

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 12

НОЯБРЬ, 1976

ВЫПУСК 4

ОБЗОРЫ

ИНФРАКРАСНЫЕ ЗВЕЗДЫ. (ОБЗОР НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ).

Г. В. ХОЗОВ

Поступила 2 октября 1976

В обзоре рассматриваются основные данные фотометрических, спектральных и поляризационных наблюдений холодных звезд, выполненных в оптическом, инфракрасном и радиодиапазонах в 1965—1975 г.г.

1. *Введение.* Впервые определение «инфракрасная (ИК) звезда» было дано Джонсоном [1] в середине 60-х годов для звезды, свыше 90% наблюдаемого излучения которой приходится на область спектра с длинами волн более 0.8 мкм. Если принять планковское распределение энергии в непрерывном спектре звезды, то очевидно, что критерию Джонсона удовлетворяет любая звезда с фотосферной температурой, не превышающей 2500 К. Этому же критерию удовлетворяют и более высокотемпературные звезды, на наблюдаемое излучение которых оказывают заметное влияние эффекты межзвездного или околозвездного покраснения. Таким образом, понятие «ИК звезда» (согласно определению Джонсона) весьма неопределенно и носит скорее описательный характер, чем отражает какой-либо этап звездной эволюции или внутреннее подобие физических свойств группы однородных объектов. В то же время в современной литературе можно встретить упоминание об ИК звездах в связи с: а) долгопериодическими М и SS переменными типа Миры Кита; б) углеродными (С) звездами; в) полуправильными, и неправильными М-гигантами; г) сверхгигантами классов М2 и позже; д) сильно покрасневшими звездами разных спектральных классов; е) звездами типа Т Тау; ж) ОI и Ве звездами с мощными газово-пылевыми оболочками; з) протозвездами на разных стадиях эволюции.

Естественно, что в одном обзоре невозможно охватить всей совокупности наблюдательных данных по такому разнообразию представителей звездного населения. Поэтому мы сузили круг рассматриваемых объектов, именуемых в дальнейшем ИК звездами, понимая под этим определением только холодные звезды, чьи фотосферные температуры не превышают 2500°K .

Многие сведения о наблюдениях этих и всех остальных из вышеречисленных объектов, выполненных до 1971 г., можно найти в обширной обзорной работе Нейгебауэра, Беклина и Хойланда [2], которая посвящена источникам ИК излучения как галактического, так и внегалактического происхождения, а также в работах [3—9]. За последние годы была получена обширная информация о разнообразных характеристиках излучения холодных звезд, существенно дополняющая ранние представления о них, а в ряде случаев и пересматривающая эти представления.

Целью данного обзора является систематизация разбросанных в текущей литературе основных наблюдательных данных, относящихся к ИК звездам. При этом не ставилась задача охватить все объекты и рассмотреть все опубликованные работы. Однако все основные наблюдаемые проявления ИК звезд в той или иной мере представлены в обзоре и проиллюстрированы наиболее характерными примерами из оригинальных работ. В данном обзоре мы стремились избежать вопросов детальной интерпретации наблюдений и сопоставления их с существующими теоретическими представлениями и моделями, касаясь их только в самом общем виде.

2. ИК обзоры неба. Основным первоисточником данных об ИК звездах являются опубликованные результаты обзорных наблюдений в ИК области. Именно они дают нам сведения о численности, пространственном распределении ИК звезд, а также о некоторых фотометрических и спектральных характеристиках, позволяющих выделить их.

Вопросы о численности и пространственном распределении не могут быть в настоящее время решены однозначно из-за: а) недостатка необходимой информации для выделения (наблюдательного) действительно ИК звезд из числа известных источников ИК излучения; б) ограниченных возможностей техники обнаружения таких объектов; в) незавершенности поисковых и обзорных программ наблюдений, которые проводились или проводятся в настоящее время.

Первый поиск холодных звезд провел Гетцлер [10] в 1937 г. Используя фотографическую методику, он обнаружил чрезвычайно яркие звезды в области $8500\text{—}9260 \text{ \AA}$, цветовые температуры которых оценивались в пределах от 1000 до 2000°K . Из-за отсутствия необходимых технических возможностей для детального исследования этих объектов открытие Гетцлера осталось без должного внимания. И лишь в середине 60-х годов началась широкая полоса поисковых и обзорных наблюдений с целью

явления холодных звезд. В табл. 1 приводится сводка основных данных ИК обзора неба, представленная в хронологическом порядке.

Наиболее полным является двухмикронный обзор неба, выполненный в 1964—1965 г.г. Нейгебауэром и др. [11] в Калифорнийском технологическом институте (США). Именно эта работа стимулировала в дальнейшем широкий интерес к ИК звездам, и по настоящее время наблюдатели в основном ссылаются на этот обзор. Наблюдениями было охвачено примерно 75% всего неба. В результате было выявлено около 20 000 звездных источников, зарегистрированных на 2.2 мкм. Позже было каталогировано 614 объектов [12], наиболее ярких в этой области спектра. Поскольку наблюдения проводились одновременно в двух спектральных участках, оценки цвета позволили судить о цветовых температурах зарегистрированных источников. Экстремальные значения показателей цвета $I-K > 6^m$ указывают на очень низкие температуры порядка 1500—1000 К. Отмеченная в [13] тенденция к группированию примерно 1% зарегистрированных источников с показателем $I-K \approx 7^m$ не подтверждается. Анализ всей совокупности данных двухмикронного обзора показывает, что не существует «провала» в зависимости числа звезд от величины показателя, а имеет место естественный спад в числе зарегистрированных источников по мере увеличения показателя, определяемый предельными возможностями аппаратуры.

3. *Фотометрические характеристики.* Основу фотометрии ИК звезд составляют многоцветные наблюдения в полосах стандартной системы U, B, V, R, I, J, H, K, L, M, N, Q, охватывающей диапазон длин волн от 0.36 до 20 мкм. Цветовые соотношения в разных вариантах дают информацию о цветовых температурах звезд, величине покраснения, некоторых спектральных особенностях при низком разрешении, а звездные величины в каждом цвете могут быть пересчитаны в монохроматические потоки на эффективных длинах волн в соответствии с абсолютной калибровкой системы [27] для построения распределений энергии излучения ИК звезд во всем интервале длин волн.

А. *Показатели цвета.* Прежде всего следует отметить, что само определение ИК звезды предполагает большие различия между их визуальными и ИК величинами. Действительно, значения $V-K$ составляют 12^m-17^m (по сравнению со средними 6^m-7^m для M5 гигантов и сверхгигантов [28, 29]), а $V-N$ достигает 22^m (например, в случае NML Cyg). И если для отдельных наиболее холодных долгопериодических переменных звезд, известных ранее, в минимуме блеска $V-K$ достигает 12^m-13^m (например, χ Cyg), то ни одна из них не имеет $V-N > 16^m$. Важно отметить, что показатели чернотельного излучения даже при $T \div 1500^\circ\text{K}$ (что соответству-

Автор	Год	Ссылка	Спектральная область $\mu\text{м}$	Метод поиска (обзора)	Область неба
Гетцлер	1937	10	0.56—0.85	фотограф.	Площади обл. Мл. Пути
Нассеу и др.	1956	14	0.68—0.88	фотограф.	Экваториальн. зона, 12 обл. Мл. Пути
Холл	1964	15	1.3 — 3.0 3.0 — 3.0 8 — 13	фотолентр. сканирован.	18° северного полушария
Вестерлуид	1965	16	0.9	фотограф. (объект. призм.)	SA-13 ($2^\circ > l'$)
Нейгебауэр, Марц, Лейтон	1965	13	0.68—0.92 2.01—2.41	фотолентр. сканирован.	Область Мл. Пути в Возничем и Тельце
Ульрих и др.	1966	17	0.68—0.92 2.01—2.41	фотолентр. сканирован.	$-33^\circ < \delta < +81^\circ$ (And, Ser, Her, Cyg)
Акермани, Германи	1966	18	0.68—0.88	фотограф.	$-20^\circ < \delta < +30^\circ$ $50 < \alpha^\circ < 70^\circ$
Аро, Чавира	1967	19	0.8	фотограф.	$z = 17-20^h$ $\delta = -20^\circ - 20^\circ$
Хоффмани и др.	1967	20	300—360	фотолентр.	50° небесной сферы
Маффей	1967	21	0.68—0.88	фотограф.	3 площади М 20 и М 17, Единорог
Прайс	1968	22	2.2	фотолентр.	$-52^\circ < \delta < -30^\circ$
Нейгебауэр, Лейтон	1969	11—12	0.68—0.92 2.01—2.41	фотолентр. сканирован.	75° неба $-35^\circ < \delta < +89^\circ$
Акермани	1970	23	0.68—0.88	фотограф.	4 поля вблизи плоскости Галактики по $10^\circ \times 4^\circ$ — каждое
Хоффмани и др.	1971	24	100	фотолентр.	750 кв. гр. галактич. плоск. $88^\circ - l - 335^\circ$
Хаффнар	1972	25		фотограф.	южное небо от -36° (и южнее)
Волвер, Хоффмани, Вильяссер	1972	26	0.5—2.5	фотолентр.	Созвездие Лебеди

