

**Нижегородский научно-исследовательский радиофизический институт  
Государственного комитета РФ по высшему образованию**

---

**П р е п р и н т    N    396**

**НОВАЯ ШКАЛА РАССТОЯНИИ  
ДО ПЛАНЕТАРНЫХ ТУМАННОСТЕЙ**

**О.И. Шарова**

**Ниижний Новгород 1994**

ШАРОВА О.И.

НОВАЯ ШКАЛА РАССТОЯНИИ ДО ПЛАНЕТАРНЫХ ТУМАННОСТЕЙ. // Препринт № 396  
- НИРФИ: Нижний Новгород, 1994 г. - 26 стр.

УДК 524.27

Предлагается новая шкала расстояний до планетарных туманностей, свободная от обычных априорных предположений о характере эволюции туманностей и возбуждающих звезд. Шкала основана на обнаруженной ранее регрессионной зависимости между температурой и радиусом центральной звезды. Исходными данными для определения расстояния служат плотность радиопотока туманности и звездная величина чпра или один из этих параметров и температура центральной звезды. Для 75 планетарных туманностей вычислены расстояния, получены линейные размеры и концентрации атомов водорода. Ионизованные массы туманностей занимают интервал от  $10^{-3}M_{\odot}$  до  $1.419M_{\odot}$ .

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема расстояний является ключевой при решении вопросов происхождения и эволюции планетарных туманностей. Существует несколько астрофизических методов определения расстояний до планетарных туманностей, каждый из которых применим лишь к ограниченному числу объектов. Благодаря им в настоящее время более или менее точно известны расстояния до 81 планетарной туманности, их список приведен в работе Ф. Саббадина [1]. Для большинства туманностей определение расстояний возможно только статистическими методами, основанными на предположении, что какой-либо параметр принимает одинаковое значение у всех объектов.

Наибольшее распространение получил метод И. С. Шкловского, где таким параметром служит ионизованная масса туманности. На его основе построено более десятка шкал расстояний, различающихся принятыми значениями массы. Неоднократно предпринимались попытки уточнить расстояния, используя эмпирические зависимости между массой и радиусом туманности. В [2] шкала расстояний основана на линейной зависимости между ними. В дальнейшем было показано [3], что для оптически толстых туманностей соотношение масса - радиус должно быть степенной функцией, и построена шкала в предположении, что полная масса туманности и поток излучения возбуждающей звезды в лаймановском континууме одинаковы для всех туманностей. Такой подход заранее предопределяет эволюцию туманностей и центральных звезд. Для интерпретации экспериментальных данных как эволюционных изменений в туманностях и звездах необходим независимый способ определения расстояний. Настоящая работа посвящена решению этой проблемы, предлагается шкала расстояний, свободная от априорных ограничений на физические параметры планетарных туманностей и центральных звезд.

## ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ ТЕМПЕРАТУРОЙ И РАДИУСОМ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЗВЕЗДЫ

В нашей работе [4] был предложен, а в [5] развит метод определения температуры и углового радиуса центральной звезды с привлечением радиопотока туманности. Он позволяет учитывать наличие в туманности гелия и пыли, влияющих на оценку параметров звезды. Этим методом рассчитаны температуры и линейные радиусы 71 центральной звезды для планетарных туманностей из списка Ф. Саббадина [1]. При расчете параметров звезд использованы данные о содержании в туманностях гелия и пыли, полученные в оптическом и инфракрасном диапазонах. Обнаружена закономерность: более горячие звезды имеют, как правило, меньшие размеры. В результате регрессионного анализа установлена зависимость между температурой и радиусом центральной звезды в виде степенной функции:

$$R_n = \beta \cdot T_n^{-\alpha} \quad (1)$$

где  $R_n$  - радиус ( $R_\odot$ );  $T_n$  - температура звезды (K).

$$\beta = 7,097 \cdot 10^{23} ; \quad \alpha = 2,0.$$

Корреляционное соотношение имеет достаточно высокое значение 0,89. Это позволяет утверждать, что величина радиуса звезды определяется главным образом ее температурой, а влияние других факторов (таких как плотность, химический состав звезды и т.п.) менее значимо. Вычисленные параметры центральных звезд и регрессионная зависимость представлены на рис. 1. Доверительный интервал кривой регрессии с вероятностью 95% показан штриховой линией. Границы области, в которую с вероятностью 95% попадают значения радиусов при данном значении температуры, показаны пунктирными линиями. Пылевая составляющая планетарных туманностей в настоящее время недостаточно хорошо изучена, но она практически не влияет на значения  $\alpha$  и  $\beta$  в (1), тогда как учет гелия приводит к увеличению показателя степени  $\alpha$  по сравнению с чисто водородной моделью.

