

УДК: 524.423—335.7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И КОЛИЧЕСТВА ЗВЕЗД ТИПОВ О И В В ОБРАЗОВАНИЯХ, НАБЛЮДАВШИХСЯ В ГАЛАКТИКАХ С УФ-ИЗБЫТКОМ

М. А. КАЗАРЯН

Поступила 12 мая 1987

Принята к печати 6 июля 1987

Во многих галактиках с УФ-избытком, вошедших в списки [1—5], наблюдаются отдельные образования. В каждом из этих образований находится совокупность звезд спектральных типов О и В, которые обеспечивают свечение его газовой составляющей. В настоящей работе применен метод Занстра для определения средней температуры ионизирующего излучения и оценено количество звезд типов О и В в каждом из этих образований. Температуры, полученные для совокупностей звезд, находящихся в образовании II галактики № 2 и образованиях I, II и IV галактики № 460, меняются от 57 500 К до 30 000 К. Для количества звезд типа О5, обеспечивающих свечение газа в образовании II галактики № 2 и конденсации I галактики № 460, получились значения, равные $1.5 \cdot 10^4$ и $2.9 \cdot 10^3$ соответственно.

1. *Введение.* Во многих галактиках с УФ-избытком, вошедших в списки [1—5], наблюдаются образования, имеющие разные морфологические структуры. Среди них встречаются звездобразные, компактные, круглые с диффузными краями, вытянутые в виде полосы, иррегулярные и т. д.

В их спектрах часто наблюдаются эмиссионные линии водорода, [S II], [N II], [O II], [O III] и других ионов. Такие спектры имеют, например, образования, наблюдаемые в галактиках № 2, 5, 95, 212, 336 и 460, взятых из списков [1—5] (эти номера являются порядковыми номерами галактик в списках [1—5]). Спектры многих образований очень похожи на спектры газовых туманностей, т. е. состоят из сильных эмиссионных линий и слабого непрерывного спектра. Обычно образования, имеющие такие спектры, называются ассоциациями и сверхассоциациями. Среди образований встречаются и такие, спектры которых состоят из узких эмиссионных линий и непрерывного спектра с умеренными и сильными интенсивностями. Обычно такими спектрами обладают многие галактики с узкими эмиссионными линиями.

Как в галактиках с узкими эмиссионными линиями, так и в эмиссионных образованиях, некоторая часть звездного состава является звездами

типов О и В. Кванты, излучаемые в лаймановском континууме совокупностью этих звезд, т. е. L_c -кванты, обеспечивают свечение газовой составляющей отмеченных объектов. Каждая из этих звезд излучает разное количество L_c -квантов, так как их температуры и размеры, по всей вероятности, отличаются друг от друга. С другой стороны, эти величины для каждой из этих звезд определить невозможно. Трудно также оценить действительное количество звезд О и В в этих объектах. Поэтому совокупностям звезд типов О и В в каждом образовании надо приписать такое количество звезд заданного радиуса и температуры, чтобы суммарное количество L_c -квантов соответствовало количеству L_c -квантов, получившихся из наблюдений.

Д. В. Видман [6], принимая, что свечение газовой составляющей галактик Маркаряна с диффузными спектрами происходит за счет L_c -квантов, испускаемых звездами типа О7, подсчитал их количество в этих галактиках. По его расчетам в 10 галактиках Маркаряна, количество звезд такого класса меняется от $8 \cdot 10^2$ до $1.5 \cdot 10^5$.

2. *Метод определения температуры суммарного излучения звезд типов О и В в галактических образованиях.* В настоящей работе мы намерены определить температуру суммарного излучения звезд типов О и В в образованиях, средний размер каждой из этих звезд, а также их количество. Такая температура имеет смысл эффективной температуры, которая обозначается через T . То же самое можно сказать о количестве звезд и об их размерах, они обозначаются N и R соответственно. Эти величины определим для некоторых образований, наблюдавшихся в галактиках № 2, 95, 212 и 460 из списков [1—5], данные спектрофотометрического исследования которых приведены в работах [7—9]. Для определения температуры излучения совокупностей звезд типов О и В, находящихся в этих образованиях, можно применять методы Занстра и В. А. Амбарцумяна. Хотя эти методы были разработаны для определения температуры ядер планетарных туманностей, их можно распространить также и на исследуемые нами объекты.

