АСТРОФИЗИКА

ТОМ 26 ИЮНЬ, 1987 ВЫПУСК 3

УДК: 524.3—333

О НАКЛОНЕ ФУНКЦИИ МАСС МАЛОМАССИВНЫХ ЗВЕЗД

О. Ю. МАЛКОВ

Поступила 23 мая 1986
Принята к печати 2 марта 1987

Показано, что современный метод получения начальной функции масс содержит ряд неопределенностей, учет которых может существенно изменять ее наклон на маломассивном участке ($m < m_\odot$). Рассмотрено влияние изменения соотношения масса — светимость, шкалы болометрических поправок и функции светимости на форму функции масс. Обсуждается также эффект фотометрически неразрешенных двойных систем. Сделан ряд количественных оценок и показано, что наклон начальной функции масс на маломассивном участке может изменяться в широких пределах.

1. *Введение.* Существует целый ряд задач астрофизики, для решения которых необходимо знание начальной функции масс (НФМ) звезд. НФМ является важнейшим инструментом при изучении процессов звездообразования или исследования эволюции Галактики, а также представляет существенный интерес при расчетах фотометрических свойств моделей звездных скоплений и галактик.

НФМ представляет собой количество звезд, образующихся в единицу времени в единичном логарифмическом интервале масс. Определив каким-либо образом массы всех звезд из некоторого ансамбля, мы получим т. н. «современную» функцию масс (СФМ), которая, вообще говоря, отлична от НФМ. Причиной этого являются возможные непостоянство скорости звездообразования и зависимость НФМ от времени, а также быстротечность эволюционных процессов в массивных звездах по отношению ко времени жизни диска Галактики (T). С этой точки зрения определенный интерес представляет СФМ для маломассивных звезд ($m < m_\odot$). Время жизни таких звезд превышает T; таким образом, мы можем сейчас наблюдать все маломассивные звезды, когда-либо образовавшиеся. Предположив, что в каждый единичный интервал времени звезды образовывались с одной и той же НФМ, получим, что СФМ маломассивных звезд представляет собой НФМ с точностью до константы. Отметим, что это верно при произвольной скорости звездообразования. Маломассивный участок НФМ

интересен еще и тем, что, исследуя эти звезды (очевидно, ближайшие соседи Солнца), мы получаем возможность изучать проблему скрытой массы в солнечной окрестности. К и М-карлики главной последовательности являются самыми обычными звездами и дают значительный вклад в общую массу окрестности Солнца, а популяционная структура и эволюционный статус этих звезд изучены, тем не менее, довольно плохо.

Однако, несмотря на очевидную актуальность исследования распределения маломассивных звезд по массам, вопрос о форме НФМ на этом участке остается открытым. Практически невозможно определять массы звезд, если они не являются компонентами некоторых типов двойных систем. Так, можно определить массы членов широкой двойной системы с известными орбитами и параллаксами, а также звезд, входящих в спектрально-двойную систему, которая наблюдается и как затменно-переменная. Относительная малочисленность таких систем с компонентами малых масс не позволяет говорить о полноте выборки маломассивных звезд для построения СФМ. Поэтому строят распределение звезд по другому параметру (чаще всего по светимости), который проще получить из наблюдений для достаточно большого числа звезд, а затем используют переходное соотношение (в данном случае соотношение масса—светимость).

В 1955 г. Солпитер [1] с помощью описанного выше метода показал, что распределение звезд по массам представляет собой степенную функцию на диапазоне $0.4 \div 10\ m_\odot$. Если определить наклон НФМ как

$$\Gamma = \frac{d \lg f(\lg m)}{d \lg m}, \tag{1}$$

то Солпитер нашел его постоянным и равным (в данных обозначениях) — 1.35. Большинство исследователей, работавших в этой области, отмечали, что наблюдается дефицит как сверх-, так и маломассивных звезд по сравнению с тем количеством, которое предсказывалось простой экстраполяцией функции Солпитера за пределы указанного выше диапазона. В 1979 г. Миллер и Скало [2] предложили более сложную зависимость для НФМ, которая достаточно близка к солпитеровской на умеренном диапазоне масс $1 \div 10\ m_\odot$ и ниже ее на обоих концах этого диапазона (см. рис. 1). Недавно, однако, Д'Антона и Маззителли [3], исследуя модели маломассивных карликов, пришли к выводу, что звезды малых масс распределены согласно функции Солпитера подобно звездам умеренных масс.