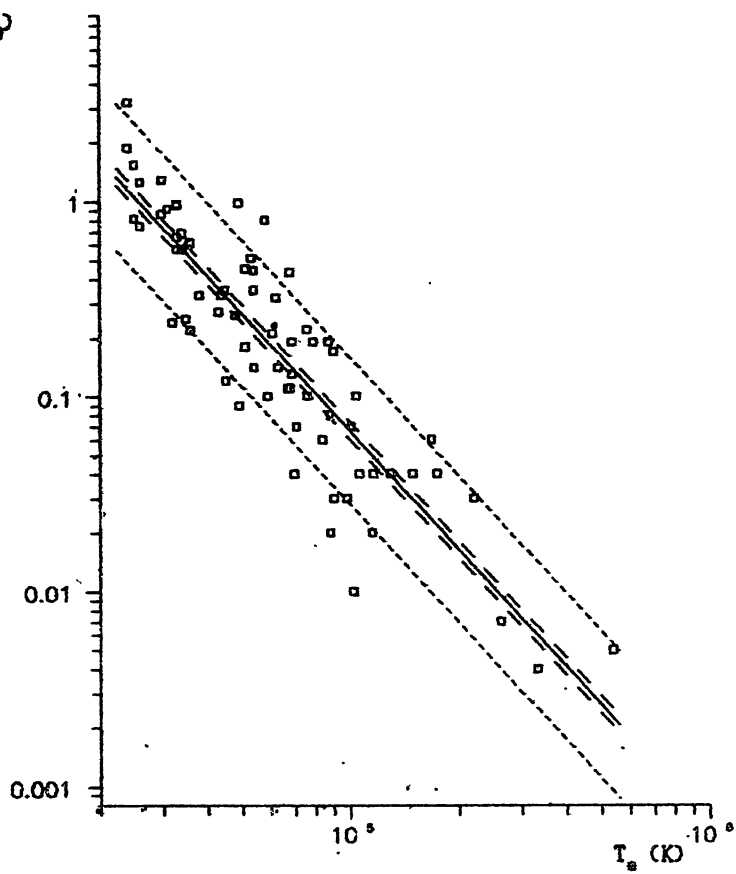


Рис. 1 Регрессионная зависимость между температурой и радиусом центральной звезды.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИИ НА ОСНОВЕ РЕГРЕССИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ

Соотношение (1) позволяет построить новую шкалу расстояний, в которой роль реперов играют упомянутые планетарные туманности из (5). Зная плотность радиопотока туманности, звездную величину ядра и химический состав туманности, можно рассчитать температуру и угловой радиус центральной звезды, а на основе (1) - найти ее линейный радиус. Отношение линейного радиуса к угловому дает расстояние до туманности:

$$D = \beta \cdot 10^{-\alpha + 0.2(m_0 + C_1)} \cdot t_*^{-\alpha} \left( \exp \frac{C_2}{t_*} - 1 \right)^{-0.5}, \quad (2)$$

где  $D$  - расстояние (пс);  $m_0$  - звездная величина ядра с учетом межзвездного поглощения;  $C_1$  и  $C_2$  - постоянные, зависящие от выбора системы звездных величин [5];  $t_* = 10^{-\alpha} T_*$ .

Используя рассчитанные в [5] температуры центральных звезд, получим оценки расстояний до реперных туманностей и сравним их с индивидуальными астрофизическими расстояниями из [1]. На рис. 2 приведены отношения расстояний  $D/D_A$  в зависимости от радиуса туманности  $R_N = 4,848 \cdot 10^{-9} \cdot \theta \cdot D_A$ , где  $D$  - оценка расстояния по формуле (2) в пс,  $D_A$  - расстояние из [1] в пс,  $\theta$  - угловой радиус туманности (сек. дуги). В основе нашего метода расчета параметров центральной звезды лежит предположение, что радиоизлучающая область совпадает с зоной HII, это справедливо, строго говоря, только для оптически толстых туманностей. В случае оптически тонких туманностей можно было ожидать заниженной оценки температуры и, следовательно, завышенного расстояния. Тогда должна существовать корреляция между отношением расстояний  $D/D_A$  и радиусом туманности  $R_N$ . Однако рис. 2 демонстрирует ее отсутствие. Для 7 туманностей расчет дает расстояния, отличающиеся от астрофизических в три и более раз, причем в половине случаев  $D$  меньше, чем  $D_A$ . Наибольшее различие в оценках

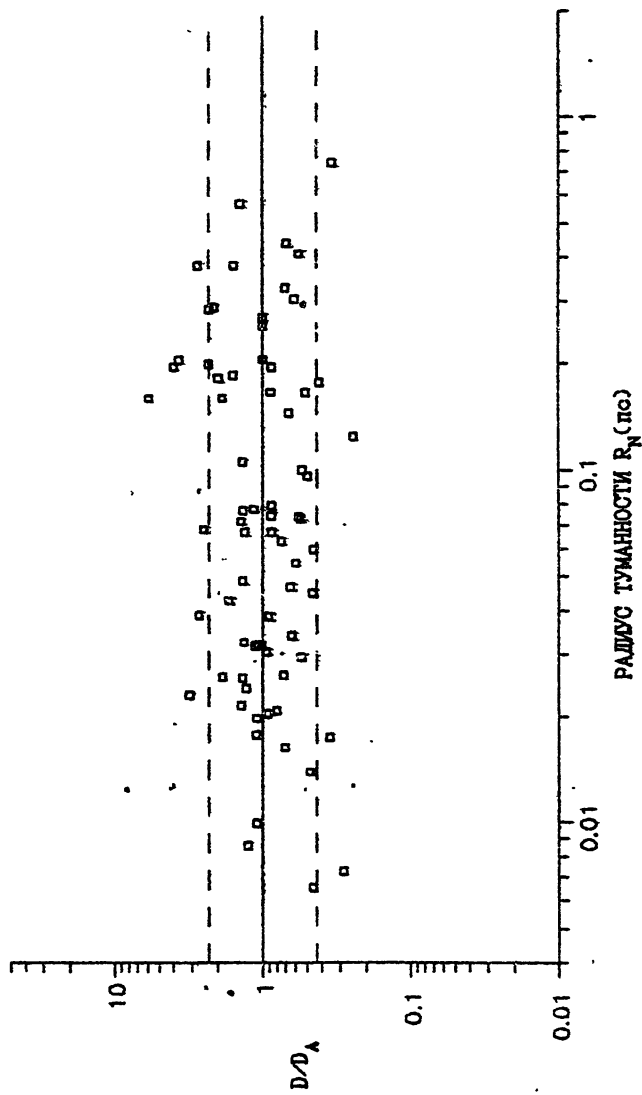


Рис. 2 Оценки расстояний до реперных туманностей  $D$  на основе регрессионной зависимости в сравнении с их астрофизическими значениями  $D_A$  из [1].