Таблица 1

ПОИСКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Число объектов	Обозначения	Примечания
4953—M5—M10 941—M7—M10 21	Netzler (Ht)	Обзор проводится с целью поиска „ИК звезд“
250 звезд M1—M10, 12 углор. звезд		
10 звезд с $I-K \approx 7^m$	NML	Предварительные результаты обзорной программы Калифорнийского технологического института
14 звезд с $I-K \approx 6^m$	CIT	Продолжение обзорных наблюдений в Калифорнийском технологическом институте
3 объекта		Предварительные результаты поисковой программы наблюдений
126	H-C	
Источников ярче $2 \times 10^{-10} \text{ ватт-см}^{-2} \cdot \text{м}^{-2}$ не обнаружено		Обзор с воздушного шара
15 ИК звезда		
414 зв. с отождествл.		
20 000—зарегистр.; 5614 с K ярче 3^m каталогировано	IRC	Распределение в Галактике для 2500 звезд показывает, что простр. плотность у полюсов $\sim 0,02$ на кв. гр. а около экватора $\sim 0,50$ на кв. гр.
400 с $B-R > 4^m$		Баллонные наблюдения
72 источн., часть из них отожд. с ИК звездами		
2330 звезд с $B-I > 4^m$.		
20 из них имеют $B-I > 6^m$		
58 звезд с $V-K > 10^m$.		
30 имеют $I-K > 6^m$		

ет самому низкому значению аффективных температур среди ранее известных наиболее холодных звезд) существенно меньше. Это иллюстрирует табл. 2, где приводятся данные для двух наиболее изученных ИК звезд NML Tau и NML Cyg. Для сравнения указаны показатели цвета χ Cyg и T Lyr, а также звезды спектрального класса F0I с покраснением больше 10^m (CIT-11).

Таблица 2
ПОКАЗАТЕЛИ ЦВЕТА ИК ЗВЕЗД (СРЕДНИЕ)

Источник излучения	B-V	V-R	V-K	V-N	I-K	K-L
NML Cyg	4.5	5.3	16.6	21.9	6.6	2.3
NML Tau (макс.)	3.4	5.6	13.8	—	4.2	1.2
NML Tau (мин.)	—	5.9	15.8	—	6.0	1.6
CIT-11	4.3	4.6	12.8	15.5	4.9	0.7
Черное тело $T=1500$ K	3.3	4.8	10.3	12.7	2.8	1.1
χ Cyg	2.5	5.9	13.6	15.3	3.7	0.8
T Lyr	5.5	2.9	7.9	8.5	3.3	0.8

Джонсон [7, 8] и Мендоза [6] показали, что двухцветная диаграмма B—V, V—R позволяет оценить спектральные свойства холодных звезд. На рис. 1 углеродные (C) звезды образуют четко выделяемую последовательность (идущую почти горизонтально) с малыми вариациями V—R. Наоборот, титановые (M) и циркониевые (S) звезды располагаются соответственно слева и справа от вертикальной линии B—V = 1^m6 (значения, характерного для M и S звезд [8]). К сожалению, многие ИК звезды чрезвычайно слабы в B ($\sim 20^m$) и даже в V. Однако около 20 объектов, для которых имеются B—V, занимают на диаграмме область справа и выше последовательностей M—S и C звезд. Наклонные параллельные линии являются линиями раздела зон, в которых оказываются сильно покрасневшие M и S гиганты, согласно расчетам Ван де Хюлста [30]. Не все ИК звезды «уходят» в зоны покраснения. Некоторые, в основном из числа ранее известных наиболее холодных мирид (TX Cam, RU Her (CIT-8), MW Her (CIT-9), DG Cyg (CIT-12) и др.), остаются вблизи или на последовательности. В то же время объекты Аро—Чавиры (H—C), Гетцлера (H1) и другие ИК звезды (CIT, NML) имеют показатели, указывающие на возможные большие покраснения. В ту же область попадают и экстремально покрасневшие звезды, заведомо не подпадающие под наше определение ИК звезды. Следовательно, способа оценки спектральных свойств ИК звезд на основании показателей цвета фотометрия не дает.

Б. *Распределение энергии излучения.* Основные характеристики распределений ряды ИК звезд, построенных по данным многоцветных фотометрических наблюдений обсуждались в ранних работах [1, 31—35]. Для принятых при нормировании по максимуму температур, чернотельные кривые более или менее удовлетворительно согласуются с наблюдениями в коротковолновой части спектра. В релей-джинсовской части прокалиброванные в абсолютной мере потоки оказываются даже на порядок выше.

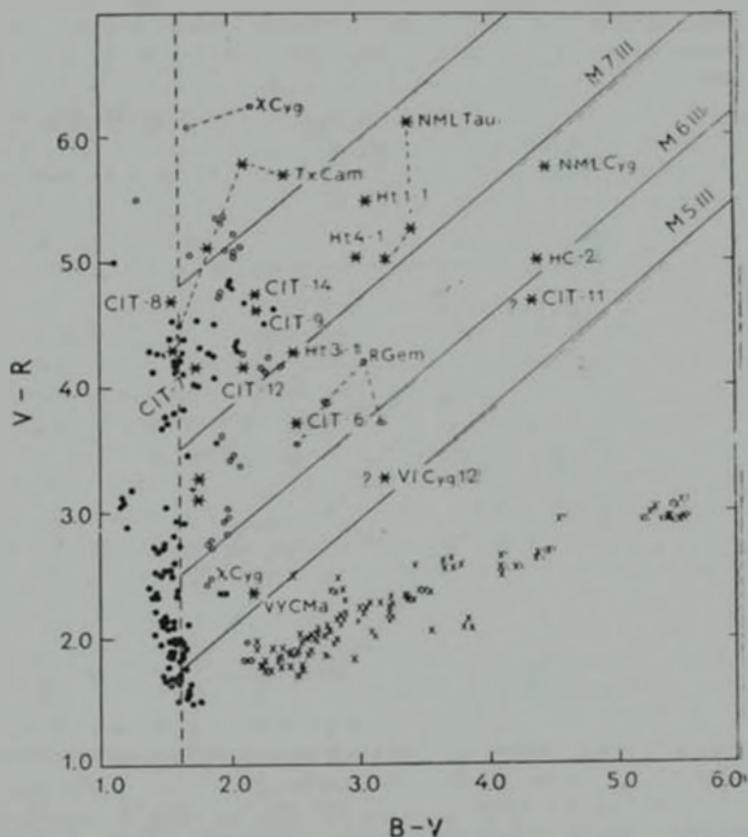


Рис. 1. Двухцветная диаграмма $B-V$, $V-R$ для ИК звезд. (●) — М звезды; (○) — S звезды; (·) — С звезды; (*) — ИК звезды.

На основании собственных наблюдений в диапазоне $0.55-10.2$ мк: Дик и др. [36] построили и проанализировали распределения энергии для 40 ИК звезд, сопоставив их с аналогичными распределениями для ряда известных долгопериодических переменных звезд и постоянных красных

гигантов и сверхгигантов. ИК звезды выделялись на основании $I-K > 5^m$. Величины потоков на 10.2 мкм коррелируют с показателями, причем даже для звезд, расположенных на высоких галактических широтах, где эффекты межзвездного покраснения должны быть незначительными.

Построенные по данным многоцветной фотометрии спектры неизменно свидетельствуют о дополнительном более холодном источнике излучения. Континуум во всем наблюдаемом ИК диапазоне может быть представлен несколькими наложенными друг на друга чернотельными кривыми с монотонно убывающими температурами. Например, можно отметить распределение энергии в спектре NML Cyg, предложенное Штейном и др. [37]. Распределение представляет суперпозицию трех чернотельных излучений с температурами 1500, 850 и 250°K. для IRC+10216 (CW Leo) наблюдаемое распределение можно представить до $\lambda = 5$ мкм чернотельной кривой с $T = 650$ K, а при $\lambda > 5$ мкм с $T = 500$ K [35].

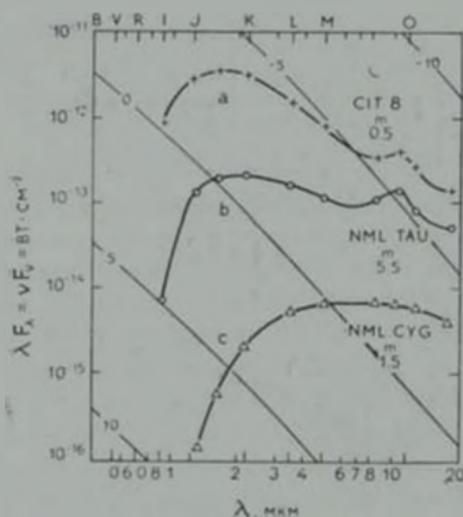


Рис. 2. Зависимости λF_λ от λ для: а) «нормальной» ИК звезды; б) таурида; в) цигниды.

