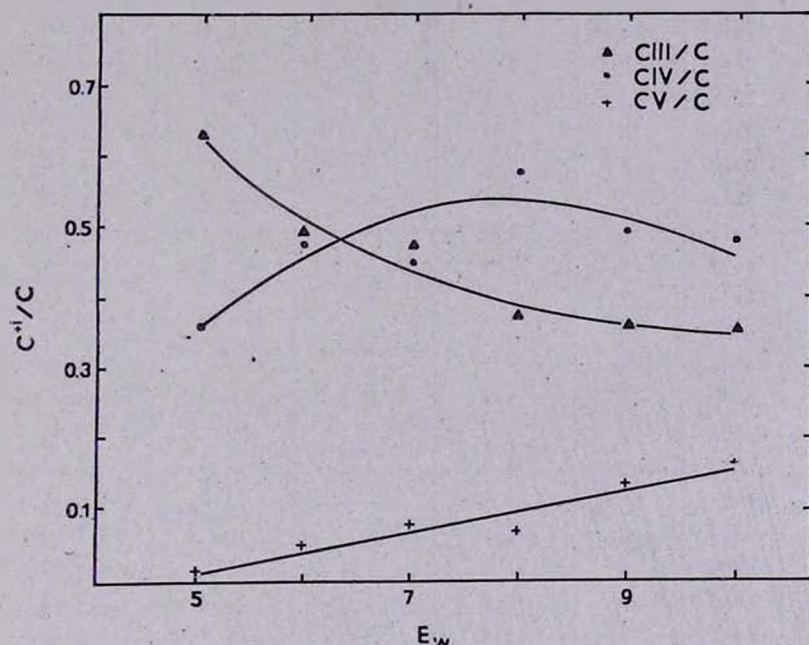


Рис. 1. Зависимость отношений содержаний ионов С III—С V к полному содержанию углерода от класса возбуждения туманности. Сплошными линиями показаны соответствующие сглаженные зависимости.

Среднее содержание углерода в рассмотренных нами ПТ высокого и промежуточного возбуждения $\overline{C/H} = 1.4 \cdot 10^{-3}$ более чем в 3 раза больше этого отношения для Солнца — $4.2 \cdot 10^{-4}$ [21], что подтверждает высказанное, в частности, в [22] предположение, что относительное содержание С в ПТ высокого возбуждения заметно больше солнечного.

Сравним найденные содержания углерода с данными других авторов [15, 17, 23—25] в табл. 3. При общем согласии имеются существенные отличия от данных работы [15], что вероятнее всего объясняется тем, что в

Таблица 2

СОДЕРЖАНИЕ ИОНОВ CIII, CIV, CV И ПОЛНОЕ
СОДЕРЖАНИЕ УГЛЕРОДА В ПТ

ПТ (NGC)	E_w	$C\ III/H^+ \cdot 10^4$	$C\ IV/H^+ \cdot 10^4$	$C\ V/H^+ \cdot 10^4$	C/H
1	2	3	4	5	6
40	2	—	—	2.8	$\geq 2.8-4^*$
650	—	8.4	—	—	$\geq 8.4-4$
1535	7	11.3	20.6	1.0	3.3-3
2022	10	10.1	9.5	3.3	2.3-3
2371	9	4.3	—	2.7	1.6-3
2392	8	—	—	4.4	$\geq 4.4-4$
2440	9	4.1	3.4	1.7	9.2-4
3242	7	8.4	6.1	0.3	1.5-3
4361	10	—	—	7.2	$\geq 7.2-4$
6210	5	5.5	3.9	—	9.4-4
6543	5	8.8	8.6	0.5	1.8-3
6572	5	6.8	1.5	—	8.6-4
6629	4	10.0	—	—	$\geq 1.0-3$
6644	7	7.1	8.9	—	1.7-3
6720	6	10.4	—	—	$\geq 1.0-3$
6741	8	8.3	5.4	—	1.5-3
6790	6	3.3	9.2	—	1.3-3
6803	6	5.0	—	—	$\geq 5.0-4$
6818	9	4.7	4.2	1.2	1.0-3
6826	5	9.6	—	1.0	1.0-3
6833	4	4.1	—	—	$\geq 4.1-4$
6884	6	11.0	7.4	—	1.9-3
6886	8	4.7	11.2	1.2	1.7-3
6891	5	11.4	3.9	—	1.5-3
7009	6	11.7	5.8	0.2	1.8-3
7027	10	7.2	6.4	1.7	1.5-3
7662	8	6.6	6.9	1.4	1.5-3
IC 351	8	4.8	10.0	—	1.6-3
IC 418	3	7.5	1.5	—	9.0-4
IC 1747	6	7.2	11.1	—	1.9-3
IC 2003	8	4.7	5.4	2.2	1.2-3
IC 2165	9	14.3	11.3	1.7	1.7-3
IC 4776	6	—	2.8	—	$\geq 2.8-4$

* $2.8-4 = 2.8 \cdot 10^{-4}$

Таблица 2 (окончание)

1	2	3	4	5	6
IC 4846	5	—	2.8	—	>2.8—4
IC 4997	5	2.1	0.3	—	2.4—4
IC 5117	6	4.6	3.3	—	8.2—4
IC 5217	6	2.3	6.8	0.8	9.9—4
J 320	5	4.2	—	—	>4.2—4
J 900	7	3.4	0.9	1.7	6.0—4
H γ 12	—	4.3	—	—	>4.3—4
H α 1—2	10	2.9	0.9	1.7	5.5—4
H α 2—1	—	3.8	—	—	>3.8—4
K3 —62	—	—	—	4.7	>4.7—4
Me 1—1	6	6.2	11.8	—	1.9—3
CN 3—1	1	3.4	—	—	>3.4—4
MI 74	—	5.7	—	—	>5.7—4
среднее					1.4—3

ней содержание С определялось только по С III/С, что может привести к значительным ошибкам, так как содержание иона С III в полном содержании С в ПТ часто меньше половины (см. [17, 18] и рис. 1).