расстояний получено для NGC 7293, где расчетное значение  $D$  превышает  $D_A$  в 6 раз; для NGC 6369, напротив, вычисленное расстояние меньше астрофизического в 4,5 раза. Обе эти туманности имеют не самые большие радиусы: 0,160 пс у NGC 7293 и 0,125 пс у NGC 6369, тогда как линейные радиусы реперных туманностей занимают интервал от 0,007 пс до 0,571 пс [5].

В целом новая шкала хорошо воспроизводит астрофизические расстояния и характеризуется средним значением

$$\langle \lg \frac{D}{D_A} \rangle = 0,000 \pm 0,055.$$

Следует заметить, что проведенный в [1] анализ различных известных шкал расстояний, основанных на предположении о постоянной ионизованной массе или ее эволюционных изменениях с ростом радиуса, дает средние значения  $\langle \lg \frac{D}{D_A} \rangle$  в пределах от -0,17 до -0,05. Эти шкалы несколько хуже согласованы с астрофизическими расстояниями, в среднем занижают оценку расстояний. Новая шкала должна давать более точные значения расстояний и применима к планетарным туманностям любых линейных размеров, по крайней мере в интервале размеров реперных туманностей. На рис. 2 приведены границы области, в которой с вероятностью 90% лежат расстояния до туманностей. Предсказанные основе (1) значения расстояний могут отличаться от действительных не более чем в 2 раза.

На основе радиопотока туманности и звездной величины ядра рассчитаны температуры центральных звезд и расстояния до 48 планетарных туманностей. Исходные данные и результаты расчета приведены в таблице 1. В первом столбце дано наиболее известное название туманности, во втором - звездная величина ядра с учетом межзвездного поглощения, эти данные взяты из [6-8]. Для ядер в IC 4406, He 2-138 и He 2-142 использованы звездные величины в полосе B(4400A), для



остальных - в полосе V(5500Å). В третьем столбце - плотность радиопотока туманности в области оптической прозрачности, использованы данные на частоте 5ГГц и выше из [9,10]. В четвертом столбце - относительное содержание гелия в туманности  $\xi = N_{\text{He}}/N_{\text{H}}$  [8,10], где  $N_{\text{He}}$  и  $N_{\text{H}}$  - концентрации атомов гелия и водорода, если данные отсутствуют, принималось значение  $\xi = 0,1$ . В пятом столбце - оптическая толщина пыли в туманности для лаймановского континуума, рассчитанная аналогично [5] по ИК - данным из [11,12], при их отсутствии принималось значение  $\tau_d = 0$ . В шестом и седьмом столбцах приведены вычисленные значения соответственно температуры центральной звезды и расстояния до туманности.

Таблица 1

Температуры центральных звезд и расстояния до планетарных туманностей, вычисленные по радиопотоку туманности и звездной величине ядра

Туманность	Исходные данные				$T_*$ ( $10^4$ K)	D (пс)
	$m_0$	$S_p$ (Як)	$\xi$	$\tau_d$		
NGC 2371-2	14,2	0,087	0,151	0,02	4,9	2400
2610	15,2	0,036	0,11		5,1	3600
3132	9,4	0,228	0,146	0,37	2,4	600
6058	13,7	0,01	0,114		2,7	4100
6210	12,8	0,26	0,167	0,12	4,7	1300
6309	12,8	0,151	0,124	0,15	4,1	1600
6537	15,4	0,64	0,1		26,3	400
6543	11,3	0,85	0,111	0,47	5,0	600
6807	13,6	0,06	0,151		4,0	2600
6826	10,7	0,365	0,1	0,12	3,2	800

Таблица 1 (продолжение)

Туманность	Исходные данные				$T_n (10^4 K)$	D (пс)
	$m_0$	$S_p$ (Ян)	$\xi$	$\tau_d$		
NGC 6833	11,4	0,15	0,15		3,0	1300
6842	12,1	0,12	0,1		3,4	1600
6861	12,6	0,18	0,151	0,91	4,8	1200
6891	11,9	0,105	0,115	0,11	3,1	1500
6905	14,5	0,052	0,101	0,01	4,7	2900
IC 289	11,2	0,6	0,1		3,9	800
351	14,6	0,033	0,123		4,2	3600
2003	15,9	0,043	0,148		6,6	3400
2149	10,7	0,28	0,1		3,0	900
2448	14,2	0,073	0,119	0,07	4,7	2400
3568	11,8	0,095	0,145		2,9	1500
4406	13,9	0,110	0,12		5,3	2100
4593	11,1	0,098	0,125		2,6	1300
4634	12,7	0,14	0,101	0,13	3,9	1600
4637	9,1	0,401	0,1		2,5	600
4663	12,4	0,045	0,1		2,9	2200
4673	13,3	0,036	0,1		3,3	2900
4732	15,4	0,049	0,175		5,8	3300
4775	14,9	0,071	0,1	0,09	5,9	2500
4846	14,4	0,047	0,125		4,4	3000
4997	13,7	0,127	0,13		4,9	1900
J 320	13,7	0,031	0,169	0,07	3,3	3200
Me 2- 1	15,1	0,038	0,102	0,02	7,0	3500
2- 2	15,6	0,04	0,163		5,8	3600
Vy 1- 1	13,4	0,028	0,114		3,1	3000

Таблица 1 (окончание)