Обширная программа фотометрических наблюдений ИК звезд в области 0.9—18 мкм с разрешением $\Delta\lambda/\lambda = 0.1$ была выполнена в 1972—1973 г.г. Стрекером и Неем [38—40]. Целью работы было получение и изучение непрерывных спектров. Всего они пронаблюдали около 250 объектов, 235 из которых пытались идентифицировать Гросдален и Гаустад [41]

и не нашли для них визуальных аналогов ярче 12^m . В программу были включены также 14 объектов CIT [17], NML Tau, NML Cyg и IRC+10216. Калиброванная аппаратура позволила более или менее подробно построить непрерывные спектры всех ИК звезд программы в абсолютных значениях. Большинство звезд ($\sim 90\%$) имеют распределения энергии, подобные известным ранее для гигантов и сверхгигантов поздних типов с подъемом в области 10 мкм. На рис. 2а такое распределение, по результатам работы [40], приводится как λF_λ (от. см⁻²) в функции длины волны λ (мкм). В диапазоне 2—5 мкм спектры хорошо согласуются с релей-джинсовской частью чернотельного излучения (наклонные линии — 10, 0, 5, 10). Назовем их условно «нормальными» распределениями. Примерно 10% изученных объектов имеют распределения, заметно отличающиеся от «нормальных». При этом здесь выделяются две группы ИК звезд. В первой — кривые на $\lambda < 2$ мкм представляют очень холодное или сильное покрасневшее чернотельное излучение, в то время как при $\lambda > 2$ мкм распределение имеет наклон, характерный для свободно-свободных переходов ($f_\nu = \text{const}$), с явно выраженными подъемами вблизи 10 и 20 мкм. Характерным представителем этой группы является NML Tau (рис. 2б). У звезд второй группы практически не наблюдается подъемов в 10 и 20 мкм. Их ИК континуумы имеют плавный ход во всем исследованном диапазоне волн. Чернотельные температуры, соответствующие наблюдаемым распределениям, заключены в интервале 400—800°K (!). В числе представителей второй группы наиболее исследованной и характерной для этой группы является NML Cyg (рис. 2с). Стрекер и Ней предложили разделить ИК звезды на два класса и назвать их соответственно тауридами и цингидами. По-видимому, третьим классом ИК звезд следует считать все остальные поздние звезды с «нормальными» распределениями, удовлетворяющие нашему определению.

4. Спектры ИК звезд. Поскольку почти вся энергия излучается ИК звездой в области $\lambda > 0.8$ мкм, спектры их в этом диапазоне дают основную информацию о звездных атмосферах. Наблюдения в диапазоне от 0.8 до 20 мкм являются основными и наиболее ценными, так как эта область относительно свободна от поглощения в земной атмосфере (я «окна» прозрачности) и содержит спектральные детали преобладающих в составе звездных атмосфер молекул, таких, как H₂O, CO, TiO, VO, ZrO, CN, C₂H₂, HCN и другие. Эти молекулы проявляются по своим абсорбционным свойствам. Причем интенсивности тех или иных полос поглощения заметно различаются в зависимости от химического состава атмосфер звезд. Обширный обзор по ИК спектрам звезд для области $\lambda > 0.9$ мкм (в том числе и для ИК звезд по результатам наблюдений до 1969 г.) дан в работе Спинрада и Уинга [42]. Поэтому здесь мы не будем подробно останавли-

ваться на спектральных особенностях холодных звезд, а коснемся только тех из них, которые наиболее выражены в ИК звездах.

А. Классификация. Прежде всего о спектральной классификации холодных звезд. Она основана на анализе полос поглощения TiO , VO (для M звезд) и C_2 , CN и других углеродных соединений (для C звезд) в области спектра до $1 \mu m$ [43—46]. Экстраполяция разработанных критериев показывает, что основной массой ИК звезд составляют титановые звезды $M6—M10$, затем углеродные ($C6—C10$) и, наконец, циркониевые ($S6—S10$).

С бесщелевым призмным спектрометром и ЭОП Фогт [47] получил спектры 235 объектов IRC, которые не были идентифицированы с известными слабыми красными звездами Диборнского каталога [41]. В табл. 3 приводятся результаты работы Фогта, включающие звезды Северного полушария ($\delta \geq -4^\circ$). По фотографическим спектрограммам, полученным с объективной призмой, Генри [48] получил спектры 120 звезд Гетцлера, для которых наблюдаемые $m_{3401} - m_{4100} > 2^m$. Спектральные классы большинства из них оказались $M5—M9$. Аналогичные спектры ИК звезд (в том числе и объектов NML Тау и NML Cyg) получил Пеш [49]. Как видно, основную массу изученных ИК звезд составляют поздние M звезды. Дик и др. [50] из 38 ИК звезд, для которых была сделана спектральная классификация, нашли только 4 углеродные звезды. Остальные — звезды $M6—M10$.

Таблица 3
СПЕКТРАЛЬНЫЕ ТИПЫ ИК ЗВЕЗД [47]

M4	M4—M6	M7—M8	M9—M10	C	?
10	25	142	47	9	2
В с е г о		235 звезд			

Не всегда экстраполяция критериев классификации холодных звезд, примененная к ИК звездам, дает уверенные результаты. Это особенно наглядно иллюстрировал пример NML Cyg. Слабые полосы TiO и VO , а также H_2O , с одной стороны, и заметно выраженное поглощение CO вблизи $2.3 \mu m$, с другой, — все это давало основание предполагать подобие объекта углеродным звездам [51]. Однако более тщательный и подробный анализ спектров, полученных Джонсоном с помощью интерферометра Майкельсона [52], с привлечением теоретических исследований Юнга [53] определенно показал, что NML Cyg является сильно покрасневшим сверхгигантом $M6—M7$.

Б. *Абсорбционные и эмиссионные спектры.* В основу изучения спектров ИК звезд в ранних работах [42, 54] было положено сопоставление их с подобными спектрами известных звезд поздних классов М, S, C. Спектры ИК звезд в области $\lambda < 1$ мкм во многом сходны со спектрами холодных звезд. Здесь также важную роль играют абсорбционные свойства различных окислов. Однако коротковолновые спектры цигнидов, в отличие от тауридов, имеют очень слабо выраженные полосы поглощения [39].

Наблюдения в области $\lambda > 1$ мкм свидетельствуют о том, что основную роль здесь играет поглощение H_2O и CO , а также, в меньшей степени, CN , C_2H_2 , C_2 , HCN . Свойства поглощения этими молекулами зависят от соотношения C/O , которое для звезд разных спектральных типов имеет вполне определенные значения: $C/O < 1$ —для М звезд, $C/O \approx 1$ —для S звезд и $C/O > 1$ —для C звезд. В ИК звездах класса М поглощение H_2O значительно сильнее наблюдаемого в звездах S и C. Согласно [54] концентрация CO остается примерно одинаковой во всех случаях, но концентрации H_2O резко уменьшается в S звездах и, особенно, в углеродных. Для многих ИК звезд характерна более или менее выраженная депрессия спектров вблизи 2.3 мкм. Юнг [53] показал, что относительная сила полос CO -сери в этом интервале зависит от температуры. Вычисления Юнга хорошо соответствуют наблюдаемым структурам полос CO для звезд с различными температурами [45]. Из наблюдений ИК звезд следует, что степень депрессии континуума в районе полос CO у 2.3 мкм связана со светимостью звезд: чем выше светимость, тем больше депрессия.

При рассмотрении спектров ИК звезд особо следует выделить область длин волн больше 7 мкм. Наблюдения в диапазоне от 7 до 35 мкм показали эмиссионные детали в их спектрах. Эмиссионные «пики» наблюдаются у ИК звезд с «нормальным» распределением и тауридов. Подобный «пик» наблюдался и ранее в поздних звездах [55, 56], однако для ИК звезд, и, в первую очередь, для М звезд, эмиссия в области 10 и 20 мкм выражена значительно сильнее.

В работах [57, 58] опубликованы данные спектрофотометрии поздних звезд, в том числе и ИК, с разрешением $\Delta\lambda/\lambda = 0.01$ —0.02 в диапазоне 2.8—20 мкм. Наблюдаемое распределение энергии удовлетворительно объясняется фотосферной радиацией звезды на коротких волнах с дополнительной эмиссией на $\lambda > 8.4$ мкм, которую для М и S звезд, богатых кислородом, можно идентифицировать с излучательной способностью силикатных материалов. Лоу и Кришна Свами [59] наблюдали у α Ogi вблизи 20 мкм «пик» излучения, характерный для силикатов. Двойные «пики-эмиссии (на 10 и 20 мкм) для ряда холодных звезд М и S типов отмечены в [60, 61].

5. *Температуры ИК звезд.* Температура является одной из важнейших звездных характеристик. Для холодных звезд определение температу-

гурной шкалы всегда было и остается трудной задачей и прежде всего из-за значительного расхождения (до 1000 и более градусов) определенных наблюдательно многочисленными способами цветовых и эффективных температур, а также несоответствия этих температур с полученными на основании спектроскопических данных. По мере получения новых наблюдательных данных (особенно в длинноволновой части спектра) расхождение усиливалось и требовало очередного (!) пересмотра калибровки звездных температур [7, 32].

Уже предварительная оценка температур звезд каталога двухмикронного обзора [12] на основании показателей цвета I—K показывает, что они в подавляющем большинстве заключены в пределах 1500—3500 К. Однако ИК звезды имеют температуры, определенные на основании чернотельного приближения при I—K > 6^m, менее 1500°К.

Согласно Джонсону [28], наилучшие результаты при оценке T_{eff} звезд всех спектральных типов до M5 (включительно) дают определения по показателю I—L. Однако шкала T_{eff} Джонсона охватывает лишь звезды с минимальными температурами до 2800 К. Поэтому определение температур ИК звезд связано с необходимостью экстраполяции и не дает уверенности в правильности сделанных оценок. Спектральное сканирование в диапазоне 0.75—1.08 мкм, выполненное Уингом [42] для ряда звезд M6—M10, подтверждает неудовлетворительность экстраполяции температурной шкалы Джонсона. Действительно, сравнительно широкая полоса $I(0.75) \approx 0.9$ мкм) фотометрической системы охватывает абсорбционные полосы TiO, VO, H₂O. При этом наблюдаемые потоки в I оказываются ниже в 2 раза для звезд M6—M8 и в 5 раз для M10 по отношению к ожидаемым для случая чернотельной аппроксимации в I и L [62]. Это, конечно, сказывается на оценках эффективных температур звезд. Поэтому они могут рассматриваться как ориентировочные.

