

Физические условия и обилия некоторых ионов в диффузных туманностях

И. Янкулова, Г. Петров, В. Голев

1. Диффузные туманности — это огромные газопылевые комплексы, связанные с молодыми горячими звездами. Они являются представителями первого типа населения Галактики. Ввиду важности вопроса возникновения и эволюции звезд представляет очевидный интерес их детальное изучение. Наиболее продуктивным методом с точки зрения получаемой информации является спектрофотометрия. Спектры эмиссионных диффузных туманностей показывают разрешенные линии водорода и гелия, иногда линии некоторых других элементов, и запрещенные линии азота, кислорода, серы, неона, аргона и их ионов, наложенные на фоне слабого непрерывного спектра. Обычно самая интенсивная линия в спектрах диффузных туманностей является дублет $\lambda\lambda$ 3726, 3729 [O II]. По сравнению с планетарными туманностями, для которых самые сильные линии являются $\lambda\lambda$ 4959, 5007 [O III], диффузные туманности показывают более низкое возбуждение. Кроме того, это объекты низкой поверхностной яркости, что сильно затрудняет их изучение. К настоящему времени накопились спектрофотометрические данные примерно для 100 объектов нашей и ближайших галактик.

2. Относительные интенсивности запрещенных линий позволяют определить физические условия — электронные температуры T_e , электронные плотности N_e и обилия ионов в областях, излучающих в этих линиях.

Отношение интенсивностей запрещенных линий одного и того же иона является функцией, зависящей от двух параметров — N_e и T_e . Учитывая возможную стратификацию излучения, для однозначного определения N_e и T_e в зонах [O II], где светятся ионы O^+ , N^+ , S^+ , а возможно и O^0 , N^0 , удобнее всего использовать отношения

$$(1) \quad [N II]: \frac{I(\lambda 6548) + I(\lambda 6584)}{I(\lambda 5755)} = \frac{6,92 \text{ dex}(10860/T_e)}{1 + 0,31 X} \quad (\text{Ситон, 1975})$$

$$(2) \quad [S II]: \frac{I(\lambda 6717) + I(\lambda 6731)}{I(\lambda 4068) + I(\lambda 4076)} = 0,164 [3,8 + X (1 + 1,32 e^{-\frac{13820}{T_e}})] e^{-\frac{13820}{T_e}}$$

(Аллер и Чизак, 1968), где $X = 10^{-2} N_e T_e^{-1/2}$ и $\text{dex } y = 10^y$. Уравнения (1) и (2) приведены в графическом виде Боярчуком и др. (1969) для большого числа значений N_e и T_e .

Отношения интенсивностей запрещенных линий

$$(3) \quad [S II]: \frac{I(\lambda 6717)}{I(\lambda 6731)} = 1,5 \frac{1+0,51 X}{1+1,98 X} \quad (\text{В и д м а н, 1968})$$

и

$$(4) \quad [O II]: \frac{I(\lambda 3726)}{I(\lambda 3729)} = 1,5 \frac{1+0,33\varepsilon+0,23 y(1+0,75\varepsilon+0,14\varepsilon^2)}{1+0,40\varepsilon+0,099y(1+0,84\varepsilon+0,17\varepsilon^2)} \quad (\text{С и т о н и О с т е р б р о к, 1957}),$$

где $\varepsilon = \exp(-19600/T_e)$ и $y = N_e T_e^{-1/2}$, являются функциями, слабо зависящими от температуры, и тем самым их можно использовать для определения электронных плотностей. О с т е р б р о к (1974) приводит эти зависимости в графическом виде.

Как уже отмечалось, свечение различных запрещенных линий производится в различных областях туманности. Ионы O^{++} , Ne^{++} , Ar^{++} и др. со сравнительно высокими потенциалами ионизации светятся в более плотных и горячих областях газового облака — т. н. зоне [O III] (Я н к у л о в а, 1974). Для определения N_e и T_e в этой зоне С и т о н (1975) приводит зависимость

$$(5) \quad [O III]: \frac{I(\lambda 4959) + I(\lambda 5007)}{I(\lambda 4363)} = \frac{7,2 \text{ dex}(14300/T_e)}{1+0,063 X}$$

и сходную зависимость для [Ne III].

Уравнение (5) при $N_e \leq 10^4 \text{ см}^{-3}$ слабо зависит от N_e и поэтому может быть использовано для определения T_e .