Приведенные здесь две точки зрения иллюстрируют современное состояние данного вопроса. Миллер и Скало получали НФМ с помощью ряда хорошо известных соотношений. Вариации некоторых из них могут, вероятно, существенно изменить вид результирующей НФМ (для соотношения масса-светимость это показали Д'Антона и Маззителли). Можно утверждать, что в процессе получения НФМ из функции светимости мы

сталкиваемся с целым рядом эффектов, которые вносят неопределенность в результат; некоторые из этих эффектов особенно ощутимо сказываются на маломассивном участке. Ниже они обсуждаются подробнее, а также делаются попытки оценить степень их влияния на НФМ.

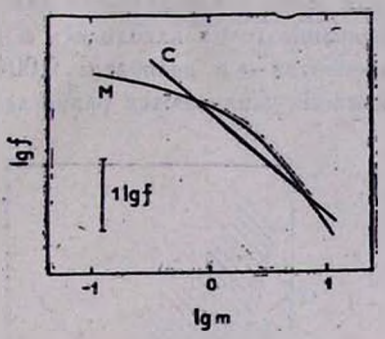

Рис. 1. Начальные функции масс звезд главной последовательности Солпитера (С) и Миллера и Скало (М). НФМ нормированы на $m_\odot$. По оси ординат отложен логарифм количества звезд в единичном логарифмическом интервале масс на пк^3.

2. *Соотношение масса-светимость.* Важную роль в процессе получения НФМ играет соотношение масса-светимость (СМС). Если выражать светимость в звездных величинах, например в визуальных, то можно записать для СФМ:

$$f(\lg m) = \varphi(M_V) \left| \frac{dM_V}{d\lg m} \right| 2H(M_V)\, g(M_V), \qquad (2)$$

где $\varphi(M_V)$ — функция светимости, H — полутолщина однородного слоя диска, g — доля звезд главной последовательности. СМС входит в формулу (2) в виде производной, а, как известно, процесс дифференцирования приводит только к увеличению тех неизбежных ошибок, с которыми задается функция. В первом приближении зависимость M_V от $\lg m$ можно считать линейной, однако в данной задаче такого приближения недостаточно. Кроме того, для самых слабых звезд ($m \lesssim 0.5\ m_\odot$) это соотношение становится нелинейным.

Один из способов получения СМС — эмпирический — основан на наблюдении двойных систем. Недостаточный объем наблюдательных данных и ошибки приводят к сглаживанию полученной этим способом СМС на маломассивном участке. Поэтому теоретический способ, основанный на расчетах эволюции звезд различных масс и начальных химических составов, предпочтительней для данного исследования.

В работе изучалось влияние различия СМС, полученных рядом авторов, на НФМ. Функция светимости, используемая для расчетов, бралась

из [4], болометрические поправки — из [5]. К сожалению, среди использованных работ отсутствует широкий однородный диапазон масс, а попытки разумным образом «сшить» результаты, полученные различными авторами, оказались неудачными. Для дальнейшего изучения были отобраны СМС, рассчитанные для звезд с характерным для населения диска химическим составом: содержание гелия находилось в диапазоне 0.2—0.3, содержание тяжелых элементов — в диапазоне 0.004—0.04. Как видно из рис. 2, с уменьшением массы усиливаются разногласия между СМС, полу-

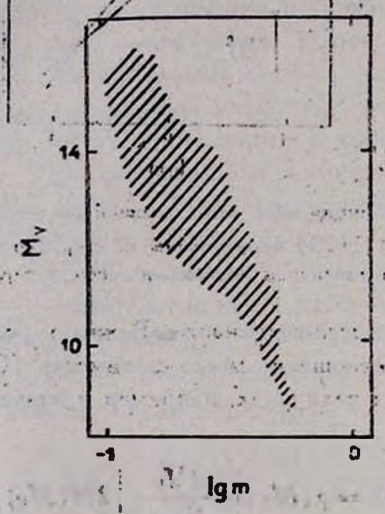

Рис. 2. Соотношение масса — светимость для маломассивных звезд. Область, в которой лежат теоретические СМС, заштрихована.