Самая низкая температура была найдена для «необычного» ИК объекта в созвездии Льва. В 1969 г. Беклин и др. [35] опубликовали как один из частных результатов изучения объектов IRC наблюдения IRC+10216 (по OK113 [63] CWLeo). T_{eff} для этой звезды оценивается в 600 К.

На рис. 3 приводятся эффективные температуры наиболее изученных ИК звезд в зависимости от показателя цвета I—K. Они обозначены звездочками. Как видно, ИК звезды продолжают последовательность T_{eff} ранее известных наиболее холодных M, S и C звезд [6, 7, 36].

Отличительной чертой, характерной для ИК звезд, является значительное отличие цветовых и эффективных температур (из фотометрических наблюдений) от температур, определенных по спектральным наблюдениям. Как правило, первые оказываются намного ниже. Этот факт можно легко объяснить, если принять, что наблюдаемая радиация от ИК звезды является излучением двух источников с различными температурами. Спектраль-

ные наблюдения выявляют более высокотемпературный источник. Наиболее ярким примером является NML Cyg. Эффективная температура на основании фотометрии [31, 32] оценена в 700 и 1290°K, в то время как спектральные наблюдения [52] дают 2500°K. Многоцветная фотометрия показывает, что чернотельные приближения наблюдаемых распределений энергии излучения ИК звезд соответствуют температурам 500—1500°K, которые намного меньше принятой в нашем определении ИК звезды.

6. Избытки ИК излучения. Итак, многоцветная фотометрия, спектрофотометрия и детальная спектроскопия ИК звезд явно указывают на наблюдаемое дополнительное излучение в пределах некоторого интервала длин волн сверх ожидаемого для звезды, излучающей как черное тело с эффективной температурой, соответствующей ее спектральному типу. Такое дополнительное излучение принято называть «ИК избытком».

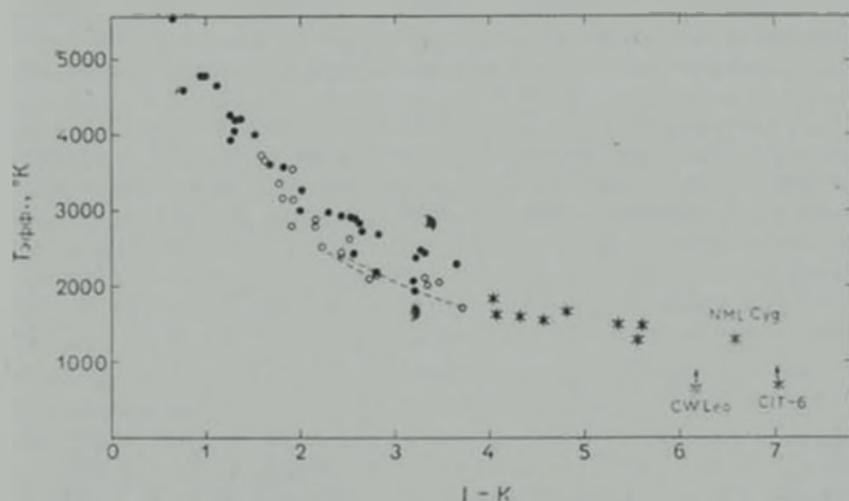


Рис. 3. Эффективные температуры холодных звезд. (●) — С звезды [6, 7, 36]. (○) — М и S звезды [6, 7] (штрихами соединены значения $T_{\text{эфф}}$ у Cyg и o Cet в фазах максимумов и минимумов); (*) — ИК звезды.

А. Возможные причины наблюдаемых ИК избытков. На диаграмме Герцшпрунга—Рессела (светимость—температура) последовательности гигантов и сверхгигантов идут почти горизонтально, и поэтому должны существовать звезды со сравнительно низкими температурами (2500°K и ниже), но обладающие вполне достаточными светимостями для того, чтобы быть обнаруженными современными средствами. Чернотельное излучение таких звезд почти полностью приходится на ИК область спектра. Назовем

их условно «нормальными» ИК звездами. Однако, как мы уже отмечали в разделах 3—5, дополнительное излучение всегда соответствует более низкотемпературному излучению. Каковы возможные механизмы возникновения такого излучения?

1) Причиной наблюдаемого ИК избытка может быть селективное поглощение межзвездной пылью, в результате чего происходит сдвиг наблюдаемого максимума излучения «нормальной» более горячей (чем принято для ИК звезд) звезды в ИК область. Спектральные данные для ИК звезд (по критерию Джонсона) свидетельствуют, что покрасневшие звезды ранних спектральных типов (например, V1574 Cyg 12, CIT-11) имеют аналогичные фотометрические характеристики.

2) Наличие массивных холодных спутников вблизи видимой звезды может быть также причиной заметного дополнительного излучения в области ИК воли. На это указывал Мендоза [6]. Однако из ИК звезд, включенных в данный обзор, лишь только VV Ser известна как двойная система. Наблюдательных доказательств двойственности других ИК звезд нет.

3) Возможным, но до сих пор не подтвержденным источником ИК излучения звезд является синхротронное излучение, связанное со вспышками. Радиовсплески синхротронного происхождения и нетепловой характер вспышечной оптической эмиссии и дают основание предполагать синхротронное излучение в области ИК длин воли. Однако в этом случае невозможно было бы объяснить характер периодической переменности большинства ИК звезд, о которой пойдет речь в дальнейшем. Кроме того, нет данных о значительных магнитных полях у ИК звезд.

4) Как одно из объяснений ИК излучения Мендоза [6] выдвинул предположение о возможных аномалиях химического состава протяженных звездных атмосфер. В некоторой степени для углеродных ИК звезд такое объяснение может быть принято. Однако нельзя забывать о громадных светимостях (до 90% от общей) таких звезд в длинноволновой части спектра, чего никак не объяснить химсоставом.

5) Одной из наиболее очевидных (и в настоящее время общепризнанных) причин ИК избыточного излучения звезд является наличие сравнительно холодного вещества вблизи звезды. Впервые реальность существования пылевых оболочек стала широко обсуждаться после открытия ИК звезд. Большая часть наблюдаемого ИК излучения возникает при рассеянии и тепловом переизлучении частицами околозвездной материи, нагретыми коротковолновой радиацией центральной звезды. Подобная модель обсуждалась в ряде ранних работ [6, 35, 52 и др.]. Наблюдаемое энергетическое распределение обычно имеет коротковолновую компоненту,

представляющую спектр нормальной звезды и относительно гладкую длинноволновую компоненту излучения оболочки. Реально предположить наличие градиента температуры вещества оболочки от фотосферных слоев звезды к периферии протяженной оболочки [64]. Это объясняет сглаженность длинноволновой компоненты. Кроме того, дисперсии размеров, плотностей, а также различия химического состава и формы пылевых частиц — все это дополнительно «размазывает» ее. Однако, как показано в [66], селективное поглощение, а следовательно и переизлучение частицами, носит для многих ИК звезд заметно выраженный характер.

6) В последние годы Вульф [61] и Джильман [66] рассмотрели возможность объяснения наблюдаемой избыточной длинноволновой ИК радиации эмиссией свободно-свободных переходов в звездных хромосферах. Следует отметить, что ранее о такой возможности писали в своей работе о космических источниках ИК радиации Барбидж и Штейн [5].

Б. Характеристики ИК избытков. Для количественного определения величин ИК избытков в различных звездах необходимо знать их эффективные температуры. Это в свою очередь требует установления спектрального типа звезды. Соответствие спектрального типа и $T_{\text{эфф}}$, как мы уже отмечали в разделах 5 и 6, основано на экстраполяции критериев, разработанных для поздних звезд. Однако для разных типов звезд такая экстраполяция имеет различную надежность. Если для M звезд надежность экстраполяции, как показано в [6], удовлетворительна, то для S и C звезд деление на подтипы слабо подтверждается наблюдательно. Возможная ошибка в определении $T_{\text{эфф}}$ естественно приведет к ошибке в определении величин ИК избытка. Поэтому количественные оценки ИК избытков в звездах (см. в разделе 10) можно рассматривать как ориентировочные. Отклонение спектрального распределения от черного тела будет дополнительным источником ошибок.

Итак, в настоящее время общепризнано, что большая часть (до 99% от общей) звездной ИК избыточной радиации возникает при тепловом излучении пылевых оболочек, окружающих центральную звезду. Энергетически звездная и околозвездная компоненты перекрываются в широком диапазоне длин волн. Однако для ИК звезд можно считать, что центральная звезда дает основной вклад в области до 2—3 мкм, тогда как в более длинноволновой части спектра мы наблюдаем только излучение оболочки. Причем, как показал Хербиг [64], эффекты рассеяния в оболочке при $\lambda > 3$ мкм пренебрежимо малы по сравнению с радиационными эффектами нагретых частиц. Наблюдения указывают, что в ИК звездах пылевые частицы в оболочках имеют различные температуры — от внутренних к периферийным слоям температура падает. Это и является причиной того, что

наблюдаемые распределения энергии представляются в виде суперпозиции нескольких чернотельных излучений [35, 37].