Туманность	Исходные данные				$T_e (10^4 K)$	D (пс)
	$n_0$	$S_\nu$ (Ян)	$\xi$	$\tau_d$		
Vy 2- 2	11,9	0,220	0,13		3,5	1200
Ba 1- 1	15,0	0,013	0,1		3,8	5300
Cn 3- 1	11,8	0,055	0,1		2,6	1700
Sh 2- 71	10,6	0,083	0,1		2,4	1200
2-266	11,5	0,159	0,1		3,2	1300
W 1- 4	14,0	0,354	0,1		7,8	1100
Hb 12	12,6	0,300	0,104		4,7	1200
PB 8	12,7	0,027	0,1		2,8	2600
He 2-138	9,9	0,076	0,1		2,1	1000
2-142	10,0	0,065	0,1		2,1	1000
M 1- 25	12,0	0,180	0,1		3,6	1400
3- 21	13,6	0,030	0,1		3,4	3200
Hu 2- 1	12,6	0,105	0,102		3,5	1800

График, изображенный на рис. 3, позволяет находить расстояния до планетарных туманностей без предварительного вычисления температур и угловых радиусов центральных звезд. По оси абсцисс отложены значения параметра  $P$ , состоящего из наблюдаемых величин:

$$P = P_0 \cdot \psi^{-1}, \quad \text{где } P_0 = 10^{0,4 m_0} \cdot W_0, \quad W_0 = S_\nu \left[ 17,7 + \ln \frac{t^{1,5}}{\nu} \right]^{-1},$$

$\psi = \frac{\tau_d^2}{3} \left[ \exp \tau_d (\tau_d^2 - 2\tau_d + 2) - 2 \right]^{-1}$ ,  $S_\nu$  - плотность радиопотока туманности на частоте  $\nu$  (МГц) выше критической (Ян);  $\tau_d$  - оптическая толщина пыли в лаймановском континууме;  $t_e = 10^{-4} T_e^{-\alpha}$ ,  $T_e$  - электронная температура туманности (К).

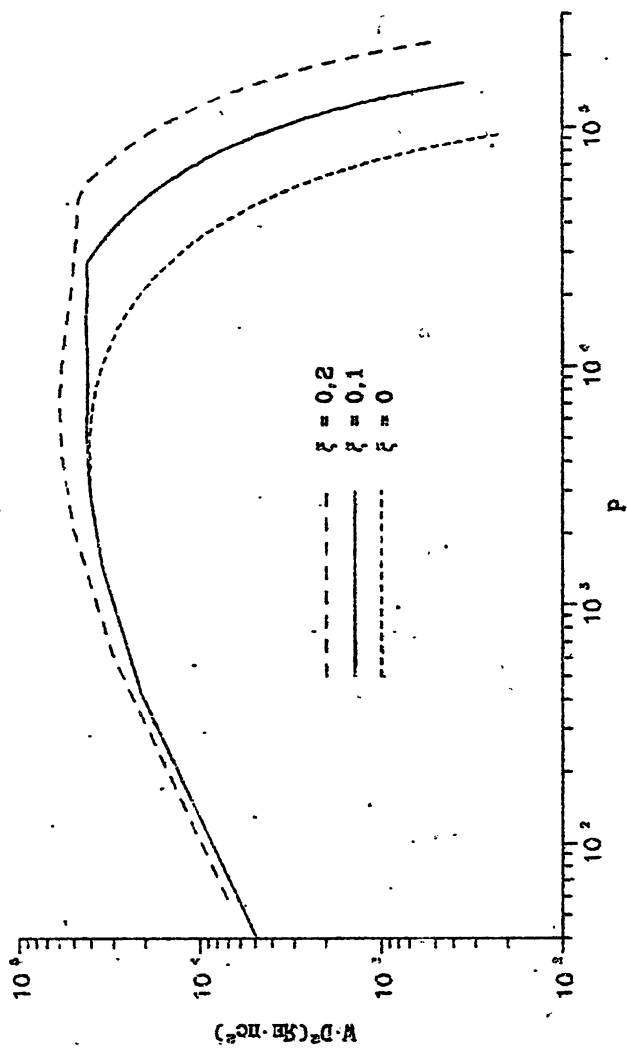


Рис. 3 Спектральная мощность радоможлучения туманности как функция наблюдаемых величин, составляющих параметр  $P$ .

По оси ординат отложены значения величины  $W \cdot D^2$ , где  $W = W_0 \cdot \eta^{-1}$ . Величина  $W \cdot D^2$  пропорциональна спектральной мощности радиоизлучения туманности  $S_\nu \cdot D^2$ , но не зависит от частоты и учитывает уменьшение наблюдаемого радиопотока из-за поглощения пылью части ионизирующего излучения центральной звезды. Зависимость спектральной мощности радиоизлучения от параметра  $P$  приведена для различных значений относительного содержания гелия  $\xi$ . Расчет выполнен для системы звездных величин  $B$  (4400A) и  $T_e = 10^4 \text{K}$ . Относительное содержание гелия практически не сказывается на оценке расстояния, пока параметр  $P$  меньше  $10^2$ ; увеличение  $\xi$  с 0,1 до 0,2 увеличивает расстояние не более чем на 5,6%, даже чисто водородная модель туманности дает расстояние лишь на 12% меньше, чем модель с 20% гелия. В области высоких значений параметра  $P > 10^4$  оценка расстояния сильно зависит от относительного содержания гелия. Так, например, при  $P = 4 \cdot 10^4$  расстояния до туманностей с 10% и 20% гелия различаются на 30%, если остальные исходные данные у них одинаковы; в чисто водородной модели расстояние почти в 2 раза меньше, чем в модели с 10% гелия. Наличие пыли в туманности отражается увеличением параметра  $P$ , что приводит к более высокой температуре центральной звезды и меньшему значению расстояния, причем этот эффект сильнее проявляется для больших значений  $P_0$ . Различие в оценках расстояний  $D_0$  и  $D_d$ , полученных соответственно без учета и с учетом пыли, показано на рис. 4 в зависимости от оптической толщины пыли  $\tau_d$  и величины  $P_0$ . Пока  $\tau_d \leq 0,2$ , учет пыли уменьшает оценку расстояния не более, чем на 30% по сравнению с чисто водородной моделью.