Как известно, при определении температуры ядер планетарных туманностей методами Занстра производится сравнение их излучения в видимой части спектра с излучением в области $\lambda < 912 \text{ \AA}$, т. е. с излучением лаймановского континуума. При этом принимается, что ядра планетарных туманностей излучают по закону Планка, т. е. весь спектр каждого ядра описывается одной температурой. Кроме того предполагается, что все L_c -кванты, испускаемые ядром туманности, поглощаются самой туманностью, и их число равняется числу бальмеровских квантов, включая бальмеровский континуум.

В [10] приведены формулы Занстра и В. А. Амбарцумяна, посредством которых определяются температуры ядер планетарных туманностей.

Отмеченные выше объекты имеют особенности ассоциаций и сверхассоциаций. В них кроме звезд типов О и В могут быть звезды более поздних классов, поэтому спектр их общего излучения будет отличаться от спектра одной звезды определенного класса.

UBV-фотометрические исследования образований, выполненные многими авторами, показывают, что излучение этих объектов в U и B областях спектра в основном обусловлено звездами типов О и В. Например, для 14 ассоциаций в БМО по фотоэлектрическим определениям Бокка [11] получаются средние цвета $\overline{B-V} = -0^m.11$, $\overline{U-B} = -0^m.90$. Для многих сверхассоциаций Р. К. Шахбазян [12] получила $\overline{B-V} = -0^m.01$, $\overline{U-B} = -0^m.75$. Исходя из этих данных, в последней работе делается вывод, что светимости и цвета этих объектов обусловлены в основном О и В звездами. Таким образом можно считать, что излучение синей, фиолетовой и ультрафиолетовой частей спектра этих образований в основном обусловлены именно этими звездами. Поэтому целесообразно определить температуры совокупностей звезд типа О или В методом Занстра при помощи отдельных линий бальмеровской серии, попадавших в эти области спектра. Такими линиями являются H_2 , H_7 , H_8 , H_9 и другие более коротковолновые члены бальмеровской серии.

Метод, который позволяет определить температуры ядер планетарных туманностей при помощи любой эмиссионной линии бальмеровской серии, нейтрального или ионизованного гелия, разработал Занстра [13]. Общую формулу для линий бальмеровской серии он получил в следующем виде:

$$\int_{x_0}^{\infty} \frac{x^2 dx}{e^x - 1} = q_i A_i \frac{x_i^3}{e^{x_i} - 1}, \quad (1)$$

где $q_i = \frac{\text{число квантов } Ba + B_{ac}}{\text{число квантов в } H_i}$, $x = \frac{h\nu}{kT}$, $x_i = \frac{h\nu_i}{kT}$, $x_0 = \frac{h\nu_0}{kT}$, T — температура, $A_i = \frac{E_i}{\nu_i E_i^*}$, где E_i — полная энергия, излучаемая туманностью в i -той бальмеровской линии, ν_i — частота данной линии а E_i^* — энергия, излучаемая звездой, ядром туманности в единичном интервале частот вблизи i -той бальмеровской линии.

Уравнение (1) справедливо при предположении, что все L_c -кванты поглощаются туманностью. Числовые величины q_i зависят от электронной температуры и определяются на основе рекомбинационной теории свечения планетарных туманностей и приведены в [13].

Для определения температур звезд при помощи формулы (1) надо знать величины A_i . Они определены с помощью величин их эквивалентных ширин (W_{λ_i}), приведенных в [7—9]. Не трудно показать, что для любой эмиссионной линии $A_i = \frac{W_{\lambda_i}}{\lambda_i}$. Значения A_i приведены в табл. 1, там кро-

ме линий бальмеровской серии приведены также A_i для линий He I $\lambda\lambda$ 5876, 4471 и He II λ 4686. При помощи величины A_i этих линий тоже можно определить температуры совокупностей звезд образований. Аналогичное (1) уравнение можно написать и для линии ионизованного гелия He II λ 4686 при предположении, что оптическая толщина туманностей за границей ионизации дважды ионизованного гелия больше единицы. Оно имеет вид:

$$\int_{4x_0}^{\infty} \frac{x^2 dx}{e^x - 1} = q(4686) A(4686) \frac{x_{4686}^3}{e^{x_{4686}} - 1}, \quad (2)$$

причем $q(4686) = 10.5$ при $T_e = 15000$ К.