Избытки излучения, вызванные пылевыми оболочками, достаточно случайны. Для многих звезд поздних спектральных типов (не только НК), и в особенности для звезд с высоким содержанием кислорода, энергетическое распределение наблюдаемых избытков в диапазоне 7—14 мкм поразительно подобно ожидаемому для оптически тонкого облака силикатных частиц [57, 65]. Теоретические исследования молекулярного равновесия в околозвездных оболочках холодных звезд, выполненные Джильманом [66], показали, что силикаты Al_2SiO_5 и Mg_2SiO_4 наиболее вероятны с точки зрения конденсации в звездах с $C/O < 1$. Идентификация силикатов в околозвездных оболочках была подтверждена в [55, 56, 59].

Предварительные данные в работе [67] могут быть еще одним дополнительным аргументом в пользу силикатоподобной эмиссии в спектрах НК звезд. Был найден третий пик у 3 объектов в области 33 мкм, характерный для излучения пылевых частиц, таких, как $FeSiO_3$, Mn_2SiO_4 , Ca_2SiO_4 . Однако следует отметить, что для VUCMa и NML Cyg этой детали не было обнаружено, то есть, возможно, что присутствие силикатов в оболочках холодных звезд заметно отличается от звезд и звезды.

7. Поляризация излучения. Наличие диффузной материи вблизи НК звезд в виде оболочек подтверждается целым рядом наблюдательных фактов. Одним из существенных является поляризация излучения. Механизмы возникновения наблюдаемой поляризации в настоящее время рассматриваются в связи с двумя процессами: а) прохождением неполяризованного излучения звезды через толщу каким-либо образом ориентированных (например, магнитным полем [68—70], газовой струей [71]) пылевых частиц в оболочке; б) рассеянием неполяризованного излучения звезды в сферически несимметричных околозвездных оболочках [70, 72, 73]. И в том, и в другом случаях пылевая оболочка является ответственной за возникновение поляризации излучения звезды, которая в отличие от межзвездной (возникающей в удаленных от звезды облаках) называется собственной.

Собственная поляризация коротковолнового излучения холодных звезд изучалась в работах [68, 69, 74, 75 и др.]. Критерии определения поляризации как собственной обсуждались В. А. Домбровским [76]. Характерно, что наблюдаемая поляризация в видимой области у некоторых красных звезд высокой светимости (гиганты и сверхгиганты) достигает 6—7%, но, как правило, в длинноволновую сторону спектра она уменьшается и при $\lambda > 1$ мкм не превышает 1%.

Для ряда НК звезд была обнаружена поляризация НК излучения, намного превосходящая 1% даже на 22 мкм и, более того, явно превышающая ожидаемую из экстраполяции $p(\lambda)$ [77—80]. При этом отмечалось изменение позиционного угла с длиной волны. Рекордная для звезд величина

поляризации была зарегистрирована Шолом и Целлером в 1970 г. для ICR+10216 на $\lambda = 1$ мкм ($p \approx 20\%$). Интересно отметить, что позиционный угол поляризации объекта совпадает с малой осью эллипсоида, в виде которого этот объект был получен Арпом на снимках с 200" телескопом. Этот факт подтверждает принятую в [72] модель звезды, где поляризация объясняется рассеянием в асимметричной околозвездной оболочке. По-видимому, в данном случае мы имеем единственный случай, когда визуально (1) наблюдается оплозвездная оболочка вблизи ИК звезды. Геометрические размеры ее были оценены на разных длинах волны Тоомбсом и др. [81] при покрытии IRC+10216 Луной. Оболочка, окружающая центральную звезду, состоит из двух частей — внутренней ($\sim 0.4''$) и внешней, протяженной ($\sim 2''$).

Особый интерес представляют наблюдения зависимости поляризации от λ . Общая тенденция уменьшения степени в сторону больших длин волны сохраняется, так же, как и у ранее наблюдавшихся холодных звезд. Однако отличительной особенностью $p(\lambda)$ ИК звезд является отклонение от плавного хода в области 0.8—1.2 мкм (по-разному для различных объектов) с возрастанием p в области больших λ и последующим медленным уменьшением. При этом позиционный угол также изменяется. В интервале длин волны от 0.5 до 2.2 мкм угол в большинстве случаев изменяется в пределах до 90° [82]. Наиболее исследованным и характерным примером может быть зависимость величин поляризации и позиционного угла от $1/\lambda$ для VYCMa по данным [80, 82, 83] для близких моментов наблюдений. Характер зависимости явно указывает на присутствие в излучении VYCMa двух составляющих поляризованного излучения: коротковолновой и длинноволновой с различными $p(\lambda)$. Это подтверждается и характером зависимости $q(\lambda)$, впервые наблюдаемой у ИК звезд. Аналогичные зависимости наблюдаются у XMI. Тип [84], CIT-6 [85] и других ИК звезд.

Поляризационные наблюдения в области 10 мкм показали небольшую поляризацию (примерно 1%) для ряда ИК звезд с сохранением угла, измеренного на 2.2 мкм [86].

И еще один важный (с точки зрения особенности ИК звезд) наблюдательный факт следует подчеркнуть. Дик и др. [87] провели в 1969—1970 г.г. широкую программу поляризационных наблюдений холодных звезд, в том числе и ИК, и обнаружили корреляцию собственной поляризации в видимой области с ИК избытками. Во всех случаях, когда звезда с собственной поляризацией наблюдалась на 10—11 мкм, она неизменно отмечалась как звезда с большим ИК избытком, и то время, как аналогичного типа звезда без поляризации не всегда имеет такой избыток.

Анализ поляризационных наблюдений ИК звезд в широком спектральном интервале показывает, что поляризация, по крайней мере частично, является собственной. Механизм возникновения полной наблюдаемой поляризации достаточно сложен, чтобы быть объясненным в рамках единой

простой модели, хотя имеющиеся данные не противоречат отмеченным в начале раздела механизмам. Часто на наблюдаемую поляризацию собственно звездного излучения накладывается межзвездная, что затрудняет анализ наблюдений. В то же время можно отметить определенные закономерности: а) большая наблюдаемая поляризация ИК излучения не является обязательной для звезд с большими ИК избытками; б) поляризованное излучение ИК звезд, наблюдаемое в широком интервале длин волн, имеет две составляющие — коротковолновую, с более крутой зависимостью от длины волны (до λ^{-2}), и длинноволновую, со слабо выраженной зависимостью от длины волны; в) в ряде случаев наблюдается поворот (до 90°) плоскости преимущественных колебаний электрического вектора при переходе от видимых к ИК лучам.

Энджел и Мартин [88] в 1972 г. обнаружили круговую поляризацию в направлении четырех ИК звезд в области спектра 7150—8500 Å. Максимальная поляризация в 0,35% была отмечена у CIT-6, причем, как линейная, так и круговая оказались переменными. Круговую поляризацию N.M.I. Суд с максимумом 0,6% на 1,7 мкм нашел Серковский [89]. Было высказано предположение о возникновении круговой поляризации при многократном рассеянии излучения звезды в оболочке на асимметрично распределенных частицах.

8. *Переменность излучения.* В настоящее время можно с уверенностью сказать, что переменность является для ИК звезд правилом, почти без исключений (по крайней мере среди исследованных на переменность звезд).

А. *Переменность блеска.* Еще Гетцлер [10] отметил колебания яркости холодных звезд за короткое время от нескольких часов до нескольких суток. Приступая к выполнению программы обзорных наблюдений, авторы обзоров [12, 15] предполагали, что среди ИК объектов должно быть много холодных переменных звезд с периодами до нескольких лет. В некоторой степени это определило наблюдательную селекцию обзоров, так как в период их проведения часть источников ИК излучения оказалась слабее предельных для данной аппаратуры величин. С целью хотя бы частичного исключения селекции обзоры проводились в несколько этапов. Большинство ярких ИК звезд при более детальном изучении оказались долгопериодическими переменными типа Миры Кита [35, 90—94 и др.]. О переменности блеска ИК звезд сообщалось в [82, 95—100]. Обширные исследования переменности (около 400 ИК звезд) выполнили Хойланд и др. [101]. Во всех работах отмечались большие периоды и амплитуды изменений ИК блеска звезд в области $\lambda > 1$ мкм. На рис. 4 приведены гистограммы распределений наблюдаемых амплитуд и периодов для 150 ИК звезд [101].

Следует особо выделить вопрос об исследовании изменчивости блеска NML Cyg. Пожалуй, ни об одной другой ИК звезде не говорилось столь противоречиво. Джонсон [102] отметил пятидневное падение блеска в ИК примерно на $0^m.5$. Однако при этом не было обнаружено изменений цветов в 1.25—10.2 мкм, что поставило под сомнение изменчивость объекта. В частности, этот факт был одним из аргументов в пользу высказанного ранее предположения о протозвездном состоянии NML Cyg [1]. В [97—100] определенно показано, что звезда изменяет свой блеск со временем на всех λ , на которых проводились наблюдения, но изменения выражены слабее, чем у других ИК звезд. Более того, по характеру изменчивости в ИК лучах на основании длительных рядов наблюдений в [99, 100] выдвинуто предположение, что NML Cyg является миридой с аномально большим периодом около 1200 дней (по результатам наблюдений на 2.2 мкм в Астрономической обсерватории Ленинградского университета).