Расстояние можно определить и в том случае, когда неизвестны радиопоток туманности или звездная величина ядра, но известна температура центральной звезды. Спектральная светимость центральной

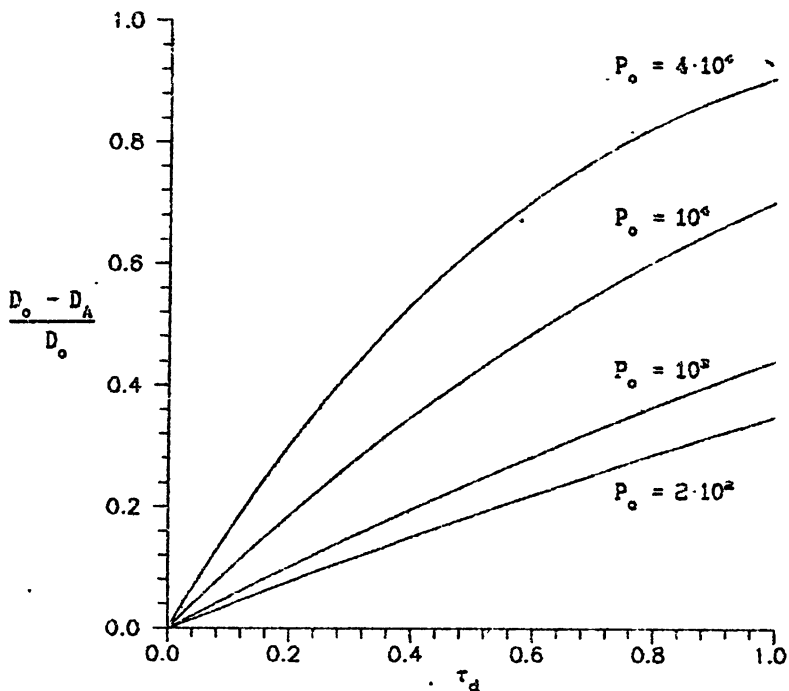


Рис. 4 Уменьшение оценки расстояния до планетарной туманности при учете пылевой составляющей.

звезды является функцией температуры, это отражено в формуле (2), позволяющей найти расстояние по известной температуре и звездной величине ядра. В таблице 2 приведены результаты расчета расстояний на основе температур, найденных по ультрафиолетовым спектрам излучения звезд в [13-15]. Для определения расстояний в этом случае могут быть также использованы значения температур, полученные методом энергетического баланса, который менее других чувствителен к оптической толщине туманности за лаймановским пределом.

Оценки расстояний до планетарных туманностей по температуре  
и звездной величине ядра

Туманность	Исходные данные		Расстояние (пс)
	$T_e (10^4 K)$	$m_0$	
A 31	3.0	15.2	2100
33	8.0	15.4	2300
43	14.0	13.0	300
52	8.53	9.9	200
70	7.15	18.7	1300
78	14.0	13.0	300

Здесь оценка расстояния не зависит от содержания гелия, и на нее не влияет оптическая толщина туманности.

Благодаря зависимости между радиусом и температурой (1), спектральную мощность радиоизлучения туманности в области оптической прозрачности также можно представить в виде функции температуры центральной звезды. Она изображена на рис. 5 для различных значений относительного содержания гелия  $\xi$ . Спектральная мощность радиоизлучения изменяется в широких пределах, а не остается постоянной для всех оптически толстых за лаймановским пределом туманностей, как утверждалось в [3], где на этом основана шкала расстояний.

Если известна температура центральной звезды и радиопоток туманности, то, используя зависимость спектральной мощности радиоизлучения от температуры звезды, можно найти расстояние до туманности. В этом случае отпадает необходимость в данных о звездной

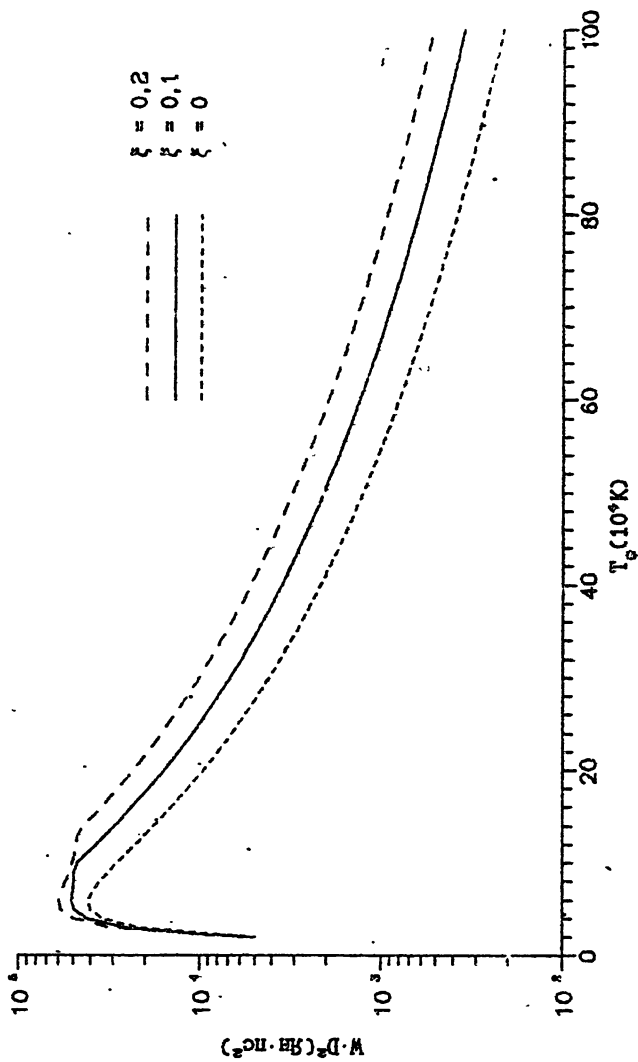


Рис. 5 Спектральная мощность радионезлучения туманности как функция температуры центральной звезды.