ченными разными авторами. Характерная ошибка в определении массы по известной светимости составляет 0.3—0.4 в единицах $\lg m$ для $M_V > 10^m$. Тем более трудно сделать выводы о поведении производной в этом диапазоне.

Некоторые результирующие НФМ приводятся на рис. 3. Особый интерес представляет область самых слабых звезд. НФМ, построенные с СМС Д'Антона и Маззителли [6] и Хокси [7], показывают на участке от 0.2 $m_\odot$ до 0.07 $m_\odot$ (Д'Антона и Маззителли) и до 0.15 $m_\odot$ (Хокси) постоянный наклон, величина которого близка к солпитеровскому значению $\Gamma = -1.35$. Что же касается звезд с массами больше 0.2 $m_\odot$, то можно видеть, что использование СМС Ванденберга [8] приводит к бимодальной НФМ с широким плато между максимумами и спадом после $\lg m \lesssim -0.8$. НФМ, построенная с использованием СМС Копеланда и др. [9], монотонно растет по крайней мере до $\lg m \approx -0.5$, причем с наклоном,

примерно равным солпитеровскому. Можно оценить значения наклонов, изображенных НФМ при одинаковых значениях аргумента. Так, наклон варьируется от — 1.7 до + 2.7 при $\lg m = -0.9$ и от — 0.7 до + 0.8 при $\lg m = -0.4$.

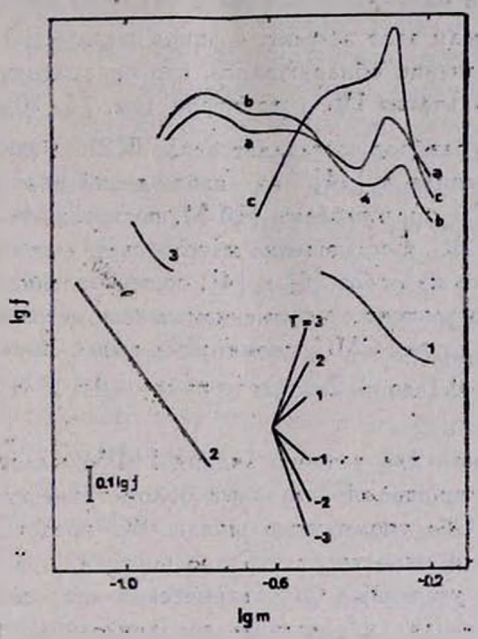

Рис. 3. Начальные функции масс, полученные с применением СМС разных авторов. 1 — Копеланд и др. [9]; 2 — Д'Антона и Маззителли [6]; 3 — Хокси [7]; 4 — Ванденберг и др. [8]: a — $Y = 0.25$, $Z = 0.02$, b — $Y = 0.25$, $Z = 0.01$, c — $Y = 0.25$, $Z = 0.02$, шкала ВС взята из [14]. Указан масштаб НФМ, а также отложены значения наклона.

Необходимо отметить, что ряд авторов получали СМС для звезд различных химсоставов. Исследование влияния содержания гелия и тяжелых элементов на результирующую функцию масс показало, что вариации химсостава довольно незначительно изменяют НФМ, пока он остается в пределах, характерных для населения диска. Типичный пример приведен на рис. 3. Характерный диапазон изменения наклона НФМ, построенных с использованием СМС для звезд различного химсостава, составляет ~ 0.3 и слабо зависит от массы. Однако об этом эффекте необходимо помнить, когда имеем дело с реальными звездами с химсоставом, зависящим от возраста и места образования этих звезд в Галактике; здесь он увеличивает разброс значений НФМ.

Таким образом, точное знание СМС является необходимым условием получения и изучения функции масс маломассивных звезд.

3. *Болометрические поправки.* Соотношения масса—светимость вычисляются обычно в координатах $M_{bol} - \lg m$, а функция светимости имеет аргументом M_B или M_V. Необходимая для перехода шкала ВС — еще один источник неопределенностей на пути получения НФМ, т. к. болометрические поправки для маломассивных звезд известны недостаточно точно.

