

Н 3-75: ПЛАНЕТАРНАЯ ТУМАННОСТЬ С ДВОЙНОЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЗВЕЗДОЙ NSV 16624

© 2020 г. В. П. Архипова¹, Н. П. Иконникова^{1*}, М. А. Бурлак¹, А. В. Додин¹

¹Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Поступила в редакцию 10.07.2020 г.

После доработки 22.07.2020 г.; принята к публикации 23.07.2020 г.

Н 3-75 — планетарная туманность среднего возбуждения с двойной центральной звездой, состоящей из горячего субкарлика с $T_{\text{hot}} \sim 10^5$ К и холодного гиганта. В работе приводятся результаты наших фотометрических и спектральных наблюдений, полученных в 2020 г., и анализируются данные из литературы. Измерен блеск холодного компонента системы в $VR_C I_C JHK$ полосах. Измерены относительные интенсивности эмиссионных линий в спектре планетарной туманности Н3-75, получена оценка поглощения света, определены параметры газовой оболочки. Определены спектральный класс и класс светимости холодной звезды К0III, проанализирован ее спектр. Получены оценки расстояния до объекта ($d \sim 3660$ пк) и светимости компонентов двойной системы: $L_{\text{cold}} \sim 50 L_{\odot}$ и $L_{\text{hot}} \sim 160 L_{\odot}$. Горячий субкарлик со своими параметрами T_{hot} и L_{hot} попадает на трек охлаждения post-AGB звезд.

Ключевые слова: планетарные туманности, фотометрические и спектральные наблюдения, двойные звезды, эволюция.

DOI: 10.31857/S0320010820090016

ВВЕДЕНИЕ

Поиски и исследование двойных центральных звезд в планетарных туманностях (ПТ) крайне важны как для объяснения морфологии ПТ, так и для уточнения галактической шкалы их расстояний. Имеющиеся статистические шкалы в настоящее время в большинстве случаев дают ошибку расстояния до 50%.

Большим прорывом в деле определения расстояний, в том числе и до ПТ, стала миссия Gaia. Во втором выпуске каталога Gaia DR2 (2018) для немалого количества ПТ определены параллаксы, однако оценки расстояний по параллаксам до ПТ, которые в общей массе являются далекими объектами, требуют проверки.

До сих пор надежные индивидуальные определения расстояний имеются всего для нескольких десятков ПТ, что явно недостаточно для уточнения нуля-пункта статистических шкал. Новые оценки индивидуальных расстояний до ПТ по компонентам в двойных ядрах должны поэтому приветствоваться.

ПТ Н3-75 = PN 193.6-09.5 с координатами $05^{\text{h}}40^{\text{m}}45^{\text{s}}$, $+12^{\circ}21'23''$ (2000) была открыта Г. Аро

в 1953 г. (Аро и др., 1953). Диаметр ее внутренней яркой части составляет $24''$, это круглая туманность с двумя оболочками, внешняя более слабая прослеживается до $70''$ от центра (Лютц, Лейм, 1987). В центре туманности наблюдается звезда с $m(pg) = 14^{\text{m}}$ (Когоутек, 1985). Туманность имеет высокую степень возбуждения спектра, как было показано в работах Акер и др. (1992), Калера и др. (1996). Параметры туманности и ее химсостав определялись неоднократно, в частности, Калером и др. (1996), Костой и др. (2004), Милановой и Холтыгиным (2009), Генри и др. (2010). Н 3-75 с ее пространственно-кинематическими характеристиками и химсоставом принадлежит II типу ПТ по Пеймберту (Киреза и др., 2007).

Фотометрические данные о центральной звезде крайне немногочисленны. В 1979–1981 гг. Вайтлок (1985) измерила ее JHK -величины: $J = 12^{\text{m}}.13$, $H = 11^{\text{m}}.50$, $K = 11^{\text{m}}.32$ с точностью $\pm 0^{\text{m}}.01$, и отметила, что звезда может быть переменной в этом диапазоне. В соответствии с этим утверждением звезда была включена в каталог заподозренных переменных под номером NSV 16624 без указания типа переменности. В обзоре 2MASS приводятся измерения ИК-блеска, выполненные 29 сентября 1998 г.: $J = 12^{\text{m}}.00$, $H = 11^{\text{m}}.46$, $K_s = 11^{\text{m}}.33$.

*Электронный адрес: ikonnikova@gmail.com

Таблица 1. ИК-фотометрия звезд сравнения и центральной звезды ПТ Н 3-75

ID 2MASS	<i>J</i>	<i>H</i>	<i>K_S</i>	<i>J</i> (МКО)	<i>H</i> (МКО)	<i>K</i> (МКО)
05404316+1221320	13.788	13.372	13.326	13.757	13.360	13.311
05404760+1221445	13.651	13.206	13.195	13.621	13.193	13.181
05404531+1220232	13.870	13.407	13.315	13.833	13.398	13.298
05404688+1220115	12.966	12.772	12.730	12.951	12.760	12.721
05405020+1220154	12.856	12.529	12.415	12.827	12.521	12.401
05403648+1221162	12.680	12.375	12.237	12.650	12.368	12.223
05403776+1220142	12.602	12.252	12.134	12.571	12.244	12.119
05404497+1221225	12.042	11.481	11.379	11.997	11.472	11.363

Согласно частному сообщению Сандулека (1984), центральная звезда очень красная, он оценил ее спектральный класс как К.

Наблюдения Н3-75 космическим телескопом Хаббла (Чардулло и др., 1999) по программе поиска двойственности ядер планетарных туманностей не обнаружили второго компонента двойной, а 18 августа 1993 г. были получены звездные величины NSV 16624: $V = 14^m24$, $I_C = 13^m08$, $(V - I)_C = +1.16$. Авторы отмечают, что их фотометрические измерения звезды максимально свободны от накладывающегося эмиссионного фона планетарной туманности, а точность оценок составляет $\pm 0^m02$.

Имея указанные выше, а также новые, полученные нами фотометрические и спектральные данные, мы решили в настоящей работе уточнить спектральный класс и класс светимости красного компонента, предполагая, что он находится в паре с горячей слабой в оптической области звездой, возбуждающей излучение туманности Н 3-75. Это уточнение позволило определить расстояние до туманности, а также оценить светимости компонентов двойной системы. Кроме того, мы предлагаем наблюдателям провести наблюдения красного компонента двойной звезды, чтобы подтвердить или отвергнуть заподозренную у него переменность блеска.

НАБЛЮДЕНИЯ

ИК-фотометрия

Новые наблюдения Н 3-75 были получены 10 марта 2020 г. (JD = 2458919.21) в ближней ИК-области. Наблюдения проводились на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории (КГО) ГАИШ МГУ с помощью камеры-спектрографа

ASTRONIRCAM (Наджиб и др., 2017) в режиме прямых снимков в фотометрических полосах *JHK* системы МКО. Камера оборудована ПЗС-детектором HAWAII-2RG размером 2048×2048 пикселей. При фотометрических наблюдениях эффективно используется только центральная часть матрицы размером 1024×1024 пикселей. В поле зрения приемника попадает область $4'6 \times 4'6$.

Сравнительная фотометрия проводилась с помощью программы Maxim DL-6. В качестве стандартов использовались звезды из каталога 2MASS. В табл. 1 приведены звезды сравнения с их величинами в системах 2MASS и МКО. Пересчет звездных величин из 2MASS в МКО проводился по формулам из работы Леггетта и др. (2006). Величины, полученные нами для центральной звезды ПТ Н 3-75 — 2MASS05404497+1221225 — по наблюдениям 10 марта 2020 г., приведены в последней строке табл. 1.

VRCI_C фотометрия

В течение трех ночей в марте–апреле 2020 г. нами были получены снимки Н 3-75 в трех фотометрических полосах системы Джонсона–Кузинса *VRCI_C*. Наблюдения проводились на 60-см рефлекторе КГО ГАИШ МГУ, оснащенный ПЗС-камерой Andor iKon-L (2048×2048 пикселей, размер пикселя 13.5 мк, масштаб 0.67 угл. сек на пиксель) (подробнее см. Бердников и др., 2020). Наблюдения и первичная обработка кадров, включающая исправление за темновой ток, нулевой уровень и плоское поле, проводились с помощью программы Maxim DL-6. На рис. 1 показан участок снимка в фильтре *V* ПТ Н 3-75, полученного 2020-03-28.

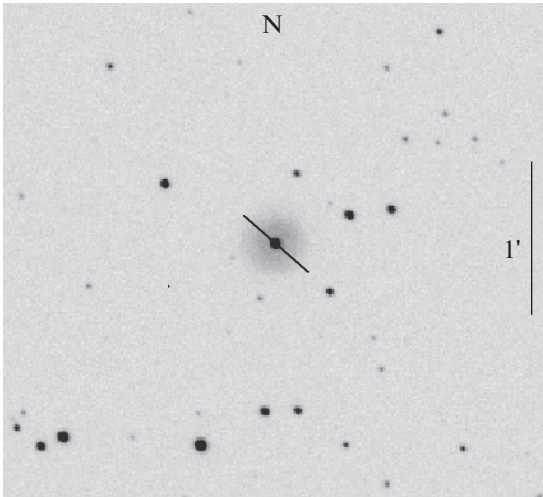


Рис. 1. Ближайшие окрестности ПТ Н 3-75 в фильтре V . Снимок получен 28 марта 2020 г. На снимке показано положение щели при спектральных наблюдениях.

Звездные величины центральной звезды ПТ Н 3-75 получены в результате сравнения с опорными звездами, сведения о которых взяты из работы Долана и Матье (2002) и содержатся в табл. 2. По опорным звездам для каждой пары снимков в разных полосах были получены коэффициенты B уравнений вида $M_i = B_0^{ik} \times m_i + B_1^{ik} \times m_k + B_2$, где m — инструментальные v, r, i величины, M — величины V, R_C, I_C в системе Джонсона—Кузинса. Таким образом, для каждой полосы мы получили пару значений звездных величин в системе Джонсона—Кузинса, рассчитанных с помощью двух других полос. Для звезд поля расхождения между ними составили не более 0^m001 . Поскольку все опорные звезды расположены в южной части поля, не исключено наличие систематической ошибки.

Для определения величин центральной звезды было необходимо учесть вклад туманности. Спектральные данные, представленные ниже, указывают на кольцеобразную форму туманности с максимальной яркостью в линиях [OIII] и H α на расстоянии $r \sim 4''8$ от центральной звезды и приблизительно линейным падением яркости от максимума к центру и к периферии. Мы построили радиальный профиль яркости туманности, усреднив отсчеты в концентрических кольцах толщиной около $0''75$ и центром, совпадающим с центральной звездой. Затем в интервале $4''8$ – $28''5$ профиль яркости туманности аппроксимировался линейной функцией. Яркость внутренней области туманности ($r < 4''8$) была рассчитана в предположении, что ее падение от $r = 4''8$ к центру симметрично падению от $r = 4''8$ наружу. Рассчитанное распределение

яркости туманности было вычтено из суммарного изображения, а потом измерено излучение от центральной звезды. Для сравнения мы измерили также суммарное излучение звезды и туманности в той же апертуре. Вклад туманности составил $0^m27, 0^m1, 0^m03$ в полосах V, R_C, I_C соответственно. Это можно считать верхней оценкой погрешности величин центральной звезды. Затем инструментальные величины ядра ПТ были пересчитаны в систему Джонсона—Кузинса с использованием коэффициентов B , рассмотренных в предыдущем абзаце.

Данные о фотометрии центральной звезды ПТ Н 3-75 приведены в табл. 3. В качестве погрешности указано среднее квадратичное отклонение за ночь.

Спектральные наблюдения

Спектральные наблюдения Н 3-75 были проведены 3 марта 2020 г. на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ с помощью двухлучевого спектрографа низкого разрешения. Подробно инструмент описан в статье Потанина и др. (2020). В качестве приемников используются камеры Andor Newton 940P с ПЗС E2V CCD42-10 формата 512×2048 пикселей. Наблюдения проводились с длиной щелью шириной $1''0$ в спектральном диапазоне $\lambda 3500$ – 7500 . Щель выставлялась вертикально по направлению на зенит, чтобы минимизировать влияние атмосферной рефракции. Позиционный угол составил 40° (рис. 1). Было получено по три кадра с экспозицией 600 с. Редукция данных включала исправление за нулевой уровень, плоское поле и темновой ток. Из изображения двумерного спектра удалялись следы космических частиц. Для исправления за спектральную чувствительность приемника наблюдались спектры

Таблица 2. $V R_C I_C$ -фотометрия опорных звезд

Обозначение	V	R_C	I_C
J054025.7+121142	13.974	13.230	12.570
J054037.0+121204	12.483	11.913	11.437
J054040.1+121106	13.269	12.540	11.883
J054040.9+121035	12.848	12.330	11.858
J054044.4+121034	13.907	13.381	12.896
J054048.1+121128	14.674	14.303	13.930
J054052.3+121113	14.983	14.326	13.715
J054110.2+121149	14.386	13.916	13.432

Таблица 3. $VR_C I_C$ -фотометрия NSV 16624

Дата	JD	V	R_C	I_C
2020-03-09	2458918.288	14.318 ± 0.003	13.655 ± 0.019	13.020 ± 0.011
2020-03-28	2458937.204	14.333 ± 0.013	13.660 ± 0.010	13.007 ± 0.005
2020-04-03	2458943.207	14.335 ± 0.009	13.665 ± 0.005	13.016 ± 0.013

Таблица 4. Наблюдаемые относительные интенсивности эмиссионных линий ПТ Н 3-75 в шкале $F(H\beta) = 100$ по данным из литературы и новым наблюдениям

$\lambda, \text{\AA}$	Ион	$F(\lambda)$, Калер и др. (1996)	$F(\lambda)$, Генри и др. (2010)	$F(\lambda)$, настоящая работа
3727-29	[O II]	—	80 ± 22	157 ± 11
3868.8	[Ne III]	—	68 ± 17	87 ± 5
3889.1	H8	—	16 ± 4	16 ± 2
3970.1	H7+[Ne III]	—	37 ± 8.7	39 ± 2
4101.7	H δ +He II	—	20.3 ± 4.6	21 ± 2
4340.5	H γ	—	43 ± 8.1	44 ± 3
4363.2	[O III]	—	11 ± 2	18 ± 3
4685.7	He II	42.5	25 ± 3.8	23 ± 2
4861.3	H β	100	100	100.00
4959.5	[O III]	393	400 ± 54	379 ± 15
5007.6	[O III]	1183	1300 ± 170	1147 ± 46
5875.6	He I	30.6	15 ± 1.6	13 ± 1
6548.1	[N II]	—	28 ± 3.2	28 ± 1
6562.9	H α	375	360 ± 1	335 ± 10
6583.4	[N II]	46.2	86 ± 9.8	85 ± 3
6678.2	He I	—	4.1 ± 0.48	4.1 ± 0.9
6716.4	[S II]	—	18 ± 2.1	16.4 ± 0.8
6730.8	[S II]	—	14 ± 1.6	12.7 ± 0.5
7065.2	He I	—	2.8 ± 0.34	2.4 ± 0.3
7136.2	[Ar III]	12.5	16 ± 2	16.4 ± 0.7
7320.0	[O II]	—	4.7 ± 0.59	3.4 ± 0.4
7330.0	[O II]	—	—	0.8 ± 0.4

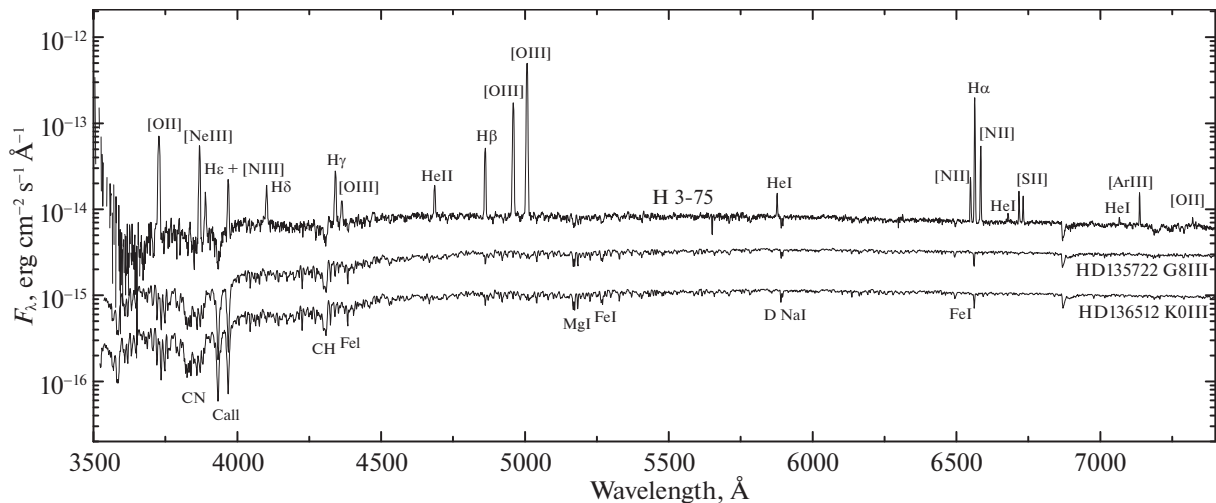


Рис. 2. Исправленный за покраснение суммарный спектр ПТ Н 3-75 и ее центральной звезды NSV 16624 вместе со спектрами гигантов HD136512 и HD135722, сдвинутыми произвольно относительно оси ординат.

стандарта BD+75°325¹. Одномерные спектры получены путем суммирования отсчетов внутри апертуры в 80 пикселей (30"). Вся обработка проводилась с использованием собственных программ, написанных на языке Python.

АНАЛИЗ СПЕКТРА ПТ Н 3-75 И ЕЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЗВЕЗДЫ NSV 16624

В диапазоне λ 3500–7500 в спектре ПТ Н 3-75 наблюдаются эмиссионные линии, характерные для ПТ среднего и высокого возбуждения. На рис. 2 показан суммарный спектр ПТ Н 3-75 и ее центральной звезды NSV 16624.

Мы измерили относительные интенсивности эмиссионных линий туманности и приводим их в табл. 4 вместе с соответствующими данными из работ Калера и др. (1996) и Генри и др. (2010). В работе Косты и др. (2004) представлены относительные интенсивности ряда линий, уже исправленные за поглощение, поэтому мы не поместили их в табл. 4 с наблюдаемыми данными.

Наши измерения находятся в хорошем согласии с данными из работы Генри и др. (2010), наиболее близкой по времени к нашим наблюдениям. Исключение составляет относительная интенсивность дублета [O II] λ 3727–3729: ее значение по нашим данным почти в два раза превышает величину, полученную Генри и др. (2010). Относительные интенсивности небулярных линий [O III] довольно хорошо согласуются у разных авторов, тогда как данные для линии He II λ 4686 различаются на порядок: от 0.031 (Коста и др., 2004) до 0.4

(Калер и др., 1996). Эти различия связаны, прежде всего, с разной методикой наблюдений. Наблюдения Калера и др. (1996) проводились с круговой апертурой размером 8" и относятся к центральной части туманности. Коста и др. (2004) и Генри и др. (2010) наблюдали с длиной щелью шириной 2", наши измерения относятся к апертуре 1" \times 30".

На рис. 3 показано распределение интенсивностей вдоль щели в линиях He II λ 4686, H β , [O III] λ 5007, H α , [N II] λ 6584 и [S II] λ 6716. График позволяет оценить угловой размер туманности в разных линиях и иллюстрирует тот факт, что туманность кольцевая и несимметричная в линиях H α , [O III], [N II], [S II], а в линии He II λ 4686 показывает концентрацию к центру туманности. В центральной части туманности излучение H β слабее, а отношение $F(\lambda 4686)/F(H\beta)$ больше, чем в других областях. Видимо, этим объясняется высокое значение относительной интенсивности линии ионизованного гелия в работе Калера и др. (1996). Вызывает недоумение низкое значение этой величины у Косты и др. (2004). Зоны излучения водорода и иона O⁺² практически совпадают, поэтому относительные интенсивности линий [O III] λ 4959 и λ 5007 находятся в хорошем согласии у разных авторов.

Большой разброс относительных интенсивностей линий He I и He II привел к расхождению полного содержания гелия в туманности в разных работах. Калер и др. (1996) приводят значение He/N = 0.22, Коста и др. (2004) — 0.071, Миланова и Холтыгин (2009) — 0.08, Генри и др. (2010) — He/N = 0.120 \pm 0.014.

Межзвездное поглощение света Н 3-75 было оценено нами по бальмеровскому декременту

¹ <https://www.eso.org/sci/observing/tools/standards/spectra/stanlis.html>

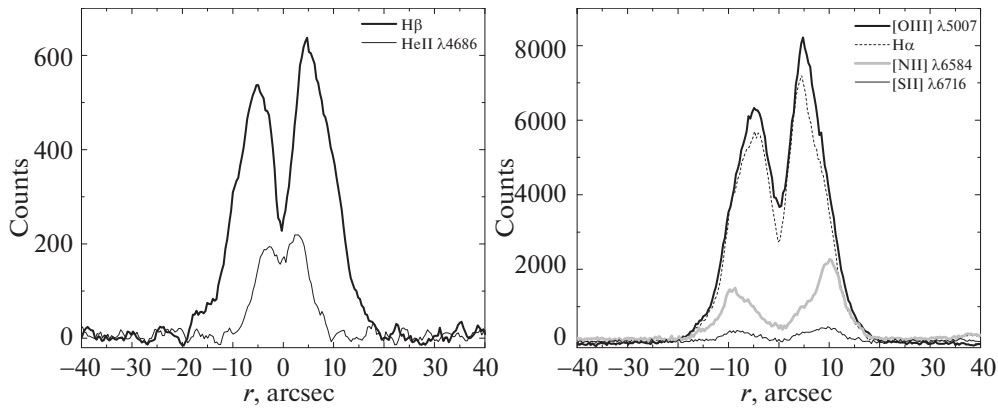


Рис. 3. Распределение интенсивностей вдоль щели в линиях He II $\lambda 4686$, H β , [O III] $\lambda 5007$, H α , [N II] $\lambda 6584$ и [S II] $\lambda 6716$.

туманности: наблюдаемые относительные интенсивности $F(\text{H}\alpha) : F(\text{H}\beta) : F(\text{H}\gamma) = 3.35 : 1 : 0.44$ сравнивались с теоретическими из работы Стори и Хаммера (1987) $I(\text{H}\alpha) : I(\text{H}\beta) : I(\text{H}\gamma) = 2.86 : 1 : 0.47$ для $T_e = 10\,000$ К и $N_e = 100$ см $^{-3}$. Получено значение $c(\text{H}\beta) = 0.21$. Ранее по измеренному отношению интенсивностей линий H α и H β Тыленда и др. (1992) получили $c(\text{H}\beta) = 0.5$, Калер и др. (1996) — 0.36, а Генри и др. (2010) — 0.28. Учитывая все оценки, мы получили среднее значение $E(B - V) = 1.46 \cdot c(\text{H}\beta) = 0.23 \pm 0.08$, которое будет использоваться в дальнейшем.

Физические параметры туманности были определены нами с использованием пакета Рупеб (Луридиана и др., 2015). Электронная концентрация $n_e \sim 230$ см $^{-3}$ получена по отношению интенсивностей запрещенных линий [SII] $R_{S2} = I(\lambda 6716)/I(\lambda 6731) = 1.29 \pm 0.11$, электронная температура в зоне образования линии [OIII] $T_e = 14\,000 \pm 1300$ К оценивалась по отношению $R_{O3} = (I(\lambda 4959) + I(\lambda 5007))/I(\lambda 4363) = 74.5 \pm 12$.

Для оценки полного содержания гелия в туманности мы использовали исправленные за поглощение отношения интенсивностей линий $I(\lambda 4686)/I(\text{H}\beta) = 0.24$, $I(\lambda 5876)/I(\text{H}\beta) = 0.11$, $I(\lambda 6678)/I(\text{H}\beta) = 0.03$ и формулы из работы Изотова и др. (1994). Получено значение $\text{He}/\text{H} = \text{He}^{2+}/\text{H}^+ + \text{He}^+/\text{H}^+ = 0.021 + 0.087 = 0.11 \pm 0.02$, которое согласуется с определением Генри и др. (2010).

Обратимся теперь к спектру холодного компонента центральной звезды Н 3-75, доминирующего в оптическом диапазоне. Для спектральной классификации мы сравнили исправленный за покраснение спектр NSV 16624 со спектрами ряда звезд различных спектральных классов и классов светимости HD175305 (G5III), HD135722 (G8III), HD136512 (K0III), HD137759 (K2III), HD075732

(G8V), HD041593 (K0V), HD48329 (G8I) из библиотеки звездных спектров ($R \sim 2000$) Борне и др. (2003) и HD186293 (K0I) из библиотеки звездных спектров Якоби и др. (1984). NSV 16624 имеет менее интенсивные линии металлов, чем звезды главной последовательности HD075732 и HD041593. Распределение энергии в ее спектре существенно отличается от такового у K2-гиганта HD137759 и сверхгигантов HD48329 и HD186293. При этом, как показано на рис. 2, NSV 16624 имеет сходство в деталях и по распределению энергии с гигантами спектральных классов G8 и K0.

Учитывая тот факт, что наблюдаемый в оптике компонент NSV 16624 соседствует с далеко проэволюционировавшей звездой — истинным ядром ПТ, важно было проверить, отразилось ли это соседство на химсоставе атмосферы холодного гиганта. Известен целый ряд ПТ с двойными центральными звездами, в частности, LoTr 5 (Тевенин, Ясевич, 1997), А 70 (Мичальский, 2012), WeBo1 (Бонд и др., 2003), Неп 2-39 (Мичальский и др., 2013), имеющими в качестве холодного компонента системы субгигант или гигант G- или K-типа с повышенным содержанием бария. В спектрах этих звезд обнаружена линия BaII $\lambda 4554$ и в отдельных случаях присутствуют линии BaII $\lambda 6142$, $\lambda 6497$, SrII $\lambda 4216$, что свидетельствует о “загрязнении” атмосферы холодного гиганта веществом второго компонента в фазе общей оболочки.

На рис. 4 показаны области спектра NSV 16624, в которых могли быть обнаружены линии BaII $\lambda 4554$, $\lambda 4934$, $\lambda 5854$, $\lambda 6142$, $\lambda 6497$ и SrII $\lambda 4216$. Для сравнения на рис. 4 приведены также фрагменты спектра бариевой звезды HD49641 (Sp K0I) из библиотеки ELODIE V3.1 (Прюнель и др., 2007). Эшельный спектр HD49641 был сглажен скользящим средним с $N = 17$. Видно, что в спектре NSV 16624 линия BaII $\lambda 4554$ отсутствует, абсорбции BaII $\lambda 4934$, $\lambda 5854$, $\lambda 6142$ и SrII $\lambda 4216$

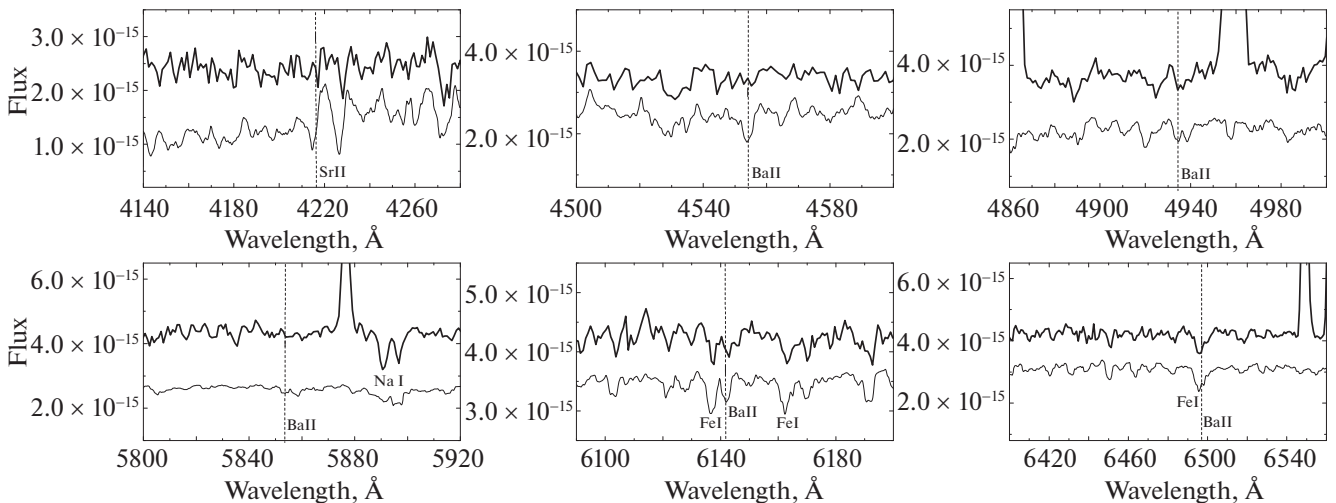


Рис. 4. Фрагменты спектров NSV 16624 (жирная линия) и HD49641 (тонкая линия). Вертикальными штриховыми линиями показаны положения интересных нас абсорбций. Спектр HD49641 сдвинут произвольно относительно оси ординат.

если и имеются, то чрезвычайно слабы. Линия BaII $\lambda 6497$ блендирует с FeI $\lambda 6495$ и для ее обнаружения необходимы наблюдения с лучшим, чем у нас, спектральным разрешением. Предварительно можно сделать вывод о том, что холодная звезда не испытала сильного влияния со стороны своего компаньона. Для большей надежности необходимы спектральные наблюдения высокого разрешения.

ПАРАМЕТРЫ ХОЛОДНОГО КОМПОНЕНТА И РАССТОЯНИЕ ДО ТУМАННОСТИ

Исправленный за поглощение света спектр NSV 16624 показывает сходство со спектрами гигантов G8 и K0. Для более точной спектральной классификации необходимо рассмотреть распределение энергии в более широком спектральном диапазоне, исключив влияние континуума туманности. Для этой цели мы используем наши данные $VRCICJHK$ -фотометрии.

Для сравнения распределения энергии в спектре NSV 16624 с данными для стандартных звезд Страйжиса (1979) в оптическом диапазоне и Курниева (1983) в ближней ИК-области мы перевели наши наблюдения в полосах R_C и I_C в R и I с помощью уравнений из работы Бесселя (1979), а JHK_S -величины в системе 2MASS в JHK Курниева (1983), используя формулы Карпентера (2001).

Как показано выше, избыток цвета, полученный по спектральным данным, имеет значительную неопределенность 0.08. Мы сравнили распределение энергии по данным широкополосной фотометрии для NSV 16624, исправленное за покраснение с тремя значениями $E(B - V) = 0.16, 0.23$

и 0.31 — минимальным, средним и максимальным, с распределением энергии стандартных гигантов спектральных классов G8, K0 и K2 в калибровках Страйжиса (1979) и Курниева (1983). Как видно на рис. 5, распределение энергии в $VRIJK$ -полосах в спектре NSV 16624 соответствует K2III для $E(B - V) = 0.16$, K0III для $E(B - V) = 0.23$ и G8III для $E(B - V) = 0.31$.

Согласно картам межзвездной экстинкции (Грин и др., 2019), избыток цвета в направлении H 3-75 для расстояния $d > 1500$ пк составляет $E(B - V) = 0.24^{+0.03}_{-0.01}$ и не превышает $E(B - V) = 0.27$. H 3-75 не имеет избытка излучения в ИК-области и, следовательно, околозвездного поглощения света. С одной стороны, это дает нам основание считать, что значение $E(B - V) = 0.31$ несколько завышено и, следовательно, NSV 16624 имеет более поздний спектральный класс, чем G8III. С другой стороны, спектральный класс K2III, полученный для $E(B - V) = 0.16$, плохо описывает распределение энергии в спектре NSV 16624 в коротковолновой области спектра, следовательно, это значение $E(B - V)$ занижено, а звезда имеет более ранний спектральный класс. Таким образом, мы считаем, что для NSV 16624 можно принять спектральный класс K0III. Согласно калибровкам Страйжиса (1982), гигант K0 имеет температуру $T_{\text{eff}} = 4797$ К. Учитывая некоторую неопределенность оценки спектрального класса NSV 16624, примем для звезды $T_{\text{eff}} = 4800 \pm 200$ К.

Принимая для K0III абсолютную величину $M_V = +0^m.8$ (Страйжис, 1982) и используя нашу оценку блеска NSV 16624 $V = 14^m.33$ и избыток

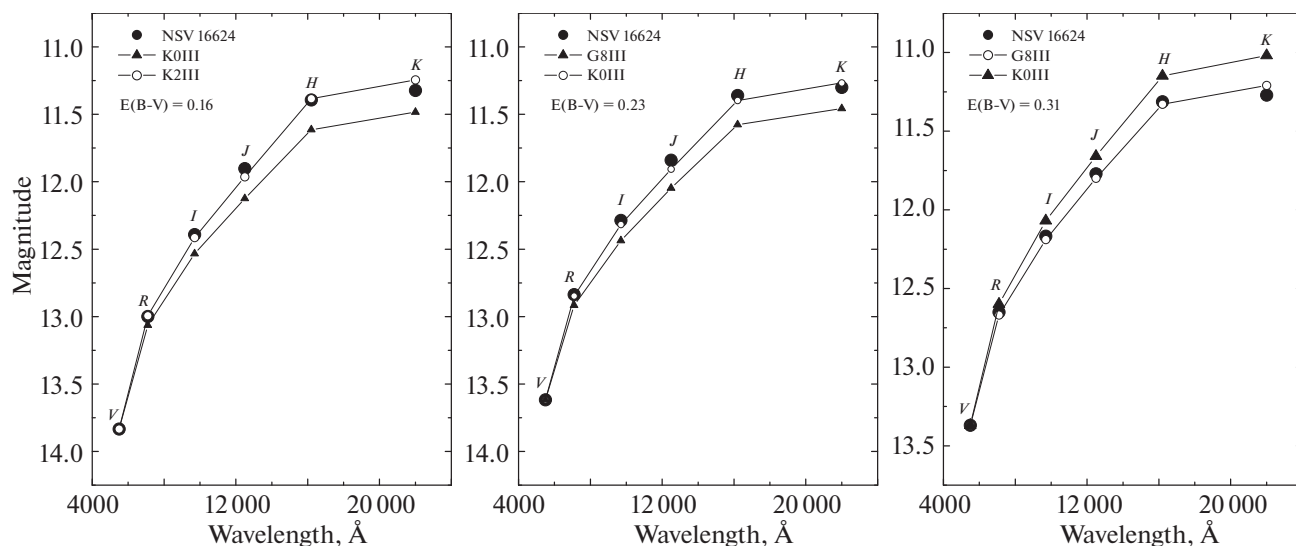


Рис. 5. Распределение энергии в спектрах NSV 16624 для разных значений $E(B - V)$ и стандартных гигантов G8, K0 и K2.

цвета $E(B - V) = 0.23 \pm 0.08$, мы получили расстояние до туманности $d = 3659_{-394}^{+443}$ пк и высоту над галактической плоскостью $z = -608_{-74}^{+65}$ пк. Диаметр планетарной туманности $D \sim 0.50$ пк, а ее радиус $R \sim 0.25$ пк, что указывает на довольно позднюю стадию расширения туманности. Болومترическая абсолютная величина гиганта K0 составляет $M_{bol} = +0^m.5$ (Страйжис, 1982), а светимость $\log L/L_{\odot} = 1.69$.

Амнуэль и др. (1984) получили в своей статистической шкале расстояний ПТ расстояние до Н3-75, равное 2700 пк, и ее диаметр 0.31 пк. В каталоге Gaia DR2 (2018) приводится измеренный параллакс центральной звезды NSV 16624 ПТ Н 3-75, равный 0.2308 ± 0.0386 mas, а в работе Бейлера-Джонса и др. (2018) получена оценка расстояния по данным Gaia DR2 $d = 3687_{-462}^{+600}$ пк. Наша оценка $d = 3659_{-394}^{+443}$ пк практически совпадает с расстоянием, полученным по параллаксу.

КЛАСС ВОЗБУЖДЕНИЯ ТУМАННОСТИ Н 3-75, ТЕМПЕРАТУРА И СВЕТИМОСТЬ ВОЗБУЖДАЮЩЕЙ ЗВЕЗДЫ

Согласно критериям Фиста (1968) и Моргана (1984), Н 3-75 относится к ПТ среднего возбуждения и с ее отношением $I(4686)/I(H\beta) = 0.24-0.40$ имеет класс возбуждения $EC = 5.7-6.4$ (Допита, Мезерингем, 1990). Если же принять во внимание отношение $I(H\beta)/I(3869) = 5.1$, которое Морган (1984) использует в качестве дополнительного критерия, то Н 3-75 можно отнести к туманностям более низкого возбуждения.

Прейте-Мартинес и др. (1991) определили температуру возбуждающей звезды Н 3-75 методом энергетического баланса $T_{EB} = 99\,800$ К. Мы сделали оценку температуры методом Амбарцумяна по отношению интенсивностей линий He II $\lambda 4686$ и H β . В результате получено $T_{HeII} = 120\,000$ К. Примем среднее значение $T_{hot} = 110\,000 \pm 10\,000$ К.

Далее оценим светимость возбуждающей звезды. В видимом диапазоне выделить ее вклад из суммарного излучения системы (холодная звезда + горячая звезда + газовый континуум) затруднительно, поэтому мы воспользовались данными, полученными спутником International Ultraviolet Explorer (IUE) в ультрафиолетовой (УФ) области, где светит только горячая звезда. Спектр низкого разрешения SWP34711 был получен 8 ноября 1988 г. с помощью коротковолновой камеры SWP, покрывающей диапазон 1150–3200 Å, и извлечен нами с использованием сервера архивных данных INES². Следует отметить, что УФ-поток крайне слаб и оценивается ненадежно. Мы перешли от потока на длине волны 1500 Å $F(\lambda 1500) \sim 3.4 \times 10^{-15}$ эрг см⁻² с⁻¹ Å⁻¹ к потоку в видимом диапазоне, предполагая, что горячая звезда излучает как черное тело с $T = 110\,000$ К, для которого $k = I(\lambda 1500)/I(\lambda 5450) = 123$. Учитывая поглощение света с $E(B - V) = 0.23$, мы получили $F(\lambda 5450) \sim 8.1 \times 10^{-17}$ эрг см⁻² с⁻¹ и $V \sim 19^m.2$. Приняв расстояние $d = 3660$ пк и вычислив болومترическую поправку $BC = -6^m.4$ по формуле $BC = 27.58 - 6.8 \lg T_{eff}$ из работы Мартинса и др.

² <http://sdc.cab.inta-csic.es/cgi-ines/IUEdbs.MY>

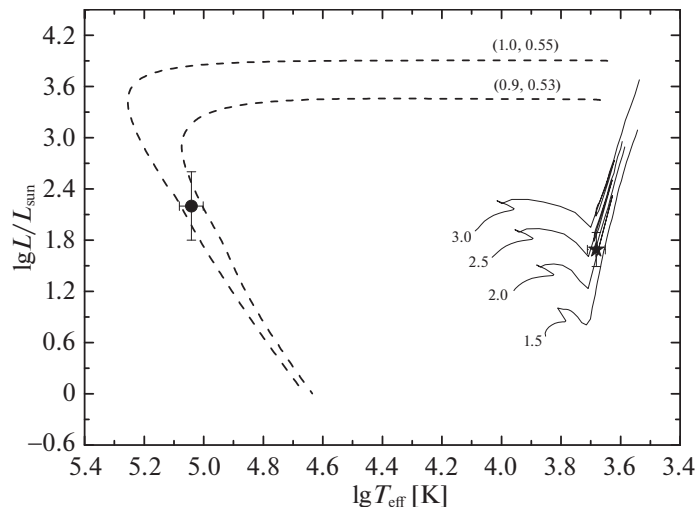


Рис. 6. Положение холодного (звездочка) и горячего (кружок) компонентов системы на диаграмме Герцшпрунга–Рассела. Сплошными линиями показаны эволюционные треки для начальных масс 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 M_{\odot} из работы Шаллера и др. (1992). Пунктирными — две модели Миллера Бертолами (2016) (M_{init} , M_{fin}).

(2005), мы получили оценку светимости горячей звезды $\log L/L_{\odot} \sim 2.2$.

На рис. 6 показано положение обоих компонентов двойной системы на диаграмме Герцшпрунга–Рассела вместе с эволюционными треками Шаллера и др. (1992) для начальных масс 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 M_{\odot} и двумя моделями Миллера Бертолами (2016) для post-AGB звезд: $M_{\text{init}} = 0.9 M_{\odot}$, $M_{\text{fin}} = 0.53 M_{\odot}$ и $M_{\text{init}} = 1.0 M_{\odot}$, $M_{\text{fin}} = 0.55 M_{\odot}$, где M_{init} — масса на начальной главной последовательности, а M_{fin} — масса в post-AGB стадии. Сравнение с модельными треками позволило оценить массы горячей и холодной звезд системы: $M_{\text{hot}} = 0.53\text{--}0.55 M_{\odot}$ и $M_{\text{cold}} \sim 2 M_{\odot}$, а также массу прародителя горячей звезды на начальной главной последовательности: $M_{\text{init}} = 0.9\text{--}1.0 M_{\odot}$.

Время эволюции звезды от конца стадии AGB до настоящего момента, согласно моделям Миллера Бертолами (2016), составляет порядка 12 000 лет или 3.8×10^{11} с. Зная радиус и время жизни туманности, сформированной в конце AGB-стадии, оценим скорость расширения туманности. Она получается равной $V_{\text{exp}} \sim 20$ км/с, что не противоречит известным данным о скоростях расширения планетарных туманностей, особенно на поздних стадиях.

О ВОЗМОЖНОЙ ПЕРЕМЕННОСТИ БЛЕСКА ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЗВЕЗДЫ NSV 16624

Компонент центральной звезды туманности — красный гигант — был заподозрен в переменности блеска в диапазоне JHK по наблюдениям в 1979–1981 гг. (Вайтлок, 1985).

Сравним наблюдения, относящиеся к разным эпохам. Для сравнения ИК-величины, измеренные Вайтлок (1985) в фотометрической системе SAAO, мы редуцировали в фотометрическую систему обзора 2MASS с помощью уравнений, полученных Карпентером (2001), и приводим их в табл. 5 вместе с данными из каталога 2MASS и нашими новыми наблюдениями.

Рассматривая все представленные наблюдения, мы пока не получили доказательств переменности блеска NSV 16624 в ближнем ИК-диапазоне. Мы показали, что холодный компонент — нормальный гигант, находится вне полосы нестабильности и от него не следует ожидать периодических изменений блеска, вызванных пульсациями.

Тем не менее при благоприятном расположении компонентов в картинной плоскости двойная звезда в центре ПТ Н 3-75 могла бы показать периодическую переменность в оптической области, связанную с орбитальным движением.

Точных фотометрических данных для оптического диапазона крайне мало. В литературе существует лишь одна оценка блеска NSV 16624 в полосах V и I_C , полученная пересчетом потоков на длинах волн 5550 Å и 7850 Å по наблюдениям со спутника Хаббл (Чардулло и др., 1999). В настоящей работе мы приводим блеск центральной звезды в полосах VR_CI_C за три ночи наблюдений. Пока изменений блеска, превышающих ошибки наблюдений, измерений и редукиции, не зарегистрировано. Для обнаружения переменности требуется длительный мониторинг. Наблюдения следует проводить в полосах I или I_C , в которых вклад туманности минимален.

Таблица 5. ИК-фотометрия NSV 16624

Дата	J	H	K_S	Источник
1979-81	12.03	11.48	11.33	Вайтлок (1985)
1998-09-29	11.999	11.451	11.303	2MASS
2020-03-10	12.042	11.481	11.379	Настоящая работа

Анализ наблюдений из обзора ASAS-SN (Шаппи и др., 2014; Коханек и др., 2017) в полосе V с 20 января 2012 г. по 29 ноября 2018 г. (более 500 оценок) не показал периодических изменений блеска звезды. Наблюдаются хаотические вариации блеска с амплитудой до $0^m.1$ в ночь при средней точности измерений $0^m.02$. Средняя величина объекта по данным ASAS-SN составляет $V = 13^m.31 \pm 0^m.03$ и существенно (на $\sim 1^m$) превышает блеск центральной звезды. При масштабе CCD камеры $7.8''/\text{пиксель}$ и пространственном разрешении $16''$ апертурная фотометрия, проводимая в обзоре, регистрирует суммарное излучение от звезды и от туманности. Для аккуратной фотометрии объектов с оболочками необходимы наблюдения с лучшим пространственным разрешением и более строгим учетом фона.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

На основе имеющихся в литературе, а также полученных нами фотометрических и спектральных данных о ПТ Н 3-75 и ее центральной звезде, мы показали, что последняя может являться двойной, состоящей из нормального гиганта КОШ и горячего субкарлика с температурой около 10^5 К. Полученная нами оценка расстояния до холодного компонента системы $d \sim 3660$ пк практически совпадает с расстоянием, определенным по параллаксу. Сравнением с эволюционными треками получена оценка массы гиганта $M_{\text{cold}} \sim 2 M_{\odot}$. В предположении, что центральная звезда ПТ Н 3-75 — физическая пара, определена светимость горячего компонента системы и сделан вывод о том, что субкарлик находится на треке охлаждения. Следует, однако, учитывать, что в спектре холодной звезды не обнаружено продуктов нуклеосинтеза горячего компонента. Это может указывать на то, что система не связана физически, либо пара широкая.

Чардулло и др. (1999) высказали предположение, что центральная звезда ПТ Н 3-75 может быть одиночной и находиться в стадии возвратного движения на AGB в результате последней гелиевой вспышки оболочечного источника. Полученные к настоящему моменту наблюдения не дают никаких оснований для подобного заключения. Со своими параметрами $\lg T_{\text{eff}}$, $\lg L/L_{\odot}$ холодная звезда

на диаграмме Герцшпрунга—Рассела находится на ветви красных гигантов до стадии AGB. Звезда на возвратном треке должна иметь существенно более высокую светимость и измененный химсостав. Например, атмосфера звезды FG Sge, находящейся в стадии после последней гелиевой вспышки, значительно обогащена элементами s-процесса (Джеффри, Шенбернер, 2006), тогда как в спектре NSV 16624 линии бария и стронция нами не обнаружены. Следовательно, ПТ Н 3-75 — продукт эволюции горячего компонента двойной системы, а не холодной звезды.

Холодной звезде еще предстоит пройти свой путь сначала в стадии красного гиганта, затем на AGB, где звезда начнет усиленно терять массу. К этому моменту планетарная туманность Н 3-75 рассеется, а горячий компонент двойной системы продолжит свой путь по треку охлаждения. Дальнейшая история зависит от темпа потери массы холодным компонентом и от сценария передачи массы белому карлику.

В заключение мы еще раз указываем на необходимость фотометрического мониторинга центральной звезды ПТ Н 3-75 с целью обнаружения периодической переменности, связанной с орбитальным движением. Важно получить спектральные наблюдения высокого разрешения центральной звезды NSV 16624 для определения параметров ее атмосферы и химсостава. Крайне необходимы УФ-наблюдения объекта для более точного определения параметров горячей звезды — истинного ядра ПТ Н 3-75.

Настоящая работа выполнена с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акер и др. (A. Acker, F. Ochsenbein, B. Stenholm, R. Tylenda, J. Marcout, and C. Schohn), Strasbourg-ESO Catalogue of Galactic Planetary Nebulae, ESO (1992).
2. Амнуэль и др. (P. Amnuel, O. Guseinov, K. Novruzova, and I.S. Rustamov), Astrophys. Sp. Sci. **107**, 19 (1984).

3. Аро и др. (G. Haro, B. Iriarte, and E. Chavira), *Boletín de los Observatorios de Tonantzintla y Tacubaya* **1**, No 8, 3 (1953).
4. Бейлер-Джонс и др. (C.A.L. Bailer-Jones, J. Rybizki1, M. Fouesneau, G. Mantelet, and R. Andrae), *Astron. J.* **156**, 58 (2018).
5. Бердников Л.Н., Белинский А.А., Шатский Н.И., Бурлак М.А., Иконникова Н.П., Мишин Е.О., Черясов Д.В., Жуйко С.В., *Астрон. журн.* **97**, 284 (2020) [L.N. Berdnikov et al., *Astron. Rep.* **64**, 310 (2020)].
6. Бессель (M.S. Bessell), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **91**, 589 (1979).
7. Бонд и др. (H.E. Bond, D.L. Pollacco, and R.F. Webbink), *Astron. J.* **125**, 260 (2003).
8. Борне и др. (J.F. Le Borgne, G. Bruzual, R. Pelló, A. Lançon, B. Rocca-Volmerange, B. Sanahuja, D. Schaerer, C. Soubiran, and R. Vilchez-Gomez), *Astron. Astrophys.* **402**, 433 (2003).
9. Вайтлок (P.A. Whitelock), *MNRAS* **213**, 59 (1985).
10. Gaia Collaboration; A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, et al., *Astron. Astrophys.* **616**, 10 (2018).
11. Генри и др. (R.B. Henry, K. Kwitter, A. Jasket, B. Balik, M.A. Morrison, and J.B. Milingo), *Astrophys. J.* **724**, 748 (2010).
12. Грин и др. (G.M. Green, E. Schlafly, C. Zucker, J.S. Speagle, and D. Finkbeiner), *Astrophys. J.* **887**, 93 (2019).
13. Джеффри, Шенбернер (C.S. Jeffery and D. Schönberner), *Astron. Astrophys.* **459**, 885 (2006).
14. Долан, Матье (C.J. Dolan and R.D. Mathieu), *Astron. J.* **123**, 387 (2002).
15. Допита, Мезерингем (M.A. Dopita and S.J. Meatheringham), *Astrophys. J.* **357**, 140 (1990).
16. Изотов и др. (Y.I. Izotov, T.X. Thuan, and V.A. Lipovetsky), *Astrophys. J.* **435**, 647 (1994).
17. Карпентер (J.M. Carpenter), *Astron. J.* **121**, 2851 (2001).
18. Калер и др. (J. Kaler, K. Kwitter, R. Shaw, and L. Browning), *PASP* **108**, 980 (1996).
19. Киреза и др. (C. Quireza, H.J. Rocha-Pinto, and W.J. Maciel), *Astron. Astrophys.* **475**, 217 (2007).
20. Когоутек (L. Kogoutek), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **60**, 87 (1985).
21. Коста и др. (R. Costa, M. Ushida, and W. Maciel), *Astron. Astrophys.* **423**, 199 (2004).
22. Коханек (C.S. Kochanek, B.J. Shappee, K.Z. Stanek, T.W.-S. Holoiien, T.A. Thompson, J.L. Prieto, S. Dong, J.V. Shields, D. Will, C. Britt, D. Perzanowski, and G. Pojmanski), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **129**:104502 (2017).
23. Курниф (J. Koorneef), *Astron. Astrophys.* **128**, 84 (1983).
24. Леггетт и др. (S.K. Leggett, M.J. Currie, W.P. Varricatt, T.G. Hawarden, A.J. Adamson, J. Buckle, T. Carroll, J.K. Davies, et al.), *MNRAS* **373**, 781 (2006).
25. Луридиана и др. (V. Luridiana, C. Morisset, and R.A. Shaw), *Astron. Astrophys.* **573**, 42 (2015).
26. Лютц, Лейм (J. Lutz and Jo Lame), *IAU Symp.* 131 "Planetary Nebulae: Observations and Theory" (Ed. S. Torres-Peimbert, Dordrecht, Reidel, 1989).
27. Мартинс и др. (F. Martins, D. Schaerer, and D.J. Hillier), *Astron. Astrophys.* **436**, 1049 (2005).
28. Миланова, Холтыгин (Yu.V. Milanova and A.F. Kholtygin), *Astron. Lett.* **35**, 518 (2009).
29. Миллер Бертолами (M.M. Miller Bertolami), *Astron. Astrophys.* **588**, 25 (2016).
30. Мичальский и др. (B. Miszalski, H.M.J. Boffin, D.J. Frew, A. Acker, J. Köppen, A.F.J. Moffat, and Q.A. Parker), *MNRAS* **419**, 39 (2012).
31. Мичальский и др. (B. Miszalski, H.M.J. Boffin, D. Jones, A.I. Karakas, J. Köppen, A.A. Tyndall, S.S. Mohamed, P. Rodriguez-Gil, and M. Santander-Garcia), *MNRAS* **436**, 3068 (2013).
32. Морган (D.H. Morgan), *MNRAS* **208**, 633 (1984).
33. Наджип А.Э., Татарников А.М., Туми Д.У., Шатский Н.И., Черепашук А.М., Ламзин С.А., Белинский А.А., *Астрон. бюлл.* **72**, 382 (2017).
34. Потанин и др. (S. Potanin, N. Shatsky, et al.), in preparation (2020).
35. Прейте-Мартинес и др. (A. Preite-Martinez, A. Acker, J. Köppen, and B. Stenholm), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **88**, 121 (1991).
36. Прюнель (Ph. Prugniel, C. Soubiran, M. Koleva, and D. Le Borgne), *arxiv astro-ph/0703658* (2007).
37. Сандулек (N. Sanduleak), private communications (1984).
38. Стори, Хаммер (P.J. Storey and D. G. Hummer), *MNRAS* **272**, 41 (1995).
39. Страйжис В.Л., *Многоцветная фотометрия звезд* (Вильнюс: Мокслас, 1979).
40. Страйжис В.Л., *Звезды с дефицитом металлов* (Вильнюс: Мокслас, 1982).
41. Тевенин, Ясневич (F. Thévenin and G. Jasiewicz), *Astron. Astrophys.* **320**, 913 (1997).
42. Тыленда и др. (R. Tylanda, A. Acker, B. Stenholm, and J. Koppen), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **95**, 337 (1992).
43. Фист (M.W. Feast), *MNRAS* **140**, 345 (1968).
44. Чардулло и др. (R. Ciardullo, H. Bond, M. Sipior, L. Fullton, C.-Y. Zhang, and K.G. Schaefer), *Astrophys. J.* **118**, 488 (1999).
45. Шаллер и др. (G. Schaller, D. Schaerer, G. Meynet, and A. Maeder), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **96**, 269 (1992).
46. Шаппи и др. (B.J. Shappee, J.L. Prieto, D. Grupe, C.S. Kochanek, K.Z. Stanek, and G. De Rosa), *Astrophys. J.* **788**, 48 (2014).
47. Якоби и др. (G.H. Jacoby, D.A. Hunter, and C.A. Christian), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **56**, 257 (1984).