величине ядра и межзвездном поглощении, с которыми часто возникают затруднения. Влияние гелия и пыли на оценку расстояния в этом случае слабее, чем при использовании звездной величины ядра. Увеличение расстояния при учете гелия существенно в области высоких температур  $T_* > 10^5$  К, где оценки расстояний  $D_\xi$  и  $D_0$ , полученные с учетом и без учета гелия, связаны формулой:

$$D_\xi = D_0 \left\{ 1 + 2\xi + 4\xi(1 + 2\xi) \left[ 1 - \frac{\ln 2}{17,7 + \ln(t_e^{1,5}/\nu)} \right] \right\}^{0.5}$$

При прочих равных условиях расстояние до туманности с  $\xi = 0,1$  на 28% больше, чем до чисто водородной, а при изменении относительного содержания гелия с 10% до 20% расстояние возрастет на 22%. Расстояние до туманности с пылью меньше расстояния, вычисленного без учета пыли, в  $\psi^{-0,5}$  раз. В таблице 3 представлены результаты расчета расстояний на основе известной температуры центральной звезды, полученной методом энергетического баланса в [16], и радиопотока туманности на частоте 5 ГГц из [10]. Для всех туманностей приняты значения  $\xi = 0,1$  и  $\tau = 0$ .

Если туманность является оптически тонкой в лаймановском континууме, то наблюдаемый радиопоток меньше, чем тот, который определяется температурой центральной звезды, поэтому оценка расстояния может быть завышенной.

Таблица 3

Оценка расстояний на основе радиоотока туманности  
и температуры центральной звезды

Туманность	Исходные данные		Расстояние (пс)	
	$T_*(10^4\text{K})$	$S_{\text{БГГ}_c}(\text{Ян})$		
NGC	5873	7,76	0,048	3100
	6302	10,21	3,488	300
IC	1295	6,98	0,049	3100
	4642	6,57	0,311	3000
He	2- 12	7,01	0,105	2400
	2- 35	5,53	0,020	4800
	2- 47	2,88	0,16	1200
	2-108	5,91	0,032	3800
	2-111	19,69	0,073	1400
	2-112	13,40	0,082	1900
	2-115	4,35	0,156	1900
	2-377	2,66	0,135	1100
	2-436	9,05	0,023	4500
	Hb	4	8,54	0,180
TC	1	3,41	0,801	600
M	1- 11	2,13	0,102	800
	1- 40	11,63	0,250	1200
	1- 46	3,49	0,095	1800
Mz	2	14,24	0,075	1900
	3	5,00	0,649	800
Pc	11	10,36	0,028	3900

## ДИАПАЗОН МАСС ПЛАНЕТАРНЫХ ТУМАННОСТЕЙ

Масса - один из важнейших параметров планетарной туманности: она дает представление о массе звезды, из которой образовалась туманность. Нижней оценкой этой величины является ионизованная масса, совпадающая с полной в случае оптически тонкой за лаймановским пределом туманности. Оценим массу зоны III, окружающей звезду с температурой  $T_*$  и радиусом  $R_*$ . Радиус зоны ионизации водорода в отсутствии пыли определяется формулой [5]:

$$R_0 = \left[ \frac{1,904 \cdot t_*^3 \cdot R_*^2 \cdot T_*^{0,5} \cdot \eta \cdot G_0^2}{N_H^2 \cdot G_1} \right]^{1/2} \text{ пс}, \quad (3)$$

где  $\eta = g \cdot e^{\sigma} \cdot E_1(g)$ ,  $g = \frac{15,78}{t_*}$ ,  $t_* = 10^{-4} T_*$ ;  $E_1$  - интегральная показательная функция;  $N_H$  - концентрация атомов водорода в туман-

ности ( $\text{см}^{-3}$ );  $G_0 = \int_{\frac{15,78}{t_*}}^{\infty} \frac{iy}{y(\exp y - 1)}$ ;  $G_1 = \int_{\frac{15,78}{t_*}}^{\infty} \frac{dy}{y^4(\exp y - 1)}$ .