Мы исследовали этот эффект, сравнив шкалы ВС, полученные рядом авторов. При сравнении обнаружилось, что болометрические поправки, полученные из результатов ИК-фотометрии (см. [5, 10—13]), весьма сходны между собой (разброс составляет около $0^m.2$). Резко отличается от них шкала ВС, полученная в [14] из наблюдений визуальных и затменных двойных. На рис. 3 представлены НФМ, построенные с сильно различающимися шкалами ВС. Соотношение масса—светимость и функция светимости использовались из работ [8] и [4], соответственно. Можно видеть, что вид НФМ сильно зависит от применяемых болометрических поправок. Это характерно и для других СМС, упомянутых выше. Значения наклона НФМ изменяются от -0.1 до $+2.2$ при $\lg m = -0.6$ и от -0.7 до $+0.4$ для $\lg m = -0.4$.

Таким образом, для точного знания НФМ маломассивных звезд необходимо иметь хорошо определенные болометрические поправки на этом диапазоне масс. Обе упомянутые шкалы ВС представляются достаточно надежными. Невозможность отдать предпочтение той или иной из них, а также отсутствие уверенных болометрических поправок для наименее массивных звезд приводят к созданию дополнительных барьеров на пути к построению НФМ и увеличивают степень неопределенности.

4. *Функция светимости и неразрешенные двойные.* Функция светимости (ФС) дает распределение звезд по абсолютным величинам или долю общего числа звезд, приходящуюся на единичный интервал M. Широко распространены два способа получения ФС: Один из них основан на прямых подсчетах звезд со светимостью от M до $M + dM$ в определенном объеме пространства. Другим методом определения ФС является использование статистической связи между параллаксом, видимой величиной и собственным движением звезды, которая позволяет определить абсолютную величину. Безусловно, изменения в ФС отразятся и на НФМ. Одним из эффектов, способным изменить вид наблюдаемой ФС, является эффект фотометрически неразрешенных двойных систем.

На сегодняшний день известно множество работ, в которых исследуется вопрос о доле кратных систем среди звездного населения Галактики. В частности, Герцег [15] дает обзор существующих исследований по этому вопросу. Можно утверждать, что около 50% всех звезд главной последовательности входит в состав кратных систем. Для звезд ближайшей сол-

нечной окрестности ($r \lesssim 5$ пк) эта величина достигает 59%. Однако обнаружению кратных систем среди маломассивных звезд препятствуют инструментальные трудности. Такие звезды обладают довольно низкими орбитальными скоростями; кроме того, они достаточно слабы (наиболее яркие из них достигают лишь $m_V \sim 10^m$). Это означает, что среди звезд окрестности Солнца могут находиться неразрешенные двойные системы. Трудно оценить долю таких двойных среди кажущихся одиночными звезд, но Абт [16], например, полагает, что учет таких систем повысит число звезд главной последовательности, входящих в состав кратных систем по крайней мере до 75%. Кроме того, Попова и др. [17] нашли, что число неразрешенных двойных зависит от целого ряда параметров и может достигать 80%.

Естественно предположить, что этот эффект должен отражаться на ФС. Скало в своем обзоре [4] упоминает его, но детально не рассматривает, считая, очевидно, что это влияние несущественно. Здесь этот эффект будет рассмотрен, причем мы ограничимся только двойными звездами, полагая, что системы с более высокой кратностью относительно редки (тройных систем, по различным оценкам, в 3—6 раз меньше, чем двойных), кроме того, они обладают большей вероятностью обнаружения.

При учете двойных систем количество звезд, имеющих светимость от L_V до $L_V + dL_V$, изменится по трем причинам. Во-первых, оно уменьшится за счет того, что часть этих звезд является на самом деле двойными системами, и вклад каждого компонента в ФС должен быть учтен отдельно. Во-вторых, сюда добавятся звезды светимости L_V, являющиеся первичными компонентами неразрешенных систем, интегральные светимости которых лежат в диапазоне $L_V \div 2L_V$. В-третьих, добавятся вторичные компоненты систем, интегральные светимости которых больше $2L_V$. Отметим, что звездная величина, соответствующая светимости $2L_V$, равна