В каталоге К а л е р а (1976) собраны относительные интенсивности эмиссионных линий приблизительно 600 туманностей. Среди них 117 являются диффузными туманностями нашей и ближайших галактик. Нами выбрано из этого списка 95 объектов, показывающих достаточное количество линий. Так как для большинства объектов приводятся данные различных авторов, мы старались использовать те из них, которые относятся к центральным областям туманностей. Поскольку данные очень неоднородны и неполны, мы вынуждены определять некоторые средние значения температуры и давления. Применяя уравнение (3) и принимая $\lg T_e = 4,00$ по 43 объектам, получаем $\langle \lg N_e \rangle = 2,90$ $\sigma(\lg N_e) = 0,39$. Из них для 12 объектов, для которых дублет $\lambda 3727$ [OII] разрешен, по уравнению (4) и для $\lg T_e = 4,00$ получаем $\langle \lg N_e \rangle = 2,86$ $\sigma(\lg N_e) = 0,27$. Хорошее совпадение этих результатов указывает на то, что ионы O^+ и S^+ в действительности светятся в одной и той же зоне.

Совместное решение уравнений (1) и (2) возможно только в четырех случаях, и поэтому нами не применялось.

У нас не было возможности определить однозначно N_e и T_e для зон [O III] в этих туманностях из-за отсутствия данных об интенсивностях линий [Ne III], но среднее отношение [O III] $I \lambda 4363$ ($I \lambda 4959 + I \lambda 5007$) $= 0,016$ указывает на то, что $\lg T_e \geq 4,00$ для $\lg N_e \cong 5,50$.

3. Определением обилия ионов и химического состава галактических и внегалактических диффузных туманностей занимались Д ю ф у р и Х а р л о у (1977), С м и т (1975), П е й м б е р т и С п и н р а д (1970), П е й м б е р т и Т о р е с-П е й м б е р т (1974, 1976, 1977) и др. Нами применялась методика, предложенная П е й м б е р т о м (1968) и П е й м б е р т о м и др. (1975). Рабочие формулы для $T_e = 10\,000 \text{ К}$ принимают следующий вид:

$$(6) \quad N^+/H^+ = 1,58 \times 10^{-5} I(\lambda 6584)/I(H_\beta),$$

$$(7) \quad S^+/H^+ = 4,38 \times 10^{-6} [I(\lambda 6717) + I(\lambda 6731)]/I(H_\beta),$$

(8) $O^+/H^+ = 3,86 \times 10^{-5} A I (\lambda 3727)/I (H\beta),$

(9) $He^+/H^+ = 0,743 I (\lambda 5876)/I (H\beta),$

где $A = 1,17$ для $X = 0,1$ и $A = 2,33$ для $X = 1,0$, $X = 10^{-2} N_e T_e^{-1/2}$.

В табл. 1 приведены логарифмы чисел ионов He^+ , N^+ , O^+ , S^+ для объектов, перечисленных в первом столбце в предположении, что $lg H = 12,00$ и $T_e = 10\ 000$ К.