Максимальная масса водорода, которую может ионизировать звезда, равна:

$$\dot{M}_H = 0,1035 \cdot N_H \cdot R_*^2 \quad (M_{\odot}) \quad (4)$$

Принимая во внимание соотношение радиус - температура (1), ионизованную массу можно представить функцией температуры центральной звезды. На рис. 6 изображена зависимость произведения ионизованной массы на концентрацию атомов водорода от температуры центральной звезды при различных значениях электронной температуры туманности. Чем выше электронная температура, тем больше ионизованная масса. Функция имеет максимум при  $T_* = 56000 \text{ K}$ , который соответствует мас-

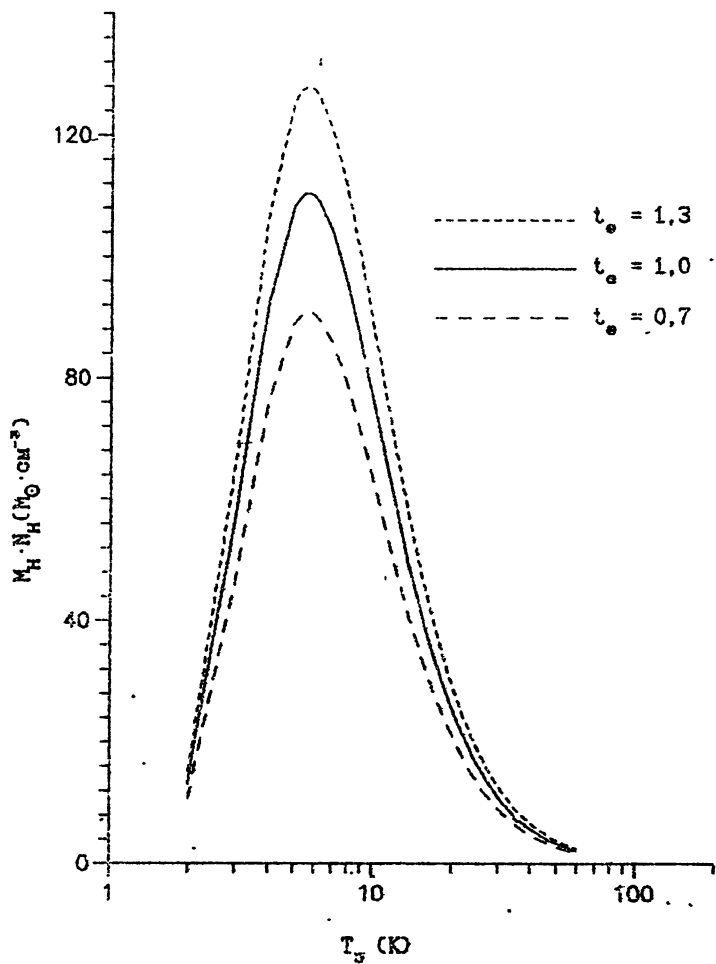


Рис. 6 Зависимость ионизованной массы водорода в туманности от температуры центральной звезды.

се водорода  $M_H = 1,1M_\odot$ , если  $T_\odot = 10^4 K$  и  $N_H = 100 \text{ см}^{-3}$ . С учетом гелия масса области III равна  $M_N = (1+2\xi)M_H$ . Общепринято, что после образования планетарной туманности центральная звезда проходит стадию сжатия с увеличением температуры. В связи с этим зависимость на рис. 5 можно интерпретировать как эволюционные изменения параметра  $M_H N_H$ , который вначале растет с ростом температуры возбуждающей звезды, а затем убывает из-за уменьшения ее радиуса.

Масса оптически тонкой туманности может быть меньше  $M_N$ , а для оптически толстой это - нижняя оценка массы. Считая, что радиус зоны III совпадает с радиусом туманности  $R_N$ , соответствующим ее угловым размерам и расстоянию, получим оценки плотности и массы для планетарных туманностей. В таблице 4 приведены угловые и линейные радиусы, концентрации атомов водорода и массы туманностей с учетом гелия, рассчитанные на основе определенных нами расстояний.

Вычисленные значения  $N_H$  являются средними по туманности. Для 33 планетарных туманностей из этого списка известны электронные плотности, найденные по запрещенным линиям в спектрах [14,15]. Полученные оценки концентрации атомов водорода находятся в хорошем согласии с электронными плотностями у всех туманностей за исключением 5 объектов: NGC 2371-2, 2610, 6058, 6833, 6905 - где электронные плотности на порядок выше, чем  $N_H$ . Расхождения между  $N_H$  и  $N_e$  могут быть связаны с неоднородностью туманностей или с завышенной оценкой расстояний. Согласие между  $N_H$  и  $N_e$ , имеющее место для большинства туманностей, свидетельствует о достоверности полученных расстояний. Нижняя оценка массы для планетарных туманностей попадает в широкий интервал от  $10^{-3}M_\odot$  до  $1,419M_\odot$ .

## Параметры планетарных туманностей

Туманность	$\theta$ (")	$R_N$ (пс)	$N_H$ ( $10^{21} \text{ см}^{-2}$ )	$M_N (M_\odot)$
NGC 2371-2	27	0,309	0,19	0,912
2610	19,5	0,344	0,16	0,973
3132	28	0,088	0,57	0,063
5873	2,7	0,041	3,76	0,036
6058	11	0,221	0,19	0,310
6210	8,5	0,054	2,41	0,067
6302	22,3	0,032	5,08	0,021
6309	6,9	0,052	2,39	0,053
NGC 6537	3,7	0,007	22,86	0,001
6543	10,0	0,030	5,24	0,021
6807	1,0	0,013	20,55	0,007
6826	12,7	0,050	2,17	0,039
6833	5,0	0,032	4,10	0,023
6842	27,5	0,211	0,27	0,369
6881	2	0,011	19,00	0,004
6891	6,3	0,046	2,35	0,035
6905	23,5	0,330	0,17	0,872
IC 289	22,5	0,086	1,16	0,109
351	3,5	0,061	2,05	0,070
1295	40,5	0,609	0,07	2,185
2003	3,3	0,054	2,53	0,067
2149	4,75	0,021	7,65	0,010
2448	4,65	0,055	2,42	0,061
3568	6	0,045	2,32	0,034

Таблица 4 (продолжение)