$$M_V(2L_V) = M_V(L_V) - A,$$

где $A = 2.5 \lg 2$. Учитывая, что

$$m(L_1 + L_2) \neq m(L_1) + m(L_2),$$

можно записать

$$\tilde{\varphi}(M_V) = \int\limits_{M_V - A}^{M_V} \varphi(M'_V)\,\eta(S)\,\frac{\partial S}{\partial M_V}\,dM'_V +$$

$$+ \int\limits_{M_{V_{\min}}}^{M_V - A} \varphi(M'_V)\,\eta(R)\left(-\frac{\partial R}{\partial M_V}\right) dM'_V, \qquad (3)$$

где

$$S = \frac{m(M_V^0)}{m(M_V)}, \quad R = \frac{m(M_V)}{m(M_V^0)},$$

$$M_V^0 = -2.5 \lg\left(\operatorname{dex}\left(-\frac{M_V}{2.5}\right) - \operatorname{dex}\left(-\frac{M_V}{2.5}\right)\right),$$

M_V — звездная величина системы; M_V^0 — звездная величина второго компонента, $\bar{\varphi}(M_V)$ — исправленная ФС, $\varphi(M_V)$ — исходная ФС, η — распределение систем по отношению масс компонентов. Строго говоря, функция η имеет два аргумента; второй — суммарная масса системы. Очевидно, что вероятность обнаружить двойную звезду падает с уменьшением интегрального блеска системы. В данной работе, однако, предполагалось, что

$$\frac{\partial \eta}{\partial (m(M_V) + m(M_V^0))} = 0,$$

т. е. η зависит только от отношения масс компонентов. Кроме того, ФС аппроксимировалась кусочно-линейной функцией. Для качественной оценки эффекта, которая являлась целью данного раздела, описанного приближения вполне достаточно.

Уравнение (3) должно быть преобразовано, если M_V не удовлетворяет соотношению

$$M_V - M_{V_{\min}} \geqslant A. \tag{4}$$

Для маломассивных звезд условие (4) удовлетворяется.

Распределение двойных систем по отношению масс компонентов изучено еще довольно слабо, поэтому мы имели возможность варьировать функцию η в довольно широком диапазоне. Некоторые результаты представлены на рис. 4. Здесь изображены исходная (кривая 1) и несколько результирующих ФС. Кривая 2 построена в предположении, что 100% всех звезд являются неразрешенными двойными с равными по массе компонентами. Кривая 3 — все системы имеют отношение масс компонентов, равное 0.1. Кроме того, была получена ФС в предположении, что распределение двойных систем по отношению масс компонентов равновероятно ($\eta \equiv \mathrm{const}$). Также исследовалось влияние функции η, найденной Поповым [18]. Последние два случая иллюстрируются кривыми 4 и 5, соответственно.

Итак, видно, что эффект неразделенных двойных может существенно изменить ФС. Изменяется, соответственно, и НФМ (для примера см. рис. 5). Здесь не приводятся все рассмотренные варианты изменения НФМ,

т. к. входные параметры довольно схематичны, и не учитывается ряд других эффектов, часть из которых рассматривалась выше. Однако качественно этот эффект можно оценить. Прежде всего, если существуют неразрешенные двойные системы с отношением масс компонентов, близким к

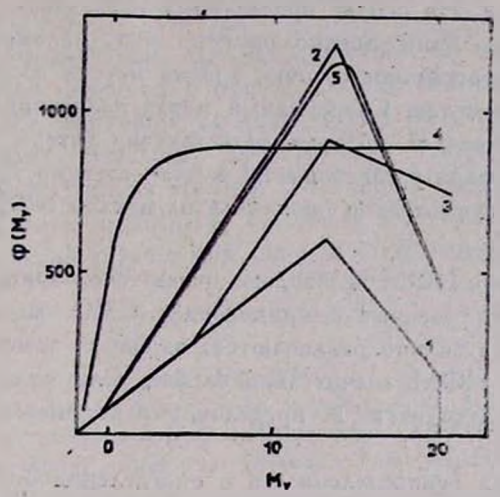

Рис. 4. К эффекту неразрешенных двойных (пояснения см. в тексте).