Таблица 1

ЗНАЧЕНИЯ A_i ДЛЯ РАЗНЫХ ЭМИССИОННЫХ ЛИНИЙ
ОБРАЗОВАНИЙ

A_i	№ галактики и образования						
	2 (II)	95 (I)	212 (I)	460 (I)	460 (II)	460 (III)	460 (IV)
A_{α}	0.0313	0.0130	0.0457	0.0169	0.0130	0.0130	0.0185
A_{β}	0.0102	0.0038	0.0103	0.0075	0.0039	0.0024	0.0061
A_{γ}	0.0035	0.0022		0.0028	0.0028	0.0010	0.0028
A_{δ}	0.0012	0.0015	0.0024	0.0021	0.0017		0.0019
A_{ϵ}	0.0010			0.0016	0.0012		0.0008
A_{ζ}	0.0008			0.0015	0.0009		0.0008
A_{5876}				0.0013	0.0014		0.0011
A_{4471}				0.0004	0.0008		
A_{4686}	0.0012			0.0003			

Наконец, для линий нейтрального гелия Аллер и Занстра [14] дают опять при предположении, что оптическая толщина за границей ионизации гелия больше единицы,

$$\int_{1.81x_0}^{\infty} \frac{x^2 dx}{e^x - 1} = q(\text{HeI}) A(\text{HeI}) \frac{x_{\text{HeI}}^3}{e^{x_{\text{HeI}}} - 1} \quad (3)$$

Значения q (He I) для линий нейтрального гелия 5876, 4471 и 4026 и при электронной температуре $T_e = 13\,500$ К, взятые из [14], приведены в табл. 2.

Таблица 2
ЗНАЧЕНИЯ $1/q$ ДЛЯ ЛИНИИ He I

Линия	$1/q$
He I λ 5876	0.1100
He I λ 4471	0.0197
He I λ 4026	0.0082

Значения температур совокупностей звезд, включенных в образования, определенные при помощи (1), (2) и (3), приведены в табл. 3. Из нее видно, что почти у всех объектов температура увеличивается от T_e до T_i , но они мало отличаются друг от друга. Самая большая разница наблюдается у сверхассоциации II галактики № 460, которая равна 3900 К, что по сравнению со средним значением температуры совокупности звезд этого объекта составляет примерно 18%. Факт, что для совокупности звезд данного образования температура T_i , полученная при помощи линии H_α , самая низкая по сравнению с температурами, полученными при помощи других линий бальмеровской серии, по-видимому, является результатом того, что на излучение образования в области линии H_α , кроме излучения звезд типов О и В, значительно влияют также излучения звезд более поздних спектральных классов.

Для сравнения в табл. 3 приведены также температуры T_Σ , которые были определены при помощи суммарного вклада линий бальмеровской серии. Они определены общей формулой Занстра, приведенной в [10]. Из табл. 3 видно, что T_Σ систематически более низкие по сравнению с другими температурами. Это, по-видимому, является результатом того, что при расчете в сумме правой части формулы [10] не была учтена доля всех членов бальмеровской серии, а также бальмеровского континуума.

Примечательно, что температуры, полученные при помощи линий He I $\lambda\lambda$ 5876 и 4471 для совокупностей звезд сверхассоциаций I, II и IV, более высокие, чем температуры, полученные с помощью водородных линий; причем разницы довольно большие, порядка 10 000 К.

Что касается температур, полученных для совокупностей звезд объекта II галактики № 2 и сверхассоциации I галактики № 460 при помощи линии He I λ 4686, то они самые высокие. Эти результаты, по всей вероятности, можно объяснить тем, что оптические толщины газовой составляющей этих объектов для квантов, находящихся за границей лаймановского

континуума ($\lambda = 912 \text{ \AA}$), за границей ионизованного гелия ($\lambda = 504 \text{ \AA}$) и за границей дважды ионизованного гелия ($\lambda = 228 \text{ \AA}$), разные.

Таблица 3

ТЕМПЕРАТУРЫ СОВОКУПНОСТЕЙ ЗВЕЗД ОБРАЗОВАНИЙ,
ОПРЕДЕЛЕННЫЕ ПРИ ПОМОЩИ РАЗНЫХ ЛИНИЙ

T	№ галактики и образования						
	2 (II)	95 (I)	212 (I)	460 (I)	460 (II)	460 (III)	460 (IV)
T_a	22400 К	19500 К	23700 К	20400 К	19300 К	19300 К	20700 К
T_p	23300	21100	24300	23200	20900	19300	22100
T_γ	22400	21900		22900	22900	19400	22900
T_δ	22100	22600	24800	24000	23200		24000
T_{471}				33100	35500		
T_{576}				30300	30500		30000
T_{488}	57500			48000			
$T(\text{H}_\alpha)$	54000			45000			
$T(\text{H}_\beta)$	57500			45000			
T_Σ	20400	18400	20900	19500	18800	17600	19300

Если предполагать, что оптическая толщина газа для L_c -квантов, излучаемых за границей дважды ионизованного гелия, т. е. для длин волн $\lambda \leq 228 \text{ \AA}$, больше единицы, то можно определить температуру для совокупности звезд объекта II галактики № 2 и сверхассоциации I галактики № 460.