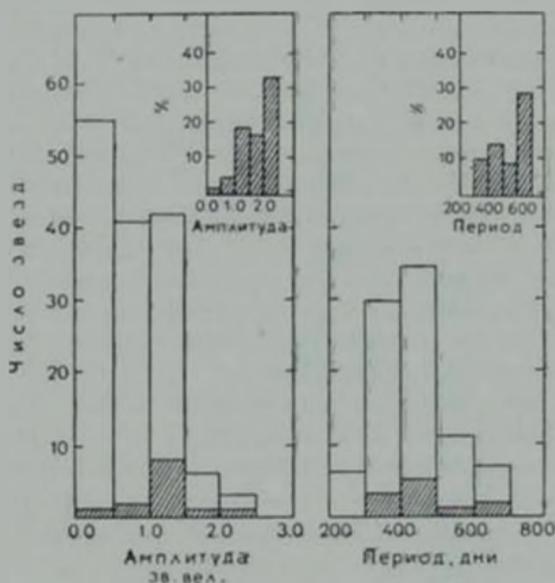


Рис. 4. Наблюдаемые значения амплитуд и периодов ИК звезд [101].

Хотя изучение изменчивости ИК звезд еще далеко от своего завершения, можно сделать некоторые обобщения: а) большинство ИК звезд (если не все) являются долгопериодическими, полуправильными или неправильными переменными; б) изменчивость ИК звезд отличаются большие периоды (обычно больше года) и значительные (по сравнению с ранее известными переменными) амплитуды в ИК области спектра: отношение потоков в 2.2 мкм в экстремумах достигает 8—10 [97]; в) как показали Стреккер и Ней [38—40] характерным для тауридов является незначительное умень-

шение амплитуды при переходе от видимых лучей к $\lambda \approx 1.5$ мкм, а затем, вплоть до 10 мкм, амплитуды остаются практически постоянными (выполняется соотношение $\Delta L.F. \approx \text{const}$); циклиды имеют четко выраженную тенденцию к уменьшению амплитуд с ростом λ ($\Delta L.F. \neq \text{const}$); r имеет место значительный фазовый сдвиг (до 0.25 P) моментов максимумов в ИК и видимых лучах [97—100]; d) для долгопериодических переменных ИК звезд существует корреляция между амплитудой и периодом изменений длинноволнового излучения (больше период — больше амплитуда).

Б. Изменения поляризации. Изменение степени или позиционного угла является одним из основных критериев определения собственной поляризации звездного излучения [76]. Когда обнаруживается переменность поляризации и особенно если имеет место периодичность ее изменений, можно утверждать, что в данном случае наблюдается собственно звездная поляризация.

Переменность поляризации ИК излучения была установлена на основании наблюдений Крушевского [103, 104], Форбса [105], Дика и Шола [73], Хозова и др. [98—100] для NML Cyg, NML Tau, VYCMa, CIT-5, CIT-6, CIT-13, IRC+10216 и других ИК звезд. В большинстве случаев изменения степени поляризации коррелируют с изменениями блеска объекта. Поляризация, как правило, возрастает в фазах минимального блеска и, наоборот, убывает при увеличении яркости звезды. Нет достаточно уверенных данных, на основе которых можно сказать, что эта корреляция строго выдерживается во всех циклах изменений блеска. Отмечены случаи очень быстрых вариаций степени или угла поляризации в долгопериодических переменных во временной шкале, несравненно меньшей длительности периода (порядка нескольких дней) [106].

Временные измерения поляризации в широком интервале волн, от видимых до ИК, показывают, что изменяется сам ход $p(\lambda)$ со временем; причем эти изменения имеют определенную тенденцию. В фазах, близких к минимуму блеска, подчеркнуто выражена зависимость поляризации коротковолнового излучения λ^{-4} при увеличении ее на всех длинах волн. Это может быть объяснено изменением структуры той части оболочки, где возникает поляризация звездного излучения.

Изучение связей параметров поляризации с блеском долгопериодических переменных звезд провели Форрест и др. [107]. Интересно, что они не нашли для исследованных объектов корреляции изменений p и θ с длинноволновым излучением (3.5—11 мкм), из чего было сделано заключение, что за ИК избытки ответственна вся околозвездная оболочка в целом, где общее число поглощающих и рассеивающих частиц не меняется или меняется незначительно со временем, тогда как поляризация возникает в локализованном объеме оболочки, где эффекты поглощения и рассеяния более выражены.

9. ИК звезды — источники радиоизлучения. Впервые OH эмиссия из $\lambda \approx 18$ см, ассоциируемая с ИК звездами (по пространственному положению), была обнаружена Уильсоном и Барреттом [108, 109] в 1968 г. В направлении NML Cyg было зарегистрировано сильное нетепловое излучение OH в линиях 1612 и 1665 мкц.

Результаты поисков и систематического изучения OH источников, ассоциируемых с положением ИК звезд, приводятся в [110—114]. Среди 465 звезд, преимущественно поздних спектральных типов M, у 25 была обнаружена OH эмиссия. Многие из них всесторонне изучали Хойланд и др. [101]. При этом было установлено, что: а) звезды, показывающие OH эмиссию, являются либо иррегулярными переменными, либо мириадами с периодами 1—2 года; б) все они являются звездами с высоким содержанием кислорода в атмосферах ($O/C > 1$), то есть исключительно M звезды поздних типов (M5 и позже); в) фотосферные температуры этих звезд примерно 1800—2000°K; г) большинство OH источников, хотя и неоднородны по возрасту, являются звездами в стадиях после главной последовательности; д) звезды имеют пылевые оболочки (вероятнее всего за счет потери массы центральной звездой) с температурами 600—800°K. Наблюдательно установлено, что ИК звезды с более мощными пылевыми оболочками излучают в линии 1612 мкц сильнее, чем в основных линиях 1665 и 1667 мкц и наоборот; причем OH эмиссия в основном поляризована слабо в линии 1612 мкц. Радиоконтинуум и излучение в линии 1720 мкц не зарегистрированы.

Для объяснения характеристик OH излучения Уилсон и Барретт [114], предложили модель облаков, насыщенных OH молекулами, расширяющихся несимметрично от звезды. Мазерное OH излучение поддерживается за счет накачки сильным ИК излучением. Более детальное изучение структуры OH ИК источника NML Cyg, дано в [115]. По результатам наблюдений области NWL Cyg с высоким пространственным разрешением (1.6) авторы приняли следующую модель. В центре находится сверхгигант спектрального класса M с $R_* = 2 \times 10^{14}$ см, окруженный областью ИК излучения с $R_{ИК} = 1.5 \times 10^{15}$ см. Внешнее по отношению к ИК источнику облако, содержащее OH молекулы, имеет $R_{OH} = 3 \times 10^{15}$ см. К наблюдателю приходит радиоэмиссия от внешних частей этого облака. На рис. 5 схематически дана модель OH ИК звезды, согласно другой работе тех же авторов, рассмотревших вопрос о структуре 4-х звездных источников OH эмиссии (в том числе и NML Cyg) [116].

Харвей и др. [97] в 1974 г. сообщили об измерениях временных вариаций микроволнового излучения 14 ИК звезд. Были получены подробные кривые изменений OH эмиссий в сопоставлении с ИК кривыми блеска на разных длинах волн (1.2; 1.6; 2.2; 3.5; 4.8 и 10 мкм). Наблюдения указывают на периодичность излучения в линии 1612 мкц, причем периоды

изменений ИК и радиоизлучения совпадают и составляют от 300 до 700 дней. Максимумы и минимумы ИК и радиопотоков для периодически изменяющихся источников примерно повторяются, а фазы с точностью $\sim 0.1-0.2$ P совпадают. Отношения потоков ОН излучения в максимумах и минимумах для ИК звезд составляют обычно от 2 до 4 раз. Изменение $1665/1667$ μm излучения не коррелирует с ИК излучением и носит, по-видимому, случайный характер. Таким образом, авторы делают заключение,

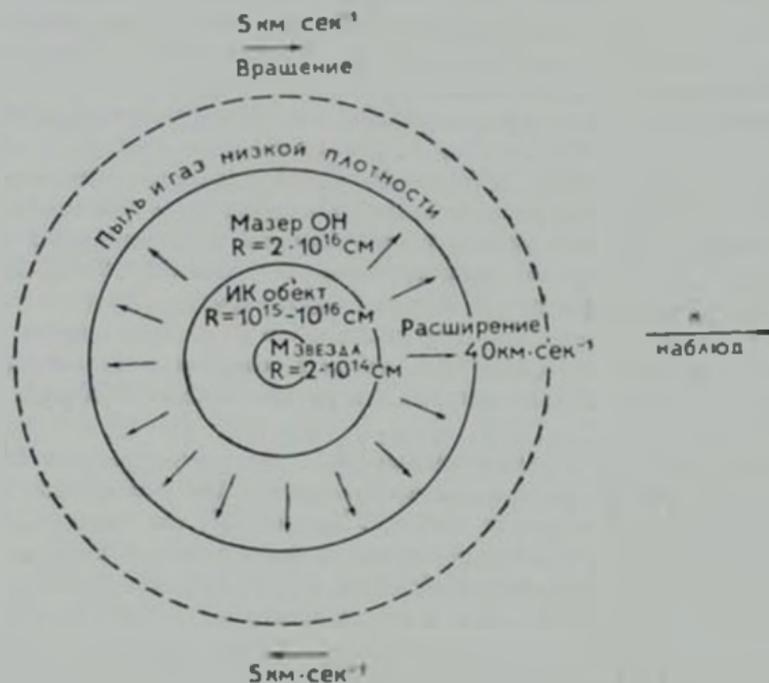


Рис. 5. Схематическая модель ОН/ИК звезды [116].

что наблюдаемая корреляция переменности ОН и ИК излучений таких звезд, по-видимому, связана с радиационным взаимодействием между звездой и ОН околозвездным облаком. Из рассмотренных механизмов наиболее вероятным, согласующимся с наблюдениями, является радиационная накачка мазера на 2.8 или 35 μm .