единице, то наклон Г увеличивается по абсолютной величине. Масса m_0, до которой будет продолжаться рост НФМ, и крутизна на участке $m > m_0$ зависят от ряда параметров и, в первую очередь, от вида функции η. Здесь необходимо также учитывать и зависимость η от суммарной светимости

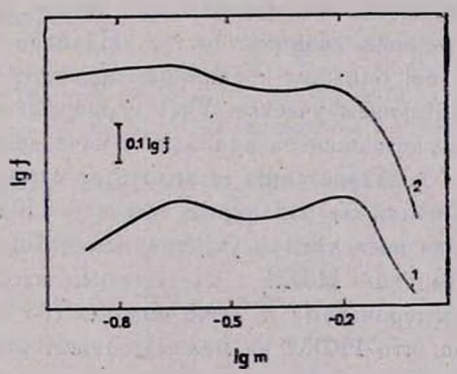

Рис. 5. Влияние неразрешенных двойных на НФМ. 1 — НФМ для исходной ФС, 2 — НФМ для ФС, соответствующей случаю 3 на рис. 4.

системы. Поведение НФМ для $m \lesssim m_0$ прогнозируется менее уверенно, однако можно утверждать, что она не убывает вплоть до самых малых масс, если выполняется условие

$$\eta(q) \not\equiv 0 \text{ при } q \lesssim q_0,$$

где q_0 оценивается нами в ~ 0.1. Как известно, вид функции η на этом участке изучен наиболее слабо.

5. *Заключение.* На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Ранее предполагалось, что маломассивный участок НФМ является простейшим с точки зрения метода построения. По-видимому, это не совсем так. Современный метод получения НФМ отягощен рядом неопределенностей, которые недостаточно учтены для звезд малых масс. Изменение формы соотношения масса—светимость и функции светимости может существенно повлиять на наклон НФМ маломассивных звезд ($m \lesssim m_\odot$).

Для построения НФМ необходимо очень точно знать поведение СМС. Функции масс, построенные с применением СМС, полученных разными авторами, довольно сильно различаются; вариации химсостава влияют на результирующую НФМ значительно слабее, если содержание водорода, гелия и металлов находится в пределах, характерных для звезд плоской составляющей.

Существующая неопределенность в определении болометрических поправок слабых звезд также вносит свои трудности в проблему исследования НФМ. В большинстве рассмотренных работ даются весьма сходные между собой шкалы ВС, от которых сильно отличается шкала ВС Хабетса и Хайнтца, полученная из наблюдений двойных систем. Применение этой шкалы приводит к более крутому росту и более быстрому спаду НФМ на маломассивном участке.

Наблюдаемую функцию светимости может сильно изменить учет фотометрически неразрешенных двойных систем. Наличие таковых с отношением масс компонентов, близким к единице, приводит к увеличению крутизны ФС на возрастающем участке. Учет неразрешенных двойных с малым отношением масс компонентов приводит к исчезновению максимума на результирующей ФС и возрастанию ее вплоть до самых малых масс.

Наклон исправленной за различные эффекты НФМ, таким образом, сильно варьируется на исследуемом участке, изменяясь от положительного (что соответствует падению НФМ с уменьшением массы) до приблизительно равного солпитеровскому и даже больше (по абсолютному значению). Не исключено, что НФМ на маломассивном участке имеет тот же наклон, что и для умеренных масс.

Автор приносит благодарность А. Э. Пискунову за постоянную помощь в работе и ценные замечания.

Астрономический совет
АН СССР

ON THE SLOPE OF THE MASS FUNCTION FOR THE STARS OF SMALL MASSES

O. YU. MALKOV

It has been shown that the usual method of construction of the initial mass function involves a number of uncertainties, which can essentially change the IMF slope at small masses ($m < m_{\odot}$). The influence of the mass-luminosity relation, BC-scale and luminosity function variations on the IMF form is studied. The effect of unresolved binaries is also discussed. Some quantative estimates are made and it is shown that the slope at small masses can vary in wide range.

ЛИТЕРАТУРА

1. *E. E. Salpeter*, Astrophys. J., 121, 161, 1955.
2. *G. E. Miller, J. M. Scalo*, Astrophys. J. Suppl. Ser., 41, 513