Исходя из такого предположения, в [15] было получено следующее соотношение:

$$\int_{4x_0}^{\infty} \frac{x^2 dx}{e^x - 1} = 0.90 \frac{I_{488}}{I_{\text{H}\beta}} \sum_{B_i} A_i \frac{x_i^3}{e^{x_i} - 1}. \quad (4)$$

При использовании одной бальмеровской линии формула (4) принимает вид:

$$\int_{4x_0}^{\infty} \frac{x^2 dx}{e^x - 1} = 0.90 \frac{I_{488}}{I_{\text{H}\beta}} q_i A_i \frac{x_i^3}{e^{x_i} - 1}. \quad (5)$$

При вычислениях значения $\frac{I_{488}}{I_{\text{H}\beta}}$ были взяты из работ [7, 8], q_i из работ [13, 14], а A_i из табл. 1. Температуры, определенные по формуле (5),

тоже приведены в табл. 3. Они обозначены через $T(\text{H}_2)$ и $T(\text{H}\beta)$. Из них видно, что они очень близки к температуре T_{4886} . Это естественно, так как обе вычислены при одинаковых предположениях. В пользу предположения, что оптическая толщина L_c -квантов за границей дважды ионизованного гелия в планетарных туманностях имеет место, говорит стратификация туманностей. По всей вероятности, такой характер имеют также газовые составляющие изученных объектов. Поэтому температуры, полученные по формулам (2) и (5), близки к истинным температурам совокупностей звезд этих образований.

Таким образом, для совокупностей звезд, обеспечивающих свечение газовых составляющих образований, в качестве истинной температуры (T) для объекта II галактики № 2 и сверхассоциации I галактики № 460 принимается среднее значение температуры T_{4886} и $T(\text{H}\beta)$, а для сверхассоциации II галактики № 460 — среднее T_{4711} и T_{5876} , сверхассоциации IV галактики № 460 — значение T_{5876} . Эти значения температур приведены в табл. 4, им соответствуют спектральные классы O и B. Используя температуры совокупностей звезд объекта II галактики № 2 и сверхассоциаций I, II и IV галактики № 460, можно определить оптические толщины τ_c для их газовой составляющей.

Таблица 4

ДАННЫЕ ОБРАЗОВАНИЙ И ЗВЕЗД, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ
СВЕЧЕНИЕ ГАЗОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ОБРАЗОВАНИЙ

Наименование величин	№ галактики и образования			
	2 (II)	460 (I)	460 (II)	460 (IV)
T	57500 К	46500 К	33000 К	30000 К
спектральный тип	O5	O5	O8	B0
M_{pg}°	$-5^m.0$	$-5^m.0$	$-4^m.4$	$-3^m.7$
R (в R_{\odot})	9.6	10.3	9.1	6.9
$NL_c^{\circ} \times 10^{-47}$	645	255	15.6	2.3
τ_c	0.05	0.10	0.57	1.03
NL_c (набл.) $\cdot 10^{-51}$	47.0	7.0	3.0	3.0
$N \times 10^{-3}$	15	2.9	4.4	15
M_{pg} (выч.)	$-15^m.4$	$-13^m.7$	$-13^m.5$	$-14^m.1$
M_{pg} (набл.)	$-18^m.4$	$-15^m.8$	$-15^m.5$	$-15^m.1$

При выводе формулы (1) предполагалось, что все L_c -кванты, испускаемые ядром туманности, поглощаются самой туманностью. Когда некоторая часть L_c -квантов выходит из туманности, т. е. не поглощается ею, то вместо формулы (1) надо использовать ее точное выражение. В [15] она представлена в следующем виде:

$$(1 - e^{-\tau_c}) \int_{x_0}^{\infty} \frac{x^2 dx}{e^x - 1} = q_i A_i \frac{x_i^3}{e^{x_i} - 1} \quad (6)$$

Значения τ_c , вычисленные по формуле (6) для газовой составляющей объекта II галактики № 2 и сверхассоциаций I, II и IV галактики № 460, приведены в табл. 4.