Туманность	$\theta$ (")	$R_N$ (пс)	$N_H$ ( $10^{21} \text{ см}^{-2}$ )	$M_N (M_\odot)$
IC 4406	17,3	0,175	0,45	0,364
4593	6	0,037	2,64	0,021
4634	4,5	0,034	4,46	0,026
4637	7,1	0,020	6,27	0,007
4642	7,7	0,112	0,86	0,175
4663	7,2	0,077	1,05	0,070
4673	7,4	0,103	0,80	0,125
4732	2	0,032	5,75	0,033
4776	3,5	0,042	3,66	0,039
4846	1	0,015	17,32	0,009
4997	0,8	0,007	49,81	0,003
J 320	3,2	0,049	2,33	0,047
A 43	40	0,058	1,54	0,044
62	81	0,079	1,34	0,094
70	21,5	0,198	0,36	0,403
78	54	0,079	0,98	0,069
He 2-12	5,3	0,062	2,67	0,079
2-35	2,5	0,059	2,33	0,066
2-47	2,5	0,015	12,65	0,006
2-108	12,5	0,230	0,30	0,522
2-111	6	0,041	1,95	0,019
2-112	7,3	0,067	1,28	0,056
2-115	2,5	0,023	11,40	0,017

Таблица 4 (окончание)

Туманность	$\theta$ (")	$R_N$ (пс)	$N_H$ ( $10^{21} \text{ см}^{-2}$ )	$M_N (M_\odot)$
He 2-138	3,5	0,017	6,17	0,004
2-142	1,7	0,009	16,38	0,002
2-377	5	0,027	4,56	0,013
2-436	5	0,109	0,80	0,150
M 1- 25	2,8	0,019	11,02	0,010
1- 40	2,9	0,017	14,30	0,009
1- 45	7,5	0,065	1,63	0,066
3- 21	2,5	0,038	3,52	0,029
Hb 4	2,8	0,022	9,23	0,013
Hb 12	1	0,006	71,80	0,002
Sh 2- 71	76	0,427	0,06	0,649
2-266	33,5	0,211	0,26	0,352
Me 2- 1	2,3	0,039	4,16	0,036
2- 2	0,7	0,012	24,19	0,008
Vy 1- 1	3,1	0,046	2,48	0,035
Ba 1	19	0,486	0,09	1,419
Cn 3- 1	2,3	0,019	7,30	0,008
VV 1- 4	63,2	0,348	0,15	0,913
PB 8	2,5	0,032	3,66	0,017
Hu 2- 1	1,4	0,012	21,15	0,005
Mz 2	11,4	0,105	0,63	0,105
	3	12,7	0,049	0,051
TC 1	4,8	0,014	16,17	0,006



Учитывая, что масса центральной звезды составляет  $0.5 \pm 0.6 M_{\odot}$ , получим, что звезды - предшественницы планетарных туманностей могли иметь массы не менее  $2M_{\odot}$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главным преимуществом созданной в настоящей работе шкалы расстояний перед существующими является отсутствие в ее основе априорных предположений о постоянстве или определенной эволюции какого-либо физического параметра для всех планетарных туманностей. В процессе анализа параметров центральных звезд и туманностей показано, что полагавшиеся ранее одинаковыми для всех объектов ионизованная масса и спектральная мощность радиоизлучения туманности изменяются в широких пределах. Рассчитаны расстояния до 75 планетарных туманностей. Учет гелия в туманности увеличивает оценку расстояния, а при учете пыли она снижается. Точность определения расстояний зависит от качества исходных данных, для ряда туманностей имеются расхождения в экспериментальных данных, полученных разными авторами. В дальнейшем, с развитием экспериментальных исследований излучения туманностей и звезд, должны повыситься точность расстояний и расшириться круг планетарных туманностей, расстояния до которых могут быть найдены предлагаемым методом.

Автор выражает благодарность проф. К. С. Станкевичу за внимание к работе и признательность Американскому астрономическому обществу за финансовую поддержку.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Sabbadin F. *Astron. & Astrophys. Suppl. Ser.* 1986. V. 64. P. 579.
2. Maciel W.J., Pottasch S.R. *Astron. & Astrophys.* 1980. V. 88. P. 1.
3. Milne D.K. *Monthly notices R. Astron. Soc.* 1982. V. 200. P. 51.
4. Станкевич К.С., Шарова О.И. *Астрон. журн.* 1983. Т. 60. С. 931.
5. Шарова О.И. *Астрон. журн.* 1992. Т. 69. С. 38.
6. Perek L., Kohoutek L. *Catalogue of Galactic Planetary Nebulae.* Prague: Academia Publ. House of the Czechoslovak Academy of Science. 1967.
7. Kaler J.B. *Astrophys. J.* 1983. V. 271. P. 188.
8. Kaler J.B. *Astrophys. J.* 1970. V. 160. P. 887.
9. Higgs L.A. *Catalog of Radio Observations of Planetary Nebulae and Related Optical Data.* Nat. Res. Council of Canada. 1971.
10. Milne D.K., Aller L.H. *Astron. & Astrophys.* 1975. V. 38. P. 183
11. Pottasch S.R., Baud B., Beintema D. et al. *Astron. & Astrophys.* 1984, V. 138. P. 10.
12. Iyengar K.V.K. *Astron. & Astrophys.* 1986. V. 158. P. 89.
13. Pottasch S.R., Wesselius P.R., Wu C.-C. et al. *Astron. & Astrophys.* 1978. V. 62. P. 95.
14. Хромов Г.С. *Планетарные туманности.* М.: Наука, 1985. С. 296.
15. Потграм С. *Планетарные туманности.* М.: Мир, 1987. С. 338.
16. Preite-Martinez A., Acker A., Koppen J. and Stenholm B. *Astron. & Astrophys. Suppl. Ser.* V. 81. P. 309.