В 1970 г. Шварц и Барретт [117] предприняли попытку обнаружить радиоизлучение H_2O (1.35 см) в направлении 134 ИК звезд. Излучение было найдено только в направлении пяти звезд, в том числе NML Cyg.

В последние годы вопросам излучения ИК звезд в радиодиапазоне придается большое значение, поскольку детектирование и измерение излу-

чения в характерных линиях дает нам информацию о химическом составе околосредной материи. Появился ряд работ [118—121], в которых сообщается об обнаружении эмиссии, свойственной различным молекулярным соединениям.

10. *Физические характеристики.* Анализ совокупности наблюдательных данных для наиболее исследованных ИК звезд и принятая модель системы «звезда—околосредная оболочка» (см. раздел 5) позволяет количественно оценить некоторые физические параметры, такие, как расстояние, отношение светимостей звезды и оболочки, температуры, размеры и массы звезды и оболочки.

В табл. 4 дана сводка физических свойств ИК звезд, для которых разными авторами были сделаны такие оценки [2, 101, 122]. Приведенные в таблице температуры звезд определены по данным спектральных наблюдений, которые для разных звезд относятся к различным фазам блеска (см. таблицу). Поэтому они дают ориентировочное представление о звездной температуре. Так, например, температура NML Tau относится к фазе 0.2 (по кривой в 22 мкм); следовательно, в фазах минимального блеска она будет меньше указанной в таблице.

11. *Заключение.* Совокупность данных фотометрических, спектральных и поляризационных наблюдений в видимом, инфракрасном и радиодиапазонах позволяет дать более развернутое определение ИК звезды по сравнению с рассмотренным в начале обзора. Это определение не противоречит критерию Джонсона и согласуется с принятым нами ограничением фотосферной температуры звезды. Дополнительные признаки можно ввести на основании наблюдательных данных, изложенных выше. Эти признаки не являются обязательными для всех ИК звезд. Однако для большинства, как минимум, два из них наблюдательно проявляются.

Итак, ИК звездой является любая переменная (за редким исключением) звезда, фотосферная температура которой не превышает 2500°K (более 50% излучения в ИК диапазоне $\lambda > 1$ мкм), с наблюдаемыми:

а) более или менее выраженными деталями абсорбционных спектров в ИК диапазоне;

б) избыточным излучением в области $\lambda > 3$ мкм;

в) поляризацией видимого и ИК излучения (не обязательно);

г) радиоэмиссией в линиях OH или других молекул (не обязательно).

В настоящее время накопилось уже достаточно данных для сравнения ИК звезд с ранее известными звездами (гигантами, сверхгигантами поздних спектральных типов). Можно сказать, что ИК звезды наблюдательно выделяются в какую-то особую группу, а, по-видимому, продолжают есте-

Таблица 4

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НК ЗВЕЗД [2, 101, 122]

№ IRC	Звезда	Фаза	Расстояние (лс)	Полная светимость $10^4 L_{\odot}$	Светимость оболочки $L_{об} L_{\odot}$	T зв., К (спектр)	T об., К	R об. ($\times 10^{13}$ см)	M об. ($\times 10^{31}$ г)
-30087	VY CMa	—	400	3.6	0.75	2500	600	1.5	1.5
-20197		0.6	740	1.0	0.30	2250	500	1.0	2
-20540		0.8	1050	1.0	—	—	—	—	—
-10381		0.3	1150	1.0	—	2100	—	—	—
-10434		0.1	1400	1.0	—	—	—	—	—
-10450		0.0	1300	1.0	—	—	—	—	—
-10529		0.6	620	1.0	—	1800	—	—	—
+10011	CIT-3	0.3	510	1.0	0.85	1800	700	0.5	3
+10050	NML Tau (IK Tau)	0.2	270	1.0	0.20	1950	550	1.0	2
+10216	CW Leo	—	—	—	>0.99	2000	650	1.5	10
+10365		0.4	500	1.0	—	2100	—	—	—
-20281	CIT-7 (WX Ser)	0.4	970	1.0	0.30	1950	500	1.0	2
+30219	CIT-6 (RWLMi)	—	500	1.0	—	2000	600	0.4	—
+30292		0.2	1400	1.0	—	—	—	—	—
+40156		0.0	1400	1.0	—	1900	—	—	—
+40448	NML Cyg	—	520	3.1	0.75	2000	600	1.5	1.5
+40483		0.2	1100	1.0	—	1950	—	—	—
+50137		0.6	820	1.0	0.75	1900	650	0.5	2

ственную последовательность низкотемпературных звезд с более выраженными наблюдательными проявлениями, присущими холодным звездам.

Ленинградский государственный
университет

INFRARED STARS. THE REVIEW OF OBSERVATIONAL DATA

G. V. KHOZOV

The basic data of photometric, spectral and polarizational observations of cold stars are considered. The observation performed in optical, infrared and radio-wave ranges during 1965–1975 are included in the review.

ЛИТЕРАТУРА

1. H. L. Johnson, *Sky and Telescope*, 32, 73, 1966.
2. G. Neugebauer, E. Becklin, A. Hyland, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 9, 67, 1971.
3. Я. Я. Икаунискс, Долгопериодические переменные звезды, изд. «Зинатне», Рига, 1971.
4. З. К. Алксне, Я. Я. Икаунискс, Углеродные звезды, изд. «Зинатне», Рига, 1971.
5. G. R. Burbidge, W. A. Stein, *Ap. J.*, 160, 573, 1970.
6. E. E. Mendoza, *Publ. Depart. Astron. Univ. Chile*, No. 7, 106, 1968.
7. H. L. Johnson, *Boll. Obs. Tonanzintla*, 3, No. 25, 1964.
8. H. L. Johnson, *Ap. J.*, 149, 345, 1968.
9. T. A. Lee, *P. A. S. P.*, 82, 765, 1970.
10. C. Hatzler, *Ap. J.*, 86, 509, 1937.
11. Дж. Хейсбауэр, Р. Лейтон, УФН, 98, в. 2, 1969.
12. G. Neugebauer, R. B. Leighton, Two-micron sky survey. Preliminary Catalog, NASA SP-3074, Washington, 1969.
13. G. Neugebauer, D. Martz, R. Leighton, *Ap. J.*, 142, 399, 1965.
14. J. J. Nassau, V. M. Blanco, D. M. Cameron, *Ap. J.*, 124, 522, 1956.
15. F. F. Hall, *Mem. Soc. Roy. Sci. Liege*, 9, 432, 1964.
16. B. E. Westerlund, *M. N.*, 130, No. 1, 1965.
17. B. T. Ulrich, G. Neugebauer, D. Cammon, R. B. Leighton, E. E. Hughes, E. Becklin, *Ap. J.*, 147, 575, 1966.
18. G. Ackermann, W. Hermann, *Mitt. Astron. Ges.*, No. 21, 120, 1966.
19. E. Chavira, *Bol. Obs. Tonanzintla*, 4, No. 29, 1967.
20. W. F. Hoffmann, N. J. Woolf, C. L. Frederick, F. J. Low, *Science*, 157, 187, 1967.
21. P. Maffei, *Ap. J.*, 147, 802, 1967.
22. S. D. Prko, *A. J.*, 73, 431, 1968.
23. G. A. Ackermann, *Mem. Soc. Roy. Sci. Liege*, 19, 307, 1970.
24. W. F. Hoffmann, G. L. Frederick, R. J. Emery, *Ap. J.*, 170, L89, 1971.
25. H. Haffner, *Conf. Role Schmidt Telescopes Astron.*, Hamburg, 107, 1972.
26. K. Voelcker, W. F. Hoffmann, H. Elsasser, *Mem. Soc. Roy. Sci. Liege*, 3, 141, 1972.