Для газовой составляющей сверхассоциации I галактики № 460 определена также оптическая толщина τ_c в частотах L_c -излучения за границей однажды ионизованного гелия ($\lambda \leq 504 \text{ \AA}$), значение которой равно 0.5. Температуры, приведенные в табл. 4, являются средними температурами звезд, входящих в ассоциации, т. е. каждой звезде данной ассоциации присваивается одно и то же среднее значение температуры.

3. *Количество звезд типов O и B в образованиях.* При помощи температур, приведенных в табл. 4, можно определить количество звезд, входящих в данную совокупность.

В работе Мортон [16] приведена таблица, где установлена связь между температурами и спектральными подклассами ранних звезд. При помощи этой таблицы определены спектральные классы звезд совокупностей. Они меняются от класса O5 до B0 и приведены в табл. 4. Для определения абсолютных фотовизуальных звездных величин звезд совокупностей использовались их спектральные классы и диаграмма Герцшпрунга—Рессела, построенная для звезд ассоциации η и χ Персея [17]. Затем, используя показатели цветов C_{int} , для спектральных классов этих звезд были определены абсолютные величины в фотографических лучах. Они тоже приведены в табл. 4. Используя абсолютные звездные величины и температуры этих звезд, приведенные в табл. 4, можно определить их радиусы. Для этого используется соотношение, приведенное в [18], которое имеет вид:

$$M_{\text{RF}} = \frac{36700}{T} - 5 \lg R - 0.72, \quad (8)$$

где R выражено в радиусах Солнца. Радиусы звезд совокупностей, определенные соотношением (8), тоже приведены в табл. 4 и меняются от 6.9 до 10.3.

В работе Мортон [16] приведены результаты вычислений для моделей атмосфер звезд ранних спектральных классов. Там приведена таблица, которая устанавливает связь между температурой, меняющейся от 21910 до 75000 K и количеством L_c -квантов, испускаемых при данной температуре с одного кв.см поверхности звезды. Используя данные этой таблицы, для каждого значения температур, приведенных в табл. 4, мы

определили количество L_c -квантов, испускаемых с одного кв.см поверхности звезды данной совокупности. Затем определено общее количество L_c -квантов, NL_c^* , которое должно испускаться каждой звездой данной совокупности. Оно тоже приведено в табл. 4. Из этих квантов только часть $(1 - e^{-\tau})$ поглощается газовой составляющей данного образования, остальная часть выходит из образования. В табл. 4 приведено также общее количество L_c -квантов NL_c (набл.), полученных из наблюдений для данного образования. Количество звезд (N) данного спектрального класса, входящих в данную совокупность, приведенное в табл. 4, равно $N = NL_c / (1 - e^{-\tau}) NL_c^*$. Значения N для этих совокупностей приведены в табл. 4. В последних двух строках этой таблицы приведены абсолютные фотографические звездные величины M_{pg} (выч.) и M_{pg} (набл.). Значения первых из них определяются при помощи N и M_{pg}^* и являются абсолютными звездными величинами звезд совокупностей. Значения вторых определяются из наблюдений и являются абсолютными величинами образований.

4. *Обсуждение результатов.* В работе применяются методы Занстра для определения средних температур совокупностей звезд типов О и В образований. Используя эти температуры, мы определили количества звезд совокупностей, которые необходимы для свечения газовых составляющих образований. С этой целью были использованы спектрофотометрические результаты, полученные для 7 образований, наблюдавшихся в галактиках № 2, 95, 212 и 460.

Самые высокие температуры были получены у совокупностей звезд образований II галактики № 2 и I галактики № 460, которые равны 57 500 К и 46 500 К соответственно. Эти температуры, по всей вероятности, близки к истинным температурам совокупностей звезд этих образований.

Количество совокупностей звезд типа О в образованиях II галактики № 2 и I и II галактики № 460 меняется от $2.9 \cdot 10^3$ до $1.5 \cdot 10^4$. Последнее значение принадлежит совокупности звезд O5 объекта II галактики № 2.

Как было сказано выше, в [6] оценено количество звезд типа O7 в 10 галактиках Маркаряна. Интервал этих величин более широкий, чем интервал значений, полученных нами.