Таблица 1

Объект	He ⁺	N ⁺	O ⁺	S ⁺	Объект	He	N ⁺	O ⁺	S ⁺
NGC 281		7.07	7.86	6.04	AN 2534		7.31		6.28
NGC 1499		7.16	7.79	6.33	G 17		7.67		6.63
NGC 1931		7.18			D 30	10.98	6.38	7.64	
NGC 2023		7.02			N 4	10.92	6.26	8.02	5.78
NGC 2024	10.64	6.99			N 11		6.12	7.77	5.85
NGC 2068		7.03			N 44	10.91	6.02	7.76	5.87
NGC 2175		7.02	9.46	6.88	N 55	10.94	6.22	7.86	5.79
NGC 2237	11.05	7.77	8.17	6.37	N 59	10.94	6.14	7.79	5.79
NGC 2264		7.19	8.11	6.28	N 79	10.91	6.53	8.24	6.02
NGC 2359		6.97			N 105	10.99	6.68	8.18	6.26
NGC 3576	10.85	7.02	8.06	6.20	N 159	10.95	6.42	8.06	6.03
NGC 6193		7.55		6.13	N 160	10.97	6.33	7.70	5.81
NGC 6357	10.87	7.67	7.52	5.95	N 214	10.86	6.33	8.11	6.01
NGC 6514		7.65			NS 66	10.91	5.73	7.43	5.63
NGC 6523	11.20	7.37	7.86	6.03	NS 83	10.94	6.15	7.88	6.13
NGC 6559		7.06			NGC 604		6.81	7.86	5.89
NGC 6611		7.37			CC 16		7.03		6.08
NGC 6618		7.69		6.11	CC 22		6.85		5.46
NGC 6888		7.62	8.98	6.90	CC 27		7.07		6.05
NGC 7000		7.51	8.18	6.94	CC 29		7.18		6.16
NGC 7635	11.37	7.41	7.65		CC 30		7.23		6.20
IC 405		7.16	8.43	6.25	CC 37		7.27		6.38
IC 432		7.09			CC 40		7.15		6.18
IC 434		7.67			CC 43		7.15		6.29
IC 1274		7.30			CC 47		7.23		6.27
IC 1470	11.44	7.04	8.18		CC 49		7.09		6.27
IC 3148		7.71		6.18	CC 55		6.99		5.88
IC 2177		7.14	8.33	6.47	CC 56		6.97		5.78
IC 4628		6.70			CC 58		6.99		5.93
E 1		7.99	7.77		CC 62		6.99		5.93
HH 1		7.21	7.74	6.82	CC 66		7.18		6.19
S 61		7.05	8.30		CC 69		7.22		6.39
S 71		7.69	7.99		CC 87		7.07		6.03
S 100		6.78	8.08		CC 89		7.19		6.16
S 148		7.33	8.31		CC 92		7.44		6.46
S 152		7.40	8.31		CC 93		7.22		6.21
S 168		7.20		6.43	CC 94		7.03		6.96
S 175		7.20		6.54	M 51		7.78	7.15	6.63
S 186		7.24		6.42	M 64		7.64		6.72
S 211		7.31		6.34	M 81		8.03	7.11	6.03
S 212		6.63	7.99		M 82	10.81	7.47	7.70	6.40
S 255		6.91	8.09		NGC 5455	10.82		7.93	6.36
S 257		7.35	7.97		NGC 5461	10.96	6.81	7.84	
S 264		6.98	7.97	6.34	NGC 5471	10.88			6.00
S 269		7.17	8.27		Hu 5		6.15	8.24	6.17
SH 160		7.14	7.99	6.88	Zw 18	10.83		7.11	5.75
AN 15		7.12		6.09	Zw 40	10.88		7.28	6.22
AN 1939		7.12		6.09					

Таблица 2

Объекты	$\langle \text{He}^+ \rangle$	σ	n	$\langle \text{N}^+ \rangle$	σ	n	$\langle \text{O}^+ \rangle$	σ	n	$\langle \text{S}^+ \rangle$	σ	n	*
ДТ в Гал.	11.06	0.29	7	7.26	0.29	50	8.12	0.39	27	6.37	0.28	26	1
ДТ в МО	10.94	0.04	12	6.25	0.24	13	7.88	0.23	13	5.91	0.18	12	1
ДТ в М 33				7.11	0.14	22				6.15	0.29	22	1
ДТ в др. гал.	10.86	0.06	6	7.31	0.70	6	7.54	0.44	9	6.25	0.31	9	1
СГ тип 1	11.05	0.19	36	6.27	0.44	25	6.63	0.52	31	5.51	0.44	23	1
РГШЛ	10.67	0.30	9	6.47	0.76	13	7.35	0.94	14	5.77	0.61	13	1
СГ 2+РГУЛ	10.95	0.23	28	7.54	0.26	28	8.03	0.32	26	6.70	0.29	28	2
NGC — гал.				7.63	0.26	10				6.72	0.33	8	3
Аки — гал.				7.38	0.20	8				6.81	0.23	6	3
Мрк — гал.				7.34	0.22	28				6.68	0.30	23	3
ПлТ в гал.	10.95	0.12	10	7.05	0.80	11	7.61	0.71	10	5.90	0.49	7	4
ПлТ внегал.	10.84	0.14	6	6.58	0.87	6	7.65	0.31	6	5.79	0.39	6	5
Орион	10.87	0.06	12	7.52	0.21	12	8.51	0.24	12	5.98	0.29	12	6

* 1 — настоящая работа; 2 — Петров (1978); 3 — Петров (1979); 4 — Пеймберт и Торес-Пеймберт (1971); 5 — Дюфоур и Киллен (1977); 6 — Пеймберт и Торес-Пеймберт (1977).

Для сравнения в табл. 2 приведены средние логарифмы чисел тех же ионов и их дисперсии по разным определениям для туманности в Орионе, планетарных туманностей (ПлТ), сейфертовских галактик (СГ) и радиогалактик с широкими линиями (РГШЛ) и с узкими линиями (РГУЛ).

4. Диффузные туманности нашей Галактики показывают некоторые особенности. Эти особенности, возможно, отражают тот факт, что они исследованы лучше, чем диффузные туманности в других галактиках.

а. Семнадцать из приведенных Калером объектов показывают отношение $I \lambda 4959 / I \lambda 5007 \approx 1$ и $16 - I \lambda 6548 / I \lambda 6584 \approx 1$. При этом в двух случаях оба эти отношения порядка единицы. В обычных условиях, когда светятся запрещенные линии, эти отношения определяются вероятностями переходов, и они равны $\sim 0,3$. С увеличением электронной плотности, она становится существенной деактивация верхнего уровня электронными ударами. Получается больцмановское распределение атомов по состояниям, и в результате объемный коэффициент излучения запрещенной линии 2—1 определяется выражением

$$(10) \quad \varepsilon_{21} = h\nu_{12} N_e N_1 q_{12} \text{ (эрг/см}^3\text{с)},$$

где h — постоянная Планка, ν_{12} — частота перехода, q_{12} — коэффициент активации, N_1 — населенность нижнего уровня. Эта формула справедлива при достаточно больших значениях электронной плотности, когда $N_e q_{21} \gg A_{21}$. Значение критической электронной плотности определяется равенством $N_e^{\text{кр}} q_{21} = A_{21}$, где A_{21} — вероятность перехода. Критическая электронная плотность при $T_e = 10^4 \text{ K}$ для небулярных линий дважды ионизованного кислорода равна $6,5 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$, а для небулярных линий ионизованного азота — $4,0 \times 10^4 \text{ см}^{-3}$. Сравнение этих значений N_e со средним значением $N_e \approx 10^3 \text{ см}^{-3}$ для зон [O II] показывает, что существуют довольно плотные туманности, в которых стратификация излучения, вероятно, сильнее и физические условия в них сильно отличаются от условий в типичной туманности.

б. Бербидж (1970) в своем обзоре по ядрам галактик, ссылаясь на более ранние работы, отмечает, что отношение $[\text{NII}]/\text{H}_\alpha$ меняется от около $1/3$ в спиральных рукавах до ≈ 1 в ядрах спиральных галактик. При этом упомянутое отношение равно или больше 1 во всех изученных ими

Таблица 3

Объекты	$\frac{[N II]}{H\alpha} \geq 1$	$\langle \frac{I(\lambda 6584)}{I H\alpha} \rangle$	σ	n	Объекты	$\frac{[N II]}{H\alpha} \geq 1$	$\langle \frac{I(\lambda 6584)}{I H\alpha} \rangle$	σ	n
NGC — гал.	50 %	1,06	0,71	10	СГ 2+РГУЛ	32 %	0,84	0,47	37
Анн — гал.	12,5	0,55	0,26	8	ДТ в гал.	21,5	0,45	0,39	49
Мрк — гал.	18	0,55	0,26	28	ДГ в МО	0	0,05	0,02	13
СГ тип 1	0	0,07	0,06	27	ДТ в М 33	0	0,29	0,10	27
СШЛ	0 %	0,04	0,04	12	ДТ в др. гал.	40 %	1,42	1,76	5

эллиптических галактиках, в 81% среди S O-галактик и в 55% среди S-галактик. Поскольку существует мнение, что ядерные области галактик по своим характеристикам идентичны с областями H II, то представляется целесообразным сравнить это отношение для диффузных туманностей и некоторых других объектов. В табл. 3 приведены средние отношения $I(\lambda 6584)/I H\alpha$ и их дисперсии, а также частоты встречаемости $I(\lambda 6584)/I H\alpha \geq 1$ для сейфертов, диффузных туманностей, радиогалактик, галактик, не являющихся сейфертовскими. Следует отметить, что имеющиеся в нашем распоряжении данные (Петров, 1979) не позволяют проведения детального морфологического сравнения, поскольку нет морфологической классификации для всех объектов.

Объекты, представленные в табл. 3, сгруппированы по степени активности ядерных областей. Сравнение приведенных результатов показывает, что условия в галактиках с сильной степенью активности ядер, таких, как сейфертовские галактики типа 1 и радиогалактики с широкими линиями, сильно отличаются от условий в диффузных туманностях спиральных рукавов галактик, но галактики с умеренно активными ядрами в среднем показывают отношение $I(\lambda 6584)/I H\alpha$ именно такого порядка, как в диффузных туманностях. Ввиду важности этого факта проблема требует дальнейшего изучения.

№ Авторы выражают благодарность Д. Райковой за полезные замечания.

Л и т е р а т у р а

- Аллер и Чизак (Aller L. H., Czyzak S. J.), 1968. Planetary Nebulae, 209.
 Бербидж (Burbidge G. R.), 1970. Ann. Rev. Astron. and Astrophys., 8, 369.
 Боярчук А. А., Гершберг Р. Е., Годовников Н. В., Пролик В. И., 1969. Изв. КРАО, 39, 147.
 Уидман (Weedman D. W.), 1968. PASP, 80, 314.
 Дюфоур и Киллен (Dufour R. J., Killen R. M.), 1977. Ap. J., 211, 68.
 Дюфоур и Харлоу (Dufour R. J., Harlow W. V.), 1977. Ap. J., 216, 706.
 Калер (Kaler J. B.), 1976. Ap. J. Suppl., 31, 517.
 Остерброк (Osterbrock D. E.), 1974. Astrophysics of Gaseous Nebulae.
 Пеймберт (Peimbert M.), 1968. Ap. J., 154, 33.
 Пеймберт и Спирад (Peimbert M., Spinrad H.), 1970. Ap. J., 159, 809.
 Пеймберт и Торес-Пеймберт (Peimbert M., Torres-Peimbert S.), 1971. Ap. J., 168, 413.
 Пеймберт и Торес-Пеймберт (Peimbert M., Torres-Peimbert S.), 1974. Ap. J., 193, 327.
 Пеймберт и Торес-Пеймберт (Peimbert M., Torres-Peimbert S.), 1976. Ap. J., 203, 581.
 Пеймберт и Торес-Пеймберт (Peimbert M., Torres-Peimbert S.), 1977. MNRAS, 179, 217.
 Пеймберт и др. (Peimbert M., Rayo J. F., Torres-Peimbert S.), 1975. Rev. Mex. Astron. y Astrophys., 1, 289.

- Петров Г. Т., 1978. Всесоюзная конференция молодых астрофизиков, посвященная 70-летию В. А. Амбарцумяна, тезисы докладов.
 Петров Г. Т., 1979. Письма в АЖ, 5, 267.
 Ситон (Seaton M. J.), 1975. MNRAS, 170, 475.
 Ситон и Остерброк (Seaton M. J., Osterbrock D. E.), 1975. Ap.J., 125, 66.
 Смит (Smith H. E.), 1975. Ap. J., 199, 591.
 Янкулова И. М., 1974. АЖ, 54, 1204.

Physical Conditions and Abundances of Some Ions in Diffuse Nebulae

I. Yankulova, G. Petrov, V. Golev

(Summary)

For 95 diffuse nebulae in the Galaxy and in near galaxies relative intensities of the emission lines are given in Kaler's list (1976). Using them we define the electron densities in the zone O^+ with the relation of the forbidden lines [S II] $I(\lambda 6717)/I(\lambda 6731)$ and [O II] $I(\lambda 3726)/I(\lambda 3729)$, accepting $T_e = 10^4 K$. The results based on the [S II] are $\langle \lg N_e \rangle = 2.90$, $\sigma(\lg N_e) = 0.39$, $n = 43$ and they conform well to those based on the [O II].

The ionic content of He^+ , N^+ , O^+ and S^+ in relation to the ionized hydrogen for $T_e = 10^4 K$ is defined. For the galactic diffuse nebulae after 43 objects are obtained: $\lg(He^+/H^+) + 12 = 11.06$, $\sigma = 0.29$; $\lg(N^+/H^+) + 12.0 = 7.26$, $\sigma = 0.29$; $\lg(O^+/H^+) + 12.0 = 8.12$, $\sigma = 0.39$ and $\lg(S^+/H^+) + 12.0 = 6.37$, $\sigma = 0.28$. The same magnitudes for 9 diffuse nebulae in other galaxies are respectively $10.86/\sigma = 0.06$; $7.31/\sigma = 0.70$; $7.54/\sigma = 0.44$; $6.25/\sigma = 0.31$.

Seventeen objects are noted for which $I(\lambda 4959)/I(\lambda 5007) \approx 1.0$ and 16 objects, for which $I(\lambda 6548)/I(\lambda 6584) \approx 1.0$, i. e. the electron density exceeds the critical one. Probably there are sufficiently dense nebulae with a strongly expressed radiation stratification and with physical conditions, different from those in a typical diffuse nebula.

The relation $I(\lambda 6584) [N II]/I(H_\alpha)$ in the galaxies with a strongly expressed nuclear activity (Seyfert galaxies type 1 and Radio galaxies with broad lines) differs very much from that in the diffuse nebulae in the Galaxy and in the galaxies with a weak and moderate activity of the nuclei (NGC, Arakelian galaxies, Markarian galaxies, Seyfert galaxies type 2 and Radio galaxies with narrow lines).

Софийский университет им. К. Охридского
Сектор астрономии с Национальной астрономической
обсерваторией, Болгарская академия наук

Поступила 2. I. 1979 г.