27. *H. L. Johnson*, *Comm. LPL.*, 3, No 53, 73, 1965.
28. *H. L. Johnson*, *Ann. Rev. Astr. Astrophys.*, 4, 193, 1956.
29. *T. A. Lee*, *Ap. J.*, 162, 217, 1970.
30. *H. C. Van de Hulst*, *Rech. Astr. Obs. Utrecht*, 11, 1, 1949.
31. *H. L. Johnson*, *F. J. Low*, *D. Steinmetz*, *Comm. LPL.*, 3, No. 55, 95, 1965.
32. *H. L. Johnson*, *E. E. Mendoza*, *W. Z. Wisniewski*, *Comm. LPL.*, 3, No. 56, 97, 1965.
33. *E. E. Mendoza*, *Boll. Obs. Tonanzintla*, 4, No. 27, 1965.
34. *R. F. Wing*, *H. Spinrad*, *L. V. Kuht*, *Ap. J.*, 147, 117, 1967.
35. *E. E. Becklin*, *L. A. Frogel*, *A. R. Hyland*, *J. Kristian*, *G. Neugebauer*, *Ap. J.*, 158, L 133, 1968.
36. *H. M. Dyck*, *G. W. Lockwood*, *R. W. Capps*, *Ap. J.*, 189, 89, 1974.
37. *W. A. Stein*, *J. E. Gaustad*, *F. C. Gillett*, *R. F. Knacke*, *Ap. J.*, 155, L 177, 1969.
38. *D. W. Stracker*, *E. P. Ney*, *A. J.*, 79, 797, 1974.
39. *D. W. Stracker*, *E. P. Ney*, *T. L. Murdock*, *Ap. J.*, 183, L 13, 1973.
40. *D. W. Stracker*, *E. P. Ney*, *A. J.*, 79, 1410, 1974.
41. *G. L. Grasdaen*, *J. E. Gaustad*, *A. J.*, 76, 231, 1971.
42. *H. Spinrad*, *R. F. Wing*, *Ann. rev. Astron. Astrophys.*, 7, 249, 1969.
43. *P. S. Boyce*, *W. M. Sinton*, *Sky and Telescope*, 29, 78, 1964.
44. *D. McCammon*, *G. Munch*, *G. Neugebauer*, *Ap. J.*, 147, 575, 1967.
45. *H. L. Johnson*, *I. Colemann*, *R. I. Mitchell*, *D. L. Steinmetz*, *Comm. LPL.*, 7, 83, 1968.
46. *J. J. Nassou*, *A. A. Velghe*, *Ap. J.*, 139, 190, 1964.
47. *S. S. Vogt*, *A. J.*, 78, 389, 1973.
48. *A. Henry*, *Ap. J.*, 150, 349, 1967.
49. *P. Pesch*, *Ap. J.*, 147, 381, 1967.
50. *H. M. Dyck*, *C. W. Lockwood*, *R. W. Capps*, *Ap. J.*, 189, 89, 1974.
51. *D. McCammon*, *G. Munch*, *G. Neugebauer*, *Ap. J.*, 147, 575, 1967.
52. *H. L. Johnson*, *Ap. J.*, 154, L 125, 1968.
53. *L. A. Young*, *J. Quant. Spectrosc. and Rad. Transf.*, 8, 693, 1968.
54. *T. Tsuji*, *Ann. Tokyo Astron. Obs.*, 9, No. 1, 1964.
55. *N. J. Woolf*, *E. P. Ney*, *Ap. J.*, 155, L 181, 1969.
56. *R. F. Knacke*, *J. E. Gaustad*, *F. C. Gillett*, *W. A. Stein*, *Ap. J.*, 155, L 189, 1969.
57. *F. C. Gillett*, *F. J. Low*, *W. A. Stein*, *Ap. J.*, 154, 677, 1968.
58. *J. A. Hackwell*, *Astron. Astrophys.*, 21, 239, 1972.
59. *F. J. Low*, *K. S. Krishna Swamy*, *Nature*, 227, 1333, 1970.
60. *J. A. Hackwell*, *Observatory*, 91, 37, 1971.
61. *N. J. Woolf*, *Interstellar Dust and Related Topics*, ed. Greenberg and Van de Hulst, 495—504, 1973.
62. *H. L. Johnson*, *Ap. J.*, 141, 923, 1965.
63. *Б. В. Кукаркин*, *П. Н. Холопова*, *Ю. Н. Ефремов*, *Н. П. Кукаркина*, *Н. Е. Кушочкин*, *Г. И. Медведова*, *Н. Б. Перова*, *В. П. Федорович*, *М. С. Фролова*, *Общий каталог переменных звезд*, т. 1 и 2, М., 1969.
64. *G. H. Herbig*, *Ap. J.*, 162, 557, 1970.
65. *N. J. Woolf*, *E. P. Ney*, *Ap. J. Lett.*, 155, 181, 1969.
66. *R. C. Gilman*, *Ap. J. Lett.*, 155, 185, 1969.
67. *W. Hagen*, *Th. Simon*, *H. M. Dyck*, *Ap. J.*, 201, L 81, 1975.
68. *J. F. Harrington*, *Ap. Lett.*, 3, No. 5, 165, 1969.

69. B. Donn, T. P. Stecher, N. C. Wickramasinghe, D. A. Williams, Ap. J., 145, 949, 1966.
70. B. H. Zellner, K. Serkowski, P. A. S. P., 84, 619, 1972.
71. J. Svatos, V. Vany'sek, Astronom. Inst. Charles University, publ. No. 74. XIV, 1973.
72. S. J. Shawl, B. H. Zellner, Ap. J., 162, L 19, 1970.
73. H. M. Dyck, F. F. Forbes, S. J. Shawl, A. J., 76, 901, 1971.
74. K. Serkowski, Ap. J., 144, 857, 1966.
75. В. А. Домбровский, *Астрофизика*, 6, 207, 1970.
76. В. А. Домбровский, сб. «Звезды, туманности, галактики», Ерван, 1969, стр. 179.
77. F. F. Forbes, Ap. J., 147, 1226, 1967.
78. S. J. Shawl, B. N. Zellner, Ap. J., 162, L 19, 1970.
79. Г. В. Холов, *Астрон. цирк.*, № 709, 1972.
80. J. Hashimoto, T. Maikara, H. Okuda, Sh. Sato, *Publs. Astron. Soc. Japan*, 22, 335, 1970.
81. R. I. Toombs, E. E. Becklin, J. A. Frogel, S. K. Low, F. C. Porter, J. A. Westphal, Ap. J., 173, L 71, 1972.
82. В. А. Домбровский, Г. В. Холов, *Астрофизика*, 8, 5, 1972.
83. K. Serkowski, Ap. J., 156, L 139, 1969.
84. Г. В. Холов, Автореферат кандид. диссертации, Л., 1973.
85. А. К. Алексис, Г. В. Холов, *Письма в АЖ*, 1, № 1, 23, 1975.
86. R. W. Carr, H. M. Dyck, Ap. J., 175, 693, 1972.
87. H. M. Dyck, W. J. Forrest, F. C. Gillett, W. A. Stein, R. D. Gehrz, N. J. Woolf, Ap. J., 165, 57, 1971.
88. J. R. P. Angel, P. G. Martin, Ap. J., 180, L 39, 1973.
89. K. Serkowski, Ap. J., 179, L 101, 1973.
90. R. D. Cannon, *Observatory*, 87, 231, 1967.
91. P. Maffei, Ap. J., 147, 902, 1967.
92. A. Witzel, *Sterno*, 44, No. 1—2, 32, 1968.
93. Z. Alksne, A. Alksnis, *Inform. Bull. Var. Stars*, No. 489, 1970.
94. F. C. Gillett, K. M. Merrill, W. A. Stein, Ap. J., 164, 83, 1971.
95. G. W. Lockwood, *Publs. Astron. Soc. Pasif.*, 83, 606, 1971.
96. А. К. Алексис, сб. «Исследование Солнца и красных звезд», № 1, Рига, 44, 1974.
97. P. M. Harvey, K. P. Bechis, W. J. Wilson, J. A. Ball, Ap. J. Suppl. Ser., 27, 331, 1974.
98. Г. В. Холов, Т. Н. Худякова, *Труды АО ЛГУ*, 30, 48, 1974.
99. Г. В. Холов, Т. Н. Худякова, Л. В. Ларионова, *Труды АО ЛГУ*, 31, 123, 1975.
100. Г. В. Холов, Т. Н. Худякова, С. Н. Никитин, *Труды АО ЛГУ*, 32, 61, 1976.
101. A. R. Hyland, E. E. Becklin, J. A. Frogel, G. Neugebauer, *Astron. Astrophys.*, 16, 204, 1972.
102. H. L. Johnson, F. J. Low, D. Stelmets, *Comm. LPL*, 3, No. 55, 1965.
103. A. Kruszcwski, P. A. S. P., 80, No. 476, 1968.
104. A. Kruszcwski, A. J., 76, 576, 1971.
105. F. F. Forbes, *Mem. Soc. Roy. Sci. Liege*, 3, 217, 1972.
106. A. Kruszcwski, *Inform. Bull. Var. Stars*, No. 1973.
107. W. J. Forrest, F. C. Gillett, W. A. Stein, Ap. J., 195, 423, 1975.
108. W. J. Wilson, A. H. Barrett, *Science*, 161, 778, 1969.
109. W. J. Wilson, A. H. Barrett, A. J., 73, 209, 1968.
110. R. S. Booth, *Nature*, 224, 783, 1969.

111. *M. Paschenko, V. Slysh, I. Struzkov, R. Fillu, M. Ghendin, N. Q. Rten*, *Astron. and Astrophys.*, 11, 482, 1971.
112. *Quang-Rien Nguyen, R. Fillu, M. Ghendin*, *Astron. and Astrophys.*, 14, 154, 1971.
113. *B. J. Robinson, J. L. Caswell, W. M. Gross*, *Ap. J. Letter.* 7, 79, 1970.
114. *W. J. Wilson, A. H. Barret*, *Astron. and Astrophys.*, 17, 385, 1972.
115. *R. D. Davies, M. R. W. Mashed, K. S. Booth*, *Nature*, 237, No. 71, 21, 1972.
116. *M. R. W. Mashed, R. S. Booth, R. P. Davies*, *MN RAS* 166, 561, 1971.
117. *P. R. Schwartz, A. H. Barrett*, *Ap. J.*, 159, L 123, 1970.
118. *R. W. Wilson, P. M. Solomon, A. A. Penzias, K. B. Jefferts*, *Ap. J.*, 169, L 35, 1971.
119. *M. Morris, B. Zurkerman, P. Palmer, B. E. Turner*, *Ap. J.*, 170, L 109, 1971.
120. *L. E. Snyder, D. Buhe*, *Ap. J.*, 197, 329, 1975.
121. *J. A. Frogel, D. F. Dickinson, A. R. Hyland*, *Ap. J.*, 201, 329, 1975.
122. *F. J. Lov, H. L. Johnson, D. E. Kleinman, A. S. Latham*, *Ap. J.*, 160, 531, 1970.