Наконец, приведем результаты подсчетов звезд ранних спектральных классов в нашей Галактике, выполненных Робертсом [19]. Его результаты таковы: в нашей Галактике количество звезд типов О и В равно $6 \cdot 10^3$ и $2 \cdot 10^6$ соответственно. Большинство из них входит в ассоциации

и скопления и связано с газовыми туманностями, свечение которых происходит за счет L_c -квантов, излучаемых этими звездами.

Сравнивая эти результаты с данными, приведенными в табл. 4 можно заключить, что в объекте II галактики № 2 количество звезд класса О больше, чем в нашей Галактике, несмотря на то, что светимость нашей Галактики намного больше светимости изученного нами объекта. Что касается сверхассоциаций I и II галактики № 460, то они по количеству звезд типа О мало уступают нашей Галактике, а по светимости — примерно на два порядка. Количество звезд типа В в сверхассоциации IV галактики № 460 примерно на два порядка ниже, чем количество звезд такого класса в нашей Галактике.

Из табл. 4 видно, что светимости образования II галактики № 2 и сверхассоциаций I, II и IV галактики № 460 примерно в 15.8, 6.9, 6.3 и 2.5 раз больше, чем светимости совокупностей звезд типов О и В, входящих в соответствующие образования. Нам кажется, что этот результат является естественным, так как в эти образования кроме звезд этих типов входят также звезды других спектральных классов и газовая составляющая, которая в фотографических лучах излучает не меньше, чем звезды. С этой точки зрения эти объекты очень похожи на планетарные туманности, поскольку они имеют такую же наблюдательную особенность.

Таким образом, эти объекты и подобные им, наблюдавшиеся в разных галактиках с УФ-избытком, являются молодыми образованиями, где возникает огромное количество звезд типов О и В и газовых составляющих. Их светимости в основном обусловлены именно этими звездами и газом.

Ереванский государственный
университет

THE DETERMINATION OF THE TEMPERATURE AND QUANTITY OF O AND B STARS IN THE CONDENSATIONS OBSERVED IN THE GALAXIES WITH UV EXCESS

M. A. KAZARIAN

In many galaxies with UV excess from lists [1—5] condensations are observed. In each of these condensations there is a group of O and B stars which ensure their luminous gaseous component. In this paper the method for obtaining the quantity of O and B stars, which are found in each of these groups, has been suggested. The temperature obtained for groups of these stars which are found in the condensations of galaxy No. 2 and condensations I, II and IV of galaxy No. 460

changes from 57500 K to 30000 K. The quantities of the stars in groups, the spectral class of which is O5 and which are found in the condensation II galaxy No. 2 and in I galaxy No. 460 are equal to $1.5 \cdot 10^4$ and $2.9 \cdot 10^3$ respectively.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Казарян, *Астрофизика*, 15, 5, 1979.
2. М. А. Казарян, *Астрофизика*, 15, 193, 1979.
3. М. А. Казарян, Э. С. Казарян, *Астрофизика*, 16, 17, 1980.
4. М. А. Казарян, Э. С. Казарян, *Астрофизика*, 18, 512, 1982.
5. М. А. Казарян, Э. С. Казарян, *Астрофизика*, 19, 213, 1983.
6. D. W. Weedman, *Astrophys. J.*, 171, 5, 1972.
7. А. А. Егиазарян, М. А. Казарян, Э. Е. Хачикян, *Астрофизика*, 14, 263, 1978.
8. М. А. Казарян, Э. С. Казарян, *Астрофизика*, 28, 39, 1988.
9. М. А. Казарян, В. С. Тамазян, *Письма в Астрон. ж.*, 7, № 11, 648, 1981.
10. В. В. Соболев, *Теоретическая астрофизика*, Наука, М., 1975.
11. В. J. Vok, P. F. Vok, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 124, 435, 1962.
12. Р. К. Шахбазян, *Астрофизика*, 6, 367, 1970.
13. H. Zanstra, *Bull. Astron. Inst. Netherl.*, 15, 237, 1960.
14. L. H. Aller, H. Zanstra, *Bull. Astron. Inst. Netherl.*, 15, 249, 1960.
15. Г. А. Гурвадян, *Планетарные туманности*, Наука, М., 1962.
16. D. C. Morton, *Astrophys. J.*, 158, 629, 1969.
17. A. Blaauw, *Bull. Astron. Inst. Netherl.*, 11, 433, 1952.
18. Д. Я. Мартынов, *Курс практической астрофизики*, Наука, М., 1977.
19. M. S. Roberts, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, 69, 59, 1957.