Таблица 3

СРАВНЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ СОДЕРЖАНИЙ С/Н
С ДАННЫМИ ДРУГИХ РАБОТ

Туманность Ссылка	IC	NGC				
	2165	2440	6818	7027	7662	H α 1—2
Наст. работа	1.7—3	9.2—4	1.0—3	1.5—3	1.5—3	5.5—4
[15]	1.3—3	—	—	2.5—3	6.3—3	—
[17]	—	4.0—3	—	—	—	—
[23]	1.7—3	—	1.9—3	—	2.3—3	—
[24]	—	—	—	1.3—3	—	—
[25]	—	3.8—4	4.5—4	—	8.6—4	1.2—4

В заключение остановимся на вопросе о соотношении содержаний углерода, определяемых по рекомбинационным линиям и по линиям УФ-области спектра, в частности по интеркомбинационным линиям С II λ 2326, С III λ 1909 и резонансной линии С IV λ 1548. Содержания, получаемые по УФ-линиям [17, 24, 25] (для детальных ссылок см. [26]), в большинстве случаев меньше, чем определяемые по рекомбинационным (в среднем

в 2 раза). Причиной таких различий, по нашему мнению, являются два обстоятельства: во-первых, неточности в определении T_e в области формирования УФ-линий (ошибка в T_e на 2000 К может привести к ошибке в содержаниях на порядок), во-вторых, то, что интенсивности рекомбинационных линий C II—C IV в спектрах ПТ могут быть переоценены. Этот вопрос предполагается исследовать более детально в последующих работах.

В заключение автор выражает благодарность А. А. Никитину и Т. Х. Феклистовой за полезное обсуждение работы.

Ленинградский государственный
университет

CARBON ABUNDANCES IN PLANETARY NEBULAE

A. F. KHOLTYGIN

The intensities of C III recombination lines are calculated. Using the intensities of observed lines of C II, C III, C IV ions the abundances of C III, C IV, C V ions and full carbon abundances for forty six planetary nebulae are found.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Никитич, А. А. Сапар, Т. Х. Феклистова, А. Ф. Холтыгин, Публ. Тартуской обс., 45, 106, 1977.
2. А. А. Никитин, А. А. Сапар, Т. Х. Феклистова, А. Ф. Холтыгин, Публ. Тартуской обс., 49, 40, 1982.
3. E. M. Leibowitz, Thesis, Cambridge, 1971.
4. M. J. Seaton, In "Planetary Nebulae. Observation and Theory", Symp. No. 76. IAU, Ithaca, New York, USA. Dordrecht- Boston, 131, 1978.
5. А. А. Никитин, А. Ф. Холтыгин, Т. Х. Феклистова, Публ. Тартуской обс., 45, 45, 1977.
6. А. Ф. Холтыгин, Астрофизика, 16, 115, 1980.
7. А. А. Никитин, Э. Б. Рудзикас, Основы теории спектров атомов и ионов, Наука, М., 1983.
8. J. B. Kaler, Ap. J., Suppl. ser., 31, 517, 1976.
9. А. Ф. Холтыгин, Т. Х. Феклистова, Вестн. ЛГУ, № 19, 64, 1983.
10. L. H. Aller, S. J. Czyzak, Astrophys. Space Sci., 62, 357, 1979.
11. M. J. Seaton, Rep. Progr. Phys., 23, 313, 1960.
12. M. Brocklehurst, M. N., 148, 417, 1970.
13. H. Nussbaumer, P. J. Storey, Astron. Astrophys 96, 91, 1981.
14. П. О. Богданович, Программа численного решения уравнений Хартри—Фока, Сборник программ по математическому обеспечению атомных расчетов, вып. 2, Вильнюс, 1978.
15. S. Torres-Peimbert, M. Peimbert, Rev. Mex. Astron. Astrophys., 2, 181, 1974.

16. *S. M. V. Aldrovandi, D. Pequignot*, *Astron. Astrophys.*, 25, 137, 1973.
17. *G. A. Shields, L. H. Aller, C. D. Keyes, S. J. Czyzak*, *Ap. J.*, 248, 569, 1981.
18. *G. A. Shields*, *Ap. J.*, 219, 565, 1978.
19. *L. H. Aller*, *Caseous Nebulae*, Chapman and Hall Ltd., London, 1956.
20. *К. Ленз*, *Астрофизические формулы, часть 1*, Мир, М., 1978.
21. *J. E. Ross, L. H. Aller*, *Science*, 191, 1223, 1976.
22. *А. А. Никитин, А. А. Сапар, Т. Х. Феклистова, А. Ф. Холтыгин*, *Астрон. ж.*, 58, 101, 1981.
23. *L. H. Aller*, in "Planetary Nebulae. Observation and Theory", Symp. No. 76, IAU, Ithaca, New York, USA, Dordrecht-Boston, 225, 1978.
24. *M. Pertotto, N. Panagia, P. Benvenuti*, *Astron. Astrophys.*, 85, 332, 1980.
25. *L. H. Aller, S. J. Czyzak*, *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 78, 5266, 1981.
26. *J. B. Kaler*, *Ap. J.*, 249, 201, 1981.