

УДК: 524.338.2:524.57

ОКОЛОЗВЕЗДНАЯ ПЫЛЬ В ГОЛУБЫХ ПЕРЕМЕННЫХ БОЛЬШОЙ СВЕТИМОСТИ

Л. ЛУУД, Т. ТУВИКЕНЕ, М. РУУЗАЛЕПП

Поступила 4 ноября 1987

16 голубых переменных звезд высокой светимости отождествлены с источниками точечных объектов астрономического спутника IRAS. 13 из этих объектов обладают большими инфракрасными избытками. В рамках модели пылевой симметричной оболочки вокруг звезды показано, что диаметр оболочки несколько тысяч звездных радиусов ($5 \cdot 10^{-2} - 10^{-3}$ пк).

1. *Введение.* Развитие астрономических наблюдений в диапазоне инфракрасных волн открыло возможность обнаружения пылевых околозвездных облаков. Сперва такие оболочки были обнаружены вокруг сравнительно холодных звезд и звезд с особенностями. Отметим, например, симбиотические звезды: в них уже более десятка лет наблюдается пылевая составляющая. С перемещением длинноволновой границы инфракрасного детектирования к более длинным волнам открывается возможность обнаружения и исследования все более холодных пылевых образований. Так, уже в 1984 г. Штал и др. [1] обнаружили, что в некоторых околозвездных оболочках голубых переменных большой светимости существует околозвездная пыль. Однако до появления работы Вольфа и Цикграфа [2] не было уверенности, что пыль на самом деле присутствует. Наблюдаемые инфракрасные избытки можно было объяснить и в рамках моделей газовых оболочек. Вольф и Цикграф [2] показали, что вокруг звезды R 71 в Большом Магеллановом Облаке должна существовать пылевая оболочка. Такая краткая предыстория нашего исследования.

На основе каталога точечных источников, наблюдаемых со спутника IRAS, мы будем отождествлять известные голубые переменные высокой светимости с источниками инфракрасного излучения в области 12—100 мкм. Затем рассмотрим возможность излучения этих избытков пылевыми оболочками.

Термин «голубые переменные высокой светимости» (ГПВС) мы используем для общего обозначения звезд типов Р Лебеда, S Dog и перемен-

ных Хаббла—Сандейджа. В зарубежной литературе эти звезды называются *luminous blue variable* (LBV). Пока еще не совсем ясно, являются ли эти названия исторически возникшими синонимами или между этими типами существует и некая принципиальная разница эволюционного характера. Однако этот вопрос в данной работе обсуждаться не будет.

2. *Голубые переменные большой светимости как объекты каталога точечных источников, обнаруженных со спутника IRAS.* По каталогу точечных источников IRAS были проведены отождествления голубых переменных большой светимости с источниками, обнаруженными со спутника IRAS. Описание каталога дано Бейхманом и др. [3]. В табл. 1 приведены отождествления, а также инфракрасные потоки и другие данные, характеризующие объекты. В распределениях энергии 13 объектов из 16 обнаружены инфракрасные избытки, которые позволили определить температуру аппроксимирующего распределение энергии чернотельного излучения; в двух случаях избыток имеется, но он, недостаточно четкий для определения температуры в приближении чернотельного излучения. Распределения энергии в спектрах этих звезд представлены на рис. 1—4, ближние инфракрасные потоки даны по Гезари и др. [4]. Поскольку распределения приведены без поправки на межзвездное покраснение, которым для получения качественных оценок в инфракрасной области можно пренебрегать, то приведенные ориентировочные видимые потоки даны в основном по [5] и не очень точны. Особый случай представляет Р Лебеда: согласно Ватерсу и Веселиусу [6], в областях 60 и 100 мкм фон вокруг звезды сильно меняется и поэтому точность определения потоков очень низкая. Поскольку по данным каталога IRAS можно предполагать ничтожный пылевой эксцесс лишь в области 100 мкм, то, учитывая неуверенность измерения потоков, будем считать Р Лебеда звездой без следов пыли.

Имеются две пары звезд, в случае которых трудно определить, к какому из компонентов пыль принадлежит. Обе пары требуют специального исследования.

Первая пара — AG Car и GG Car. Обе звезды, находящиеся на расстоянии 189", являются ГПВС. Учитывая, что они расположены примерно на одинаковом расстоянии, их разделяет в пространстве только ~ 2.5 пк. В этой области неба имеется лишь один источник IRAS, координаты которого лучше всего совпадают с AG Car. Обе звезды обладают в ближней инфракрасной области избыточным излучением, GG Car несколько ярче. Учитывая, что разрешение каталога $\leq 60''$, придется, видимо, принять, что данный источник отождествляется с AG Car.

Вторая пара — HD 168607 и HD 168625. Эти звезды находятся на расстоянии 72". В нашем распоряжении имелись регистрограммы спектров обеих звезд. HD 168607 является ГПВС, поскольку в ее спектре имеются

ОТОЖДЕСТВЛЕНИЯ И IRAS ПОТОКИ ГПВС

Галактика	Объект	IRAS	$-\lg F_{\lambda}$ (эрг см ⁻¹ с ⁻¹ А ⁻¹)				Температура пыли
			12 мкм	25 мкм	60 мкм	100 мкм	
Наша Галактика	HR Car	10211—5922	13.64	13.59	14.51	14.27v	160 К
	AG Car	10541—6011	13.59v	13.08	13.79	14.42:	100 К
	BD-27° 11944	17450—2759	13.71	14.15:	13.67v	13.50	30 К неуверенно
	HD 168607	18184—1623	12.84	12.81	14.01:	13.75v	175 К
	HD 169545	18224—1400	14.43	14.66v	14.59v	14.27	нет пыли
	HD 190603	20026+3204	14.29	14.38	14.34	14.70:	70 К неуверенно
	P Cyg.	20159+3752	13.74	14.71	15.14	14.45v	нет пыли
М 31 БМО	IV Cyg No. 12	20308+4104	13.89	14.98	14.98:	14.40v	60—30 К неуверенно
	AF And	00408+4053	15.14	15.89:	15.65	15.32	320 К и 30 К
	R 66	04571—6954	14.71	15.28	16.27	14.74v	400 К неуверенно
	R 67	05000—7013	15.23:	15.64	15.16	14.96:	60 К
	R 71	05027—7124	14.67	14.23	15.50	15.22v	145 К
	R 76	05057—6756	15.09v	15.93v	16.00	15.22v	75 К
	R 82	05136—6925	13.92	13.71	13.65	13.90v	320 К и 75 К
	R 88 (S Dor)	05182—6918	14.97:	15.23	14.66	14.62v	60 К
	R 126	05368—6924	14.67	15.02v	14.92v	15.06v	нет пыли

Примечания

HR Car ≡ MWC 202 ≡ HD 90197: не связан с туманностью.

AG Car ≡ MWC 216 ≡ HD 94910: не находится в туманности.

R 66 ≡ Hen S 73 ≡ HD 268835: согласно Штало и др. [1], обладает массивным холодным и пыловым ветром. Температура пыли 1100 К.

R 67 ≡ S 149 ≡ HD 32763: находится в туманности N 186,

R 71 ≡ S 155 ≡ HD 269006: не находится в туманности, Вольф и др. [2] провели спектроскопическое исследование.

R 76 ≡ S 171 ≡ HD 33579: связан со слабой туманностью, самый яркий член Магеллановых Облаков.

R 82 ≡ S 89 ≡ HD 269217: связан с туманностью N 113.

R 88 ≡ S 96 ≡ S Dor ≡ HD 35343: находится в туманности N 119, затменная двойная.

R 126 ≡ S 127: находится вблизи N 135, но, видимо, не ассоциирует со специальной туманностью.

линии типа Р Лебедя: H_α , H_β , H_γ , FeII λ 6248 и еще неизвестная линия λ 6317 (Mg II ?). HD 168625 — нормальная звезда. По линиям D натрия расстояния почти одинаковые — 1.8 кпк. По координатам с источником IRAS лучше совпадает HD 168625. Мы принимаем, с оговорками, отождествление с HD 168607, которая имеет признаки ГПВС.

Следует сделать еще одно замечание. В большинстве случаев излучение в области 100 мкм сильно искажено инфракрасными циррусами, поэтому измеренные в этой полосе потоки нужно истолковывать с осторожностью.

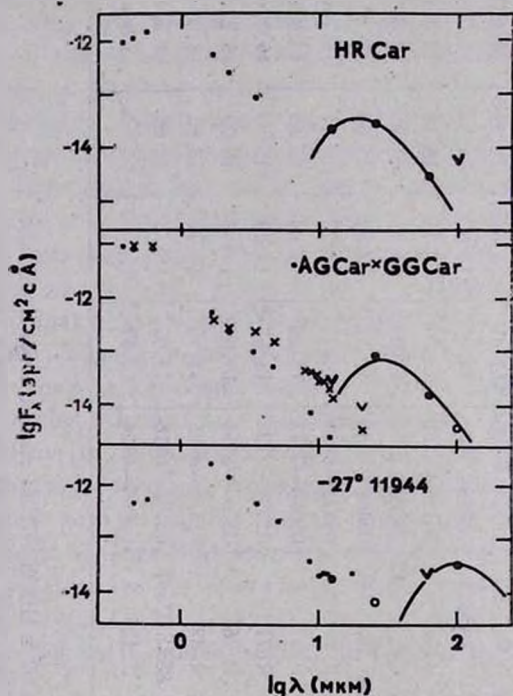


Рис. 1. Распределение энергии в спектрах HR Car, AG Car, GG Car и BD-27°1194: точки — потоки в видимой и ближней инфракрасной областях, большие точки — уверенно измеренные потоки по наблюдениям со спутника IRAS, кружки — неуверенно измеренные IRAS потоки, галочки — верхние пределы потоков по наземным ИК-наблюдениям, жирные галочки — верхние пределы IRAS потоков.

Многие ГПВС не удалось отождествить с источниками каталога IRAS. Их список приводится в приложении.

3. Распределение энергии в инфракрасной области и обнаружение холодной околозвездной пыли. Почти у всех звезд, в излучении которых обнаружены инфракрасные эксцессы (рис. 1—4) распределение энергии

можно приближенно представить чернотельным излучением низкой температуры. Температуры, определенные по максимуму инфракрасного избытка с помощью закона смещения Вина, даны в табл. 1. Естественное объяснение появлению таких эксцессов дает лишь наличие околозвездной пыли.

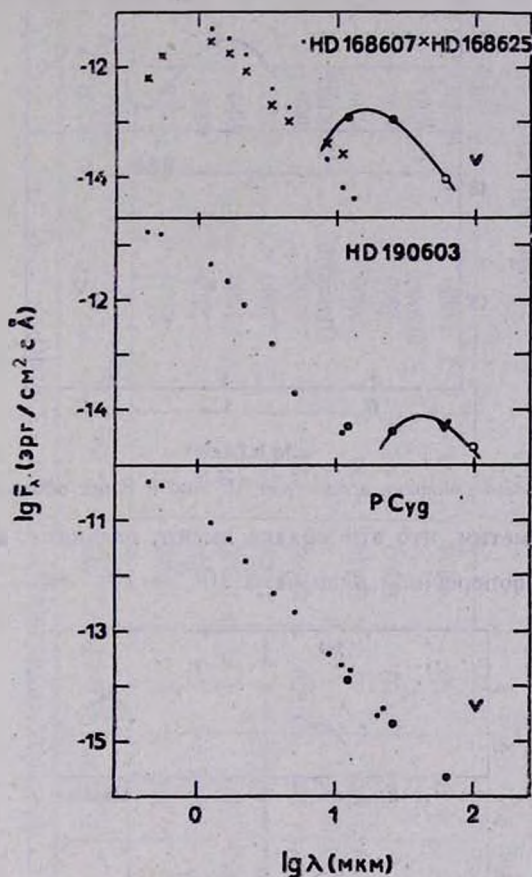


Рис. 2. Распределение энергии в спектрах HD 168607, HD 168625, HD 190603 и P Cyg; обозначения см. на рис. 1.

Попытаемся определить радиусы пылевых облаков двумя способами — с использованием метода Блэквелла—Шаллиса [7] и в предположении лучистого равновесия излучения фотосферы и пыли. Предположим, что излучающее облако сферическое и излучает как черное тело при температуре, приведенной в табл. 1. В таком случае мы имеем

$$d = D \sqrt{F_{\lambda, \text{пыль}} / \pi B_{\lambda}(T_{\text{пыль}})},$$

где $F_{\lambda, \text{пыль}}$ — внеатмосферный, измеренный поток инфракрасного излу-

чения, $\pi B_{\lambda}(T_{\text{пыль}})$ — поток от чернотельного излучателя при температуре пыли, D — расстояние объекта от Земли и d — диаметр излучающего облака. В табл. 2 эти величины приведены в радиусах центральной звезды

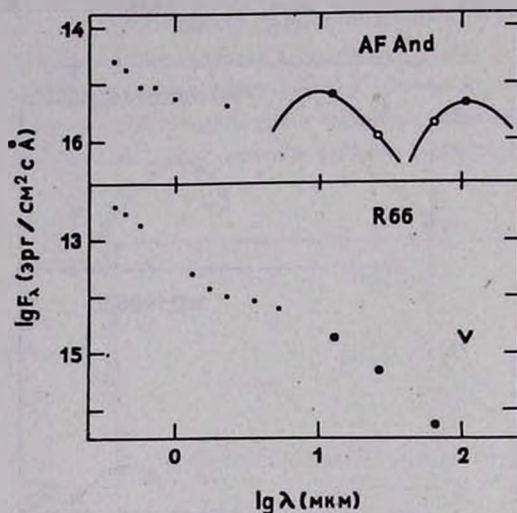


Рис. 3. Распределение энергии в спектрах AF And и R 66; обозначения см. на рис. 1. и в парсеках. Отметим, что эти облака имеют, очевидно, примерно одинаковый линейный поперечник, равный $5 \cdot 10^{-2} - 10^{-3}$ пк.

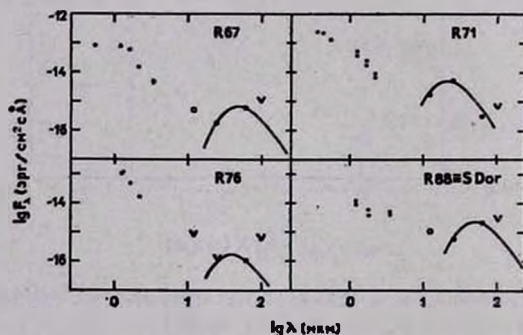


Рис. 4. Распределение энергии в спектрах R 67, R 71, R 76 и R 88 = SDor; обозначения см. на рис. 1.

Однако расстояние пыли от освещающей звезды можно определить и другим способом, предполагая лучистое равновесие излучения фотосферы и пыли. В таком случае мы имеем

$$d = \frac{1}{2} R_* (T_{\text{эфф}}/T_{\text{пыль}})^2,$$

Таблица 2

ДАННЫЕ О ПЫЛЕВЫХ ОБЛАКАХ ВОКРУГ ГГВС

Галактика	Объект	$T_{\text{пыль}}$ [K]	D [кпк]	$T_{\text{эфф}}$ [K]	$R_*/R_{\odot}$	$d_{\text{пыль}}/R_*$ (Бальмер-Шаллс)	$d_{\text{пыль}}/R_*$ (MDP)	$d_{\text{пыль}}$ [пк] (Бальмер-Шаллс)
Наша Галактика	HR Car	160	2.5	8000	100	1900	3200	0.004
	AG Car	100	2.5	9000	120	2200	4000	0.006
	HD 168607	175	1.8	16500	57	1300	4400	0.002
	HD 190603	75:	1.6	18900	58	2000	32000	0.003
М 31	AF And	320 30:	670	25000	72	5000 (1500000)	3000 (350000)	0.008 (2.5)
	R 71	145	52	18000	81	7800	7700	0.01
БМО	R 82	320 75	52	18500	50	2800 (150000)	1700 (30000)	0.003 (0.17)
	R 88	60	52	8800	300	11800	10800	0.08

где R_* — радиус звезды. Определенные таким образом расстояния от нагревающей фотосферы даны в табл. 2. Там же приведены фундаментальные характеристики исследуемых звезд по работам [8, 9]. Отметим, что во многих случаях эти параметры являются лишь грубыми оценками. Это обусловлено особенностями каждого объекта и невозможностью детально анализировать объекты по низкодисперсионным спектрам. Какую-то роль, несомненно, играет и переменность. Поэтому приведенные в табл. 2 данные нужно рассматривать как порядковые оценки.

4. *Обсуждение результатов.* Обнаруженные пылевые формирования около некоторых голубых переменных большой светимости указывают на сложность процессов в протяженных атмосферах. Мы понимаем присутствие пыли не во всех объектах как возможное периодическое появление пыли. Такое явление наблюдается у холодных звезд типа Вольфа—Райе, которые из-за более высокой температуры пыли доступны наземному систематическому исследованию [10]. Однако в случае ГПВС, из-за больших размеров звезд, наблюдаются другие временные и амплитудные характеристики (в случае звезд типа Вольфа—Райе $P \approx 10$ лет и $\Delta L \approx \approx 1^m \div 2^m 5$).

В табл. 2 приведены диаметры пылевых образований, определенные двумя способами. Они совпадают лишь в одном случае (R 71). Видимо, образование пыли довольно сложное явление, и условия, при которых инфракрасное излучение формируется, заметно отклоняются от идеальных, для которых написаны формулы определения: асимметрия ведет к неточностям при определении диаметров методом Блэквелла—Шаллиса и вряд ли имеет место термодинамическое равновесие с излучением фотосферы, поскольку протяженная оболочка составляет значительную часть суммарного излучения.

Обнаружение пыли около голубых переменных высокой светимости открывает возможность более детального исследования физических процессов в этих пока еще недостаточно изученных объектах. Однако это выходит за рамки данной статьи. Ниже подытожим наши результаты:

1. Около 13 голубых переменных высокой светимости из 16 объектов, отождествленных с точечными источниками наблюдаемыми с помощью астрономического спутника IRAS, обнаружена пыль.

2. В рамках модели симметричной вокруг звезды пылевой оболочки показано, что диаметры оболочки равны нескольким тысячам радиусам звезды или $5 \cdot 10^{-2} - 10^{-3}$ пк.

3. Указано на сложность формирования пыли в этих объектах и на необходимость дальнейших теоретических исследований.

Авторы благодарны Е. А. Ченцову за любезное предоставление спектров HD 168607 и HD 168625, А. Линнас и Х. Тургулайнен за помощь при оформлении статьи.

Институт астрофизики и физики
атмосферы АН Эст.ССР

Приложение

СПИСОК НЕОБНАРУЖЕННЫХ И НЕУВЕРЕННО ОТОЖДЕСТВЛЕННЫХ ЗВЕЗД

- AE And — Нет кандидата в каталоге IRAS.
 R40 — Нет кандидата в каталоге IRAS.
 R50 — Нет кандидата в каталоге IRAS.
 R55 — Вблизи IRAS 04470—6712, имеющий эксцесс на длинах волн 60 и 100 мкм. Отождествление неуверенное, отсутствует *JHKLMNQ*-фотометрия.
 R81 — Вблизи IRAS 05106—6849 с эксцессом на 60 мкм, отождествление очень неуверенное.
 R84 — Вблизи IRAS 05136—6925, который мы по лучшему согласию с R82 отождествляли с последним.
 R85 — Вблизи IRAS 05179—6918 и 05182—6918, однако они далеко и последний отождествляется с R 88.
 R94 — Нет кандидата в каталоге IRAS.
 R99 — Вблизи IRAS 05228—6802, однако отождествление весьма неуверенное.
 R116 — Вблизи два неуверенно отождествляемых источника IRAS — 05319—6836 и 05320—6832.
 R123 — Нет кандидата в каталоге IRAS.
 R127 — Вблизи IRAS 05371—6931, из-за отсутствия *JHKLMNQ*-наблюдений отождествление неуверенное.
 R136 — Из-за сложности 30 Dof комплекса отождествление неуверенное, вблизи IRAS 05389—6908.
 HD 169226 — Нет кандидата в каталоге IRAS.
 α Cyg — Нет кандидата в каталоге IRAS.

CIRCUMSTELLAR DUST IN THE VICINITY OF LUMINOUS BLUE VARIABLES

L. LUUD, T. TUVIKENE, M. RUUSALEPP

16 luminous blue variables (LBV) and related stars are identified as IRAS Point Source Catalogue Objects, 13 of them having far-infra-

red excesses. The excesses are interpreted as cold dust in the vicinity of LBV. In the framework of the symmetric sphere dust model the diameters of the shells are found using the Blackwell-Shallis method. They turned out to be equal to some thousands of photospheric radii ($5 \cdot 10^{-2} - 10^{-3}$ pc).

ЛИТЕРАТУРА

1. D. Stahl, C. Leithner, B. Wolf, F.-J. Zickgraf, *Astron. and Astrophys.*, 131, L5, 1984.
2. B. Wolf, F.-J. Zickgraf, *Astron. and Astrophys.*, 164, 435, 1986.
3. C. A. Betchman, G. Neugebaer, H. J. Habing, P. E. Clegg, T. J. Chester (eds.), *Infrared Astronomical Satellite (IRAS) Catalogs and Atlases Explanatory Supplement*, Jet Propulsion Laboratory Publication D-1855, Pasadena, 1984.
4. D. Y. Gezart, M. Schmitz, J. M. Mead, *Catalog of Infrared Observations*, NASA Reference Publication 1118, 1984.
5. L. R. Wackerling, *Mem. Roy. Astron. Soc.*, 73, 153, 1970.
6. L. B. F. M. Waters, P. R. Wessolins, *Astron. and Astrophys.*, 155, 104, 1986.
7. D. E. Blackwell, M. J. Shallis, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 180, 177, 1977.
8. H. J. G. L. M. Lamers, in "Luminous Stars in Associations and Galaxies", eds. C. de Loore, A. Willis, 1986, p. 157.
9. А. Лууд, Изв. АН Эст.ССР, сер. физ.-мат. н., 16, 369, 1967.
10. K. A. van der Hucht, P. M. Williams, P. S. The, *Proc. 2-nd Toriuo Workshop "Mass Outflow from Stars and galactic Nuclei"*, Prepr., 1987.