

УДК 524.31.084

Б. Я. Мелех, А. В. Демчына, В. В. Головатый

Кафедра астрофизики Львовского национального университета имени Ивана Франка,
ул. Кирилла и Мефодия 8, Львов, 79005
ademchyna@gmail.com; bmelekh@gmail.com

Массы оболочек и расстояния до планетарных туманностей: IC 5117 и NGC 7293

Разработана методика самосогласованного определения массы M_i ионизованного газа в оболочках планетарных туманностей (ПТ) и расстояния D до них, основанная на расчете оптимизированных фотоионизационных моделей их свечения (ОФМС). Рассчитаны модели «молодой» туманности IC 5117 и «старой» NGC 7293. Определены значения $M_i = 0.0056M_\odot$ и $D = 1287$ пк для IC 5117 и $M_i = 0.681M_\odot$ и $D = 201$ пк для NGC 7293 соответственно. Радиальное распределение плотности газа в оболочке ПТ задавалось близким к «нормальному» аппроксимационным выражением, найденным нами ранее на основе анализа карт изофот 12 ПТ [Астрон. журн.—1992.—69.—С. 1166—1178]. Масса ионизованного газа в оболочке туманности определялась в процессе расчета ОФМС путем интегрирования радиального распределения плотности по объему оболочки. Расстояние до туманности определялось также в ходе расчета ОФМС в качестве одного из ее свободных параметров, путем сравнения модельного потока в линии H на расстоянии к Земле, заданном оптимизатором, с соответствующим наблюдаемым потоком. Найденные таким образом значения D сравниваются с данными других исследований.

МАСИ ОБОЛОНОК І ВІДСТАНІ ДО ПЛАНЕТАРНИХ ТУМАННОСТЕЙ: IC 5117 І NGC 7293, Мелех Б. Я., Демчина А. В., Головатий В. В.

Розроблено методику самоузгодженого визначення маси M_i іонізованого газу в оболонках планетарних туманностей (ПТ) і відстані D до них, основу на розрахунок оптимізованих фотоіонізаційних моделей їхнього світіння (ОФМС). Розраховано моделі «молодої» туманності IC 5117 і «старої» NGC 7293. Визначено $M_i = 0.0056M_\odot$ і $D = 1287$ пк для IC 5117 і $M_i = 0.681M_\odot$ і $D = 201$ пк для NGC 7293

відповідно. Радіальний розподіл густини газу в оболонці ПТ задавався близьким до «нормального» апроксимаційним виразом, знайденим нами раніше на основі аналізу карти ізофот 12 ПТ [Астрон. журн.—1992.—69.—С. 1166—1178]. Маса іонізованого газу в оболонці туманності визначалася у процесі розрахунку ОФМС шляхом інтегрування радіального розподілу густини за об'ємом оболонки. Відстань до туманності визначалась також під час розрахунку ОФМС як один з її вільних параметрів, шляхом порівняння модельного потоку в лінії Н на заданій оптимізатором відстані до Землі з відповідним спостережуваним потоком. Знайдені таким чином значення D порівнюються з даними інших досліджень.

ENVELOPE MASSES AND DISTANCES TO PLANETARY NEBULAE: IC 5117 AND NGC 7293, by Melekh B. Ya., Demchyna A. V., Holovaty V. V. — Self-consistent method to determine the masses M_i of the ionized gas in envelopes of planetary nebulae (PNe) and the distances D to those ones is developed. The method is based on the calculation of optimized photoionization model (OPhM) of a planetary nebula envelope. Models of the «young» nebula IC5117 and «old» one NGC7293 are calculated. Correspondingly, the values of M_i and D for IC5117 ($M_i = 0.0056M_\odot$, $D = 1287$ pc) and NGC7293 ($M_i = 0.681M_\odot$, $D = 201$ pc) are determined. The radial gas density distribution in a PN envelope was defined using approximation expression that is close to the normal one and derived by us on the basis of an analysis of isophotoe maps of 12 PNe [Astron. Zhurn.—1992.—69.—P. 1166—1178]. The mass of the ionized gas was determined during OPhM calculation through the integration of the gas radial distribution over nebula volume. The distance to the PN was determined through the OPhM calculation as one of OPhM free parameters from the comparison of the modelling radiation flux in H line at the distance to the Earth which is assumed by optimizer with the observed one. The values D determined by this means are compared with corresponding results of other investigators.

ВВЕДЕНИЕ

Значения массы ионизированного газа M_i и расстояния D до планетарных туманностей (ПТ), полученные разными способами, как известно, сильно различаются (см. табл. 1). Причиной такого различия может быть как неточность способов их определения, так и ошибки значений наблюдаемых параметров, которые используются для этой цели. Например, при определении электронной концентрации n_e обычно предполагается, что небулярный газ практически равномерно заполняет сферическую оболочку ПТ внешнего радиуса r_{out} и внутреннего r_{in} . На самом деле радиальное распределение плотности газа $n_H(r)$ в их оболочке есть не равномерное, а имеет хорошо выраженный максимум [4]. Это значит, что радиальное распределение n_e также неравномер-

Таблица 1. Массы оболочек и расстояние до планетарных туманностей IC 5117 и NGC 7293, полученные в разных исследованиях

D , пк	M_i/M_\odot	D , пк	M_i/M_\odot	Литературный источник
IC 5117		NGC 7293		
6045	0.0038	180	1.05	[3]
3450	0.06	510	0.0078	[20]
2100	0.003	100	0.050	[18]
	0.053		0.103	[2]
1328		157		[7]

но, что, естественно, затрудняет определение M_i . Кроме того, при определении расстояния D до ПТ (или их радиусов r_{out}) часто используют угловой радиус туманности r . Из наблюдений ПТ этот параметр определяется неуверенно, вероятно, потому, что реальная форма туманности не всегда является сферической. Более уверенно определяются значения потока $F(H\beta)$ в линии $H\beta$, или радиопоток на частоте 5 ГГц ($\lambda = 6$ см). Понятно, что неточность определения D также повлияет на вычисление M_i или наоборот.

Мы считаем, что в настоящее время значения M_i и D можно определить более точно только в ходе расчета оптимизированных фотоионизационных моделей свечения (ОФМС) оболочек ПТ. Расчет такой модели, однако, является очень трудоемкой процедурой. Например, для расчета ОФМС одной ПТ необходимо вычислить более 7000 обычных фотоионизационных моделей свечения (ФМС) туманности. Наш опыт расчета ФМС ПТ показывает, что вычисленный эмиссионный линейчатый спектр туманности можно согласовать с наблюдаемым с погрешностью 5 % для ярких небулярных линий, 10 % — для слабых авроральных линий и 5 % — для потока $F(H\beta)$. Мы надеемся, что при определении M_i и D таким образом можно достигнуть точности около 10 %.

В этой работе приведены результаты определения значений M_i и D , полученные на примере расчета ОФМС «молодой» планетарной туманности ПТ IC 5117 и «старой» NGC 7293. В работе [3] этот вопрос обсуждается на основании расчета обычных ФМС этих туманностей и, разумеется, интересно будет сравнить значения соответствующих параметров и обсудить способы их определения.

РАСЧЕТ ОПТИМИЗИРОВАННОЙ ФОТОИОНИЗАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СВЕЧЕНИЯ ПЛАНЕТАРНОЙ ТУМАННОСТИ

Основными параметрами, определяющими эмиссионный линейчатый спектр планетарной туманности, являются:

— поле ионизирующего излучения центральной звезды ПТ за лаймановским пределом (характеризуется светимостью L_* и эффектив-

ной температурой $T_{\text{эф}}$, которое определяется моделями звездных атмосфер;

- плотность небулярного газа и ее пространственное распределение $n_{\text{H}}(r)$ в оболочке ПТ;
- химический состав А/Н небулярного газа ПТ.

Эти параметры в процессе расчета ОФМС считались свободными. Взаимодействие ионизирующего Лус-излучения звезды с небулярным газом определяет его ионизацию и нагрев, и следовательно, приводит к образованию эмиссионного линейчатого спектра туманности, который можно наблюдать. Обычно результаты наблюдений представляются в виде относительных интенсивностей эмиссионных линий разных химических элементов относительно Н и потока в этой линии. Такой процесс взаимодействия моделируется с помощью расчета ФМС, в результате чего спектр ПТ можно вычислить и сравнить с наблюдаемым. Сущность расчета ОФМС заключается в том, чтобы путем подбора параметров поля ионизирующего излучения ядра ПТ, плотности небулярного газа $n_{\text{H}}(r)$ и химического состава А/Н оболочки туманности как можно точнее согласовать вычисленный и наблюдаемый эмиссионный спектр. При этом автоматически более точно определяются значения L_* (или T_* , r_*), $n_{\text{H}}(r)$ и А/Н. Критерием согласования рассчитанного спектра (а также углового размера) с наблюдаемыми данными в нашем случае было выбрано условие минимума χ^2 -функции:

$$\chi^2 = \frac{y(\text{obs}) - y(\text{mod})}{[y(\text{obs})]}^2, \quad (1)$$

где $y(\text{obs})$ и $y(\text{mod})$ — наблюдаемые и модельные значения различных параметров, $[y(\text{obs})]$ — ошибка измерения значений наблюдаемых параметров. Суть оптимизации состоит в подборе значений выбранных свободных параметров ФМС с целью минимизации χ^2 -функции.

Разумеется, в алгоритм расчета ОФМС была включена проверка завершения вычислений достижением ионизационного фронта (T_e

4000 К), который должен отсутствовать или достичь внешней границы туманности.

Для задания формы ионизационного Лус-спектра центральной звезды ПТ мы использовали модели звездных атмосфер Рауха [17]. Свободными параметрами, определяющими Лус-спектр, является эффективная температура звезды $T_{\text{эф}}$ и ее светимость L_* . При этом температура определяет форму Лус-спектра, а светимость — количество ионизирующих квантов. Важно отметить, что в моделях Рауха учтено наличие звездного ветра от ядер ПТ, влияющего на форму Лус-спектра.

Радиальное распределение концентрации водорода в оболочке ПТ задавалось полуэмпирическим законом [4], полученным на основании анализа карт изофот 12 планетарных туманностей Галактики в линиях Н α , Н β или в радиодиапазоне:

$$n_{\text{H}}(r) = \frac{x^2(1 - 3e^{-1.2x})}{(x^2 - 1)^2} \frac{A}{0.36r_c^{0.43} x^2 r_c^2}, \quad (2)$$

где r_c соответствует радиусу оболочки, близкому к радиусу максимальной плотности газа; $x = r/r_c$. Параметр A характеризует интенсивность истечения вещества от звезды-предшественницы в процессе образования оболочки ПТ. Мы обозначили $DP = A / r_c^2$.

В каждой ФМС в процессе поиска оптимальной модели из заданных оптимизатором значений параметров DP и $n_{\text{H}}(r_c)$ с помощью выражения (2) при $r = r_c$ определялась величина r_c . Из анализа карт изофот для каждой исследуемой ПТ определялось отношение r_{out}/r_c [4], не зависящее от расстояния, с последующим определением внешнего радиуса r_{out} их оболочки. Начальный химический состав оболочек ПТ взят из работ, в которых приведены наблюдаемые спектры туманностей IC 5117 и NGC 7293.

Dust factor является нормирующим множителем для определения содержания углеродной пыли [9]. Его начальное значение принималось равным 0.363 и 1.074 для IC 5117 и NGC 7293 соответственно, найденное по результатам определения массы пыли к газу в работах [11] и [13] соответственно.

Параметрами сравнения вычисленных и наблюдаемых значений, определяющими процесс оптимизации, являются:

— относительные интенсивности эмиссионных линий $I(\text{O III})/I(\text{H } \beta)$ и поток $F(\text{H } \beta)$ в линии $\text{H } \beta$ (наблюдаемый эмиссионный спектр должен быть исправлен за межзвездное поглощение);

— соотношения между интенсивностями линий, которые контролируют электронную температуру и форму ионизационного Лус-спектра;

— угловой радиус туманности r'' , который вместе с наблюдаемым потоком $F(\text{H } \beta)$ использовался для поиска расстояния D до туманности.

В процессе поиска оптимальной ФМС для каждой рассматриваемой модели вычислялось суммарное значение χ^2 -функции, состоящее из соответствующих средних значений χ^2 относительных интенсивностей эмиссионных линий и диагностических соотношений, а также значений $F(\text{H } \beta)$ и r'' . Целью ОФМС является минимизация суммарной χ^2 -функции. Оптимальная модель соответствует минимальному значению этой функции. Значения свободных параметров такой модели являются оптимальными.

Процесс расчета ОФМС был разделен на три стадии. На первой стадии ОФМС рассчитывалась ионизационная структура туманности, которая определяется значениями температуры ядра $T_{\text{эф}}$ и его светимости L_* , радиальным распределением плотности газа $n_{\text{H}}(r)$ в оболочке и расстоянием D до нее, а также химическим составом He/H , O/H и S/H . На этой стадии использовались значения $I(\text{O III})/I(\text{H } \beta)$ только этих химических элементов.

Свободными параметрами на этой стадии ОФМС являлись:

- расстояние до ПТ,
- светимость центральной звезды L_* ,
- эффективная температура $T_{\text{эф}}$ центральной звезды ПТ,
- плотность газа $n_{\text{H}}(r_c)$ на расстоянии r_c от центра ПТ,
- параметр плотности $DP = A / r_c^2$,
- внутренний радиус r_{in} оболочки ПТ,
- относительное содержание элементов He/H, O/H, S/H,
- относительное содержание пыли (dust factor), которое также

контролирует ионизационную структуру туманности.

На второй стадии ОФМС свободными параметрами являлись только содержание A/H тех химических элементов, эмиссионные линии которых наблюдаются в спектрах ПТ, что позволило уточнить их значения. Большинство параметров, определяющих ионизационную структуру, на этой стадии были фиксированными.

На третьей стадии завершился процесс оптимизации всех свободных параметров.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Описанная выше методика расчета ОФМС была использована нами для определения расстояний D до «молодой» планетарной туманнос-

Таблица 2. Значения свободных параметров для планетарных туманностей IC 5117 и NGC 7293, найденные в процессе расчета ОФМС

Свободные параметры	IC 5117		NGC 7293	
	Начальные значения	Оптимальные значения	Начальные значения	Оптимальные значения
D , пк	5900	1287 ¹⁹ ₁₈	200	201 ² ₂
$\lg L_*$, Дж/с	43.480	43.481 ^{0.002} _{0.009}	42.569	42.518 ^{0.018} _{0.008}
$\lg T_{\text{эф}}$, К	5.093	5.097 ^{0.000} _{0.000}	5.090	5.056 ^{0.025} _{0.022}
$\lg n_{\text{H}}(r_c)$, см ⁻³	4.955	4.955 ^{0.000} _{0.000}	1.826	1.826 ^{0.001} _{0.002}
$\lg(DP)$	5.305	5.302 ^{0.002} _{0.001}	1.347	1.348 ^{0.002} _{0.002}
$\lg r_{\text{in}}$, см	15.201	14.907 ^{0.010} _{0.012}	17.387	17.394 ^{0.055} _{0.045}
$\lg(\text{He}/\text{H})$	-0.922	0.972 ^{0.002} _{0.009}	-0.796	0.862 ^{0.028} _{0.118}
$\lg(\text{C}/\text{H})$	-3.316	3.066 ^{0.007} _{0.008}	-3.301	—
$\lg(\text{N}/\text{H})$	-3.959	3.620 ^{0.002} _{0.021}	-3.745	3.765 ^{0.057} _{0.064}
$\lg(\text{O}/\text{H})$	-3.665	3.606 ^{0.005} _{0.018}	-3.495	3.532 ^{0.036} _{0.085}
$\lg(\text{Ne}/\text{H})$	-4.191	4.334 ^{0.004} _{0.030}	-4.161	—
$\lg(\text{S}/\text{H})$	-5.119	5.102 ^{0.003} _{0.014}	-5.745	6.034 ^{0.091} _{0.080}
$\lg(\text{Cl}/\text{H})$	-6.712	6.898 ^{0.004} _{0.014}	-6.771	—
$\lg(\text{Ar}/\text{H})$	-5.793	6.131 ^{0.012} _{0.006}	-5.620	—
Dust factor	0.363	0.277 ^{0.003} _{0.005}	1.074	1.062 ^{0.156} _{0.093}

Таблица 3. Сравнение спектров ОФМС с наблюдаемыми. $I(H) = 100$

Параметры сравнения	IC 5117		NGC 7293			
	Наблюдения	ОФМС	Наблюдения	ОФМС		
[O III] 500.7 / [O III] 436.3	68.28	3.68	62.76	127.2	63.9	104.8
He I 447.1 / He II 468.6	0.56	0.05	0.52	1.19	0.84	1.35
[O III] 500.7 / [O II] 372.7	155.4	4.4	155.1	0.70	0.11	0.69
He I 447.1	5.295	0.477	5.383	6.300	3.150	6.725
He II 468.6	9.439	0.283	10.28	5.300	2.650	4.993
C II 426.7	0.483	0.058	0.480	—	—	—
[N II] (654.8+658.4)	62.09	2.89	58.23	—	—	—
[N II] 658.4	—	—	—	767.9	38.4	727.0
[N II] 575.5	2.458	0.098	2.109	7.11	1.42	12.45
[O II] (372.6+372.9)	11.46	0.21	11.31	692.3	103.8	751.1
[O II] 732.5	—	—	—	18.30	3.70	17.36
[O III] 436.3	19.720	0.986	20.275	3.938	1.969	4.935
[O III] (495.9+500.7)	1741.4	29.4	1694.6	675.0	26.6	689.0
[Ne III] (386.9+396.8)	146.4	8.5	138.7	—	—	—
[S II] 407.0	3.030	0.121	2.492	—	—	—
[S II] (671.6+673.1)	2.955	0.103	2.867	17.40	1.24	17.46
[S III] (906.9+953.2)	88.02	14.10	85.03	—	—	—
[Cl III] (551.8+553.8)	0.575	0.174	0.793	—	—	—
[Ar III] (713.5+775.1)	21.08	0.72	7.79	—	—	—
[Ar IV] (471.1+474.0)	5.851	0.546	4.911	—	—	—
[Ar IV] 726.3	0.239	0.096	0.132	—	—	—
[Ar V] 700.5	0.297	0.003	0.310	—	—	—
$\lg F(H)^*$	-17.02	0.05	-17.08	-16.35	0.01	-16.35
r''	0.90	0.20	1.68	525	165	550

*Потоки в Дж см⁻²с⁻¹Гц⁻¹ на расстоянии Земли

Таблица 4. Значения геометрических и физических параметров распределения плотности газа $n_H(r)$ в оболочках планетарных туманностей IC 5117 и NGC 7293

Параметры	IC 5117		NGC 7293	
	Начальные	ОФМС	Начальные	ОФМС
r_{in} , пк	0.0005	0.0003	0.0790	0.0803
r_{in} , пк [3]	0.0015	—	0.0790	—
r_c , пк	0.0034	0.0032	0.2700	0.2678
r_c , пк [3]	0.0034	—	0.270	—
r_{out} , пк	0.0110	0.0105	0.5400	0.5355
r_{out} , пк [3]	0.0110	—	0.5400	—
A	2.38	2.05	1.62	1.60
$n_H(r_c)$, см ⁻³	94500	90074	67	67
D , пк	5900	1287	200	201
M/M_\odot	0.0047	0.0056	0.447	0.681
M/M_\odot [3]	0.0053	—	0.103	—

ти IC 5117 и «старой» NGC 7293, а также массы ионизованного газа M_i в их оболочках. Как уже упоминалось, расчет ОФМС туманности требует вычислений 7000 обычных ФМС, что обусловило выбор только этих двух ПТ, сильно различающихся возрастом.

Наблюдаемый линейчатый спектр IC 5117 взят из работы [11], а NGC 7293 — из [11] и [12]. Начальные значения свободных параметров для этих ПТ также взяты из работ [11] и [15], а расстояний D — из [3]. Они приведены в табл. 2 в графах 2 и 4 для IC 5117 и NGC 7293 соответственно. Найденные в результате расчета трехстадийного ОФМС оптимальные значения свободных параметров для этих ПТ приведены в графах 3 и 5 табл. 2. Видно, что для «молодой» планетарной туманности IC 5117 в результате расчета ОФМС наиболее сильно уменьшились значения расстояния D (от 5900 до 1287 пк (на 78 %)) и внутреннего радиуса r_{in} оболочки ПТ (от $1.59 \cdot 10^{15}$ до $8.07 \cdot 10^{14}$ см (на 40 %)). В меньшей мере изменились значения химического состава А/Н (10 %) и параметра dust factor (20 %), который характеризует отношение «пыль/газ» по числу частиц. Что касается NGC 7293, то начальные значения основных свободных параметров для нее взяты из работы [4], найденные в результате расчета самосогласованной обычной ФМС. Однако следует отметить, что расчет ОФМС этой туманности является важной проверкой возможности применения этого способа для других ПТ, начальные значения свободных параметров которых известны неточно.

В табл. 3 сравниваются вычисленные и наблюдаемые значения основных диагностических соотношений между интенсивностями эмиссионных линий [O III] 500.7 / 436.3, а также линий ионов соседних стадий ионизации [O III] 500.7 / [O II] 372.7 и He I 447.1 / He II 468.6, интенсивностей рекомбинационных линий He I, He II, C II и запрещенных линий [N II], [O II], [O III], [Ne III], [S II] для IC5117 и NGC7293, а также [S III], [Cl III], [Ar III], [Ar IV] и [Ar V] только для IC5117. Видно, что согласие ОФМС и наблюдаемых значений параметров хорошее в пределах их погрешностей. Исключение составляют интенсивности линий [Ar III] 713.5 + 775.1, различие которых объяснить химическим составом трудно, поскольку интенсивность других линий Ar согласуется хорошо. В последних двух строчках табл. 3 сравниваются вычисленные и наблюдаемые значения потоков $F(H)$ от оболочек этих ПТ и их угловых радиусов. Различие последних (почти в два раза) трудно объяснить неточностью потоков $F(H)$ и расстояний D одновременно.

В табл. 4 сравниваются геометрические параметры распределения плотности в оболочках ПТ IC 5117 и NGC 7293, а также расстояния до ПТ и массы ионизованного газа, полученные в результате расчета их ОФМС, с соответствующими данными из работы [2]. Сравнение начальных и конечных (после расчета ОФМС) масс оболочек ПТ, полученные путем интегрирования распределения (2) между соответствующими внутренним и внешним радиусами, показало, что после расче-

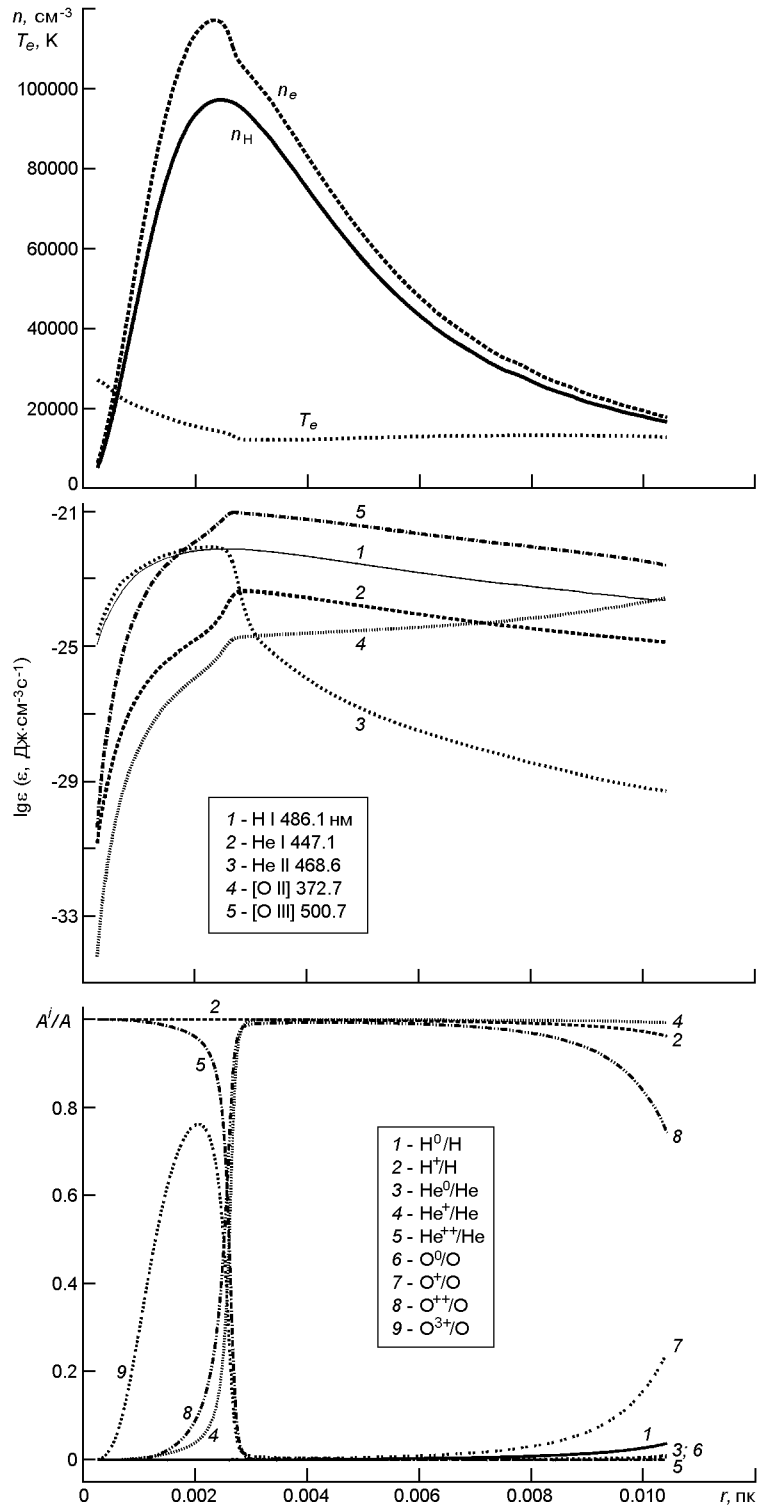


Рис. 1. Радиальное распределение концентрации водорода, электронных концентраций и температур, коэффициентов излучения в некоторых важных эмиссионных линиях, а также ионных содержаний, полученных из ОФМС планетарной туманности IC 5117

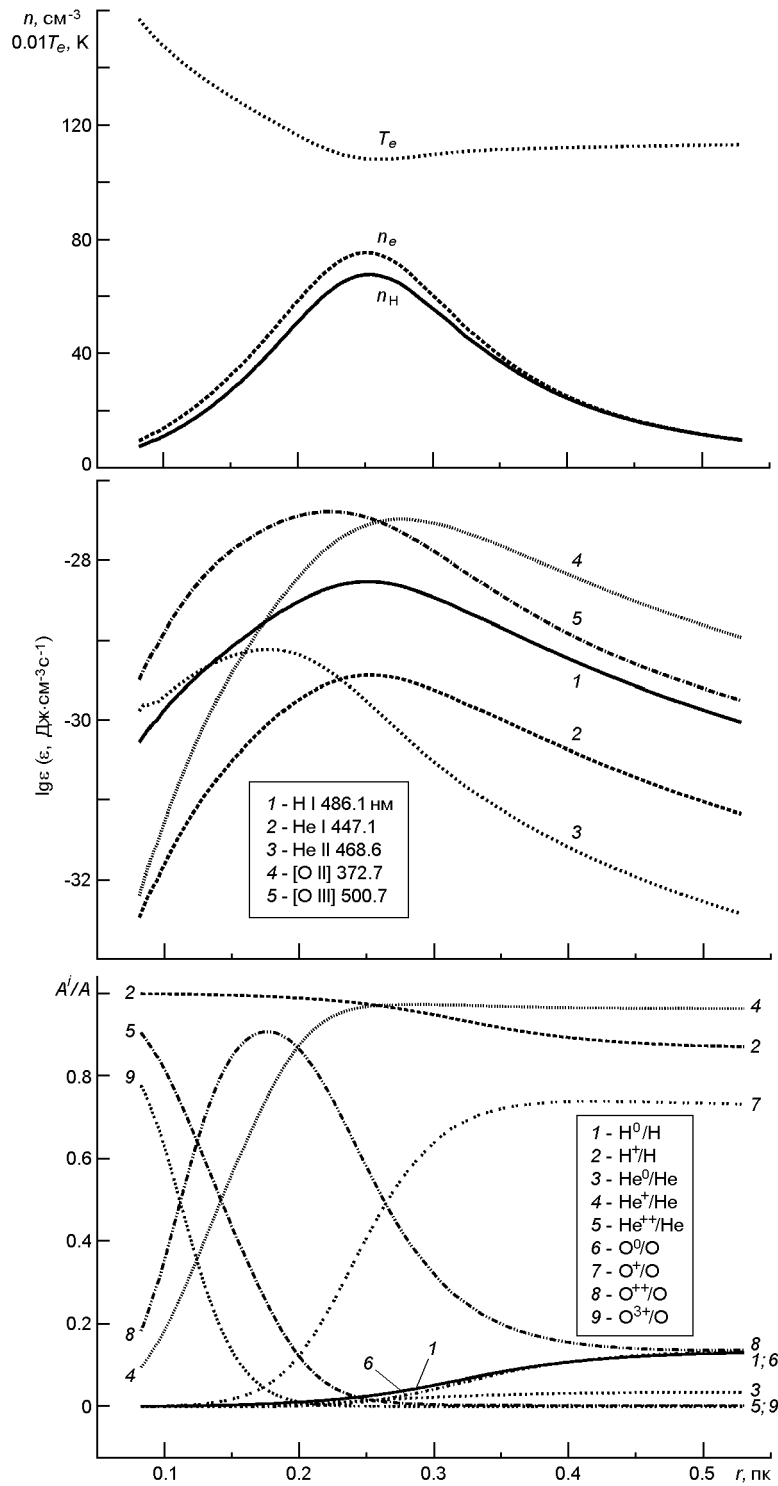


Рис. 2. Радиальное распределение концентрации водорода, электронных концентраций и температуры, коэффициентов излучения в некоторых важных эмиссионных линиях, а также ионных содержаний, полученных из ОФМС планетарной туманности NGC 7293

та ОФМС значение массы IC 5117 возросло на 19 %, а для NGC 7293 — на 52 %. Сравнение же полученных результатов ОФМС с результатами работы [2] показало, что массы, полученные для IC 5117, различаются на 6 %, а для NGC 7293 — приблизительно в семь раз.

На рис. 1 показаны радиальные зависимости концентраций водорода $n_H(r)$ и электронов n_e , температуры T_e , излучательных способностей () в некоторых эмиссионных линиях, а также ионных содержаний водорода, гелия и кислорода для планетарной туманности IC 5117. Видно, что температурный минимум и максимумы названных зависимостей совпадают или находятся очень близко к максимуму распределения плотности водорода $n(r)$ и n_e . Это значит, что электронная концентрация n_e , найденная по линиям [N II], [O II], [O III], в оболочках более «молодых» ПТ всегда совпадает с максимумом распределения плотности n_{\max} . Совсем другая ситуация наблюдается в случае оболочки протяженной ПТ NGC 7293 (см. рис. 2). Только температурный минимум четко совпадает с максимумом плотности. Максимумы распределений остальных величин разбросаны в половине внутренней области объема туманности, за исключением (H). Это значит, что $n_e(\max)$ для более «старых» ПТ может быть определена только по излучательной способности (H), а не по запрещенным линиям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Есть много методов определения расстояний D до ПТ, значения которых сильно различаются. Выбор планетарных туманностей IC 5117 и NGC 7293 обусловлен тем, что IC 5117 — компактная и молодая ПТ, а NGC 7293 — протяженная и старая. Расстояние до NGC 7293 определяется достаточно уверенно. Поэтому мы использовали эту ПТ для проверки метода ОФМС. Как видно из результатов расчета, расстояние, полученное методом ОФМС, достаточно точно воспроизводит это значение (200 пк). В то же время расстояние до IC 5117, полученное нами в работе [3] (5900 пк), сильно отличается от оценок других исследователей (от 1240 до 7500 пк). Поэтому мы решили определить расстояние до этой ПТ методом ОФМС. Найденное нами расстояние $D = 1287$ пк наиболее близко только к значению $D = 1328$ пк из работы [7].

В процессе расчета этих ОФМС было использовано предположение о сферической симметрии их оболочек. В наших ОФМС для задания радиального распределения плотности в оболочке ПТ использовалось выражение (2) из работы [4], также полученное в предположении сферической симметрии. Поэтому на данном этапе исследования мы считаем, что наш метод применим только к сферически-симметричным (или очень близким к такой геометрии) оболочкам ПТ. Следует отметить, что геометрия оболочки ПТ может сильно влиять только на определение массы ионизированного газа в ней.

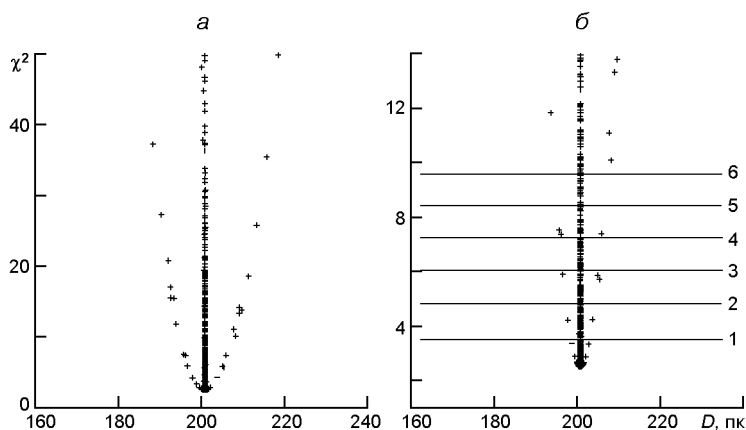


Рис. 3. Распределение значений χ^2 -функции по значениям D расстояния до ПТ, полученное на основе моделей, рассчитанных для поиска ОФМС планетарной туманности NGC 7293: *а* — интервал $0 < \chi^2 < 50$, *б* — интервал $1 < \chi^2 < 14$, горизонтальные линии — уровни $\chi^2_{\min} + \chi^2$ для различного количества k степеней свободы (цифры справа)

В заключение отметим также, что ошибки оптимальных значений свободных параметров для рассмотренных ОФМС (см. табл. 2, графы 3 и 5) определялись с помощью распределений χ^2 -функции по значениям соответствующих свободных параметров, полученных в результате поиска оптимизатором оптимальной модели. Детально этот алгоритм описан в работе [14], посвященной оптимизационному моделированию зон НП. В работе [1] показано, что в случае поиска ОФМС оболочек ПТ χ^2 -функция дает однозначный минимум для всех рассмотренных свободных параметров. В данной работе мы добавили к свободным параметрам ещё и расстояние до ПТ. Как видно из рис. 3 на примере ОФМС ПТ NGC7293, распределение χ^2 -функции по расстоянию дает тоже однозначное решение. На рисунке также приведены уровни $\chi^2_{\min} + \chi^2$ для различного количества k степеней свободы задачи в случае ОФМС этого объекта. Интервал значений расстояния на рисунке соответствует рассмотренному оптимизатором при поиске оптимальной модели (значения за пределами распределения выходят за верхнюю границу рисунка, так как соответствуют моделям, характеризующимся большими значениями χ^2 -функции). В табл. 2 представлены ошибки оптимальных параметров ОФМС в предположении равенности $k = 1$, поскольку интенсивности линий одного и того же иона не являются независимыми параметрами сравнения с данными наблюдений, а $n_{\text{H}}(r_c)$ и DP , как было показано в работе [4], не являются независимыми свободными параметрами. Из рис. 3 видно, что добавление дополнительных степеней свободы в ОФМС ПТ существенно не увеличивает ошибки определения расстояния, поскольку распределение значений χ^2 -функции является достаточно узким.

Более полное исследование этих и других физических параметров для 12 планетарных туманностей из работы [4], 18 ПТ из [19], 15 ПТ из

[16], у которых также обнаружен градиент распределения плотности газа, предполагается обсудить в отдельной работе.

1. *Гаврилова Н. В.* Визначення хімічного складу планетарних туманностей з врахуванням неоднорідностей густини газу в їх оболонках: Дис. ... канд. фіз.-мат. наук. Львів, 2005.—185 с. Машинопис.
2. *Головатий В. В., Демчина А. В.* Маса йонізованого газу в оболонках галактичних планетарних туманностей // Журн. фіз. досліджень.—2013.—**17**.—С. 1902.1—1902.12.
3. *Головатий В. В., Демчина А. В.* Еволюція оболонок планетарних туманностей и расстояние до них // Астрон. журн.—2014.—**91**, вып. 1.—С. 1—11.
4. *Головатий В. В., Мальков Ю. Ф.* Эволюция планетарных туманностей: эмпирический подход // Астрон. журн.—1992.—**69**, вып. 6.—С. 1166—1178.
5. *Головатий В. В., Мальков Ю. Ф.* Фотоионизационные модели свечения и физические характеристики ПТ // Астрон. журн.—1991.—**68**, вып. 7.—С. 1197—1210.
6. *Pottasch S.* Планетарные туманности. Изучение поздних стадий звездной эволюции: Пер. с англ. — М.: Мир, 1987.—351 с.
7. *Cahn J. H., Kaler J. B., Stanghellini L.* A catalogue of absolute fluxes and distances of planetary nebulae // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.— 1992.—**94**.—P. 399.
8. *Clegg R. E. S., Harrington J. P., Barlow M. J., Walsh J. R.* The planetary nebula NGC 3918 // Astrophys. J.—1987.—**314**.—P. 551—571.
9. *Ferland G. J.* Hazy, a brief introduction to cloudy. — University of Kentucky, 2005.—Internal Report N 200.—<http://www.nublado.org>
10. *Harrington J. P., Feibelman W. A.* The planetary nebula IC 3568 - A model based on IUE observations // Astrophys. J.—1983.—**265**.—P. 258—271.
11. *Hyung S., Aller L. H., Feibelman W. A., Lee S. J.* Optical spectrum of the compact planetary nebula IC 5117 // Astrophys. J.—2001.—**563**.—P. 889—902.
12. *Kaler J. B.* A catalog of relative emission line intensities observed in planetary and diffuse nebulae // Astrophys. J. Suppl. Ser.—1976.—**31**.—P. 517—688.
13. *Karska A.* Porównanie własności podcherwonych mgławic planetarnych w Drodze Mlecznej i Wielkim Obłoku Magellana. — Torun: Uniwersytet Mikołaja Kopernika, 2009.—**118**.
14. *Melekh B. Ya., Holovaty V. V., Izotov Yu. I.* Determination of the physical parameters, Lyman continua, and chemical compositions of H II regions in blue compact dwarf galaxies // Astron. Repts.—**52**, N 3.—P. 184—200.
15. *Peimbert M., Torres-Peimbert S.* Chemical composition of type I planetary nebulae - Collisional excitation effects on He I line intensities // Rev. mex. astron. y astrofis. 1987.—**14**.—P. 540—558.
16. *Phillips J. P.* Density gradients in Galactic planetary nebulae // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2007.—**378**.—P. 231—238.
17. *Rauch T.* A grid of synthetic ionizing spectra for very hot compact stars from NLTE model atmospheres // Astron. and Astrophys.—2003.—**403**.—P. 709—714.
18. *Sharova O. I.* Determination of the parameters of the central star from the radio flux of a planetary nebulae // Sov. Astron. 1992.—**69**.—P. 38—51.
19. *Taylor A. R., Pottasch S. R., Zhang C.* Radio continuum spectra of compact planetary nebulae. A wind-shell model // Astron. and Astrophys.—1987.—**171**.—P. 178.
20. *Zhang C. Y.* A statistical distance scale for Galactic planetary nebulae // Astrophys. J. Suppl. Ser.—1995.—**98**.—P. 659—678.

Статья поступила в редакцию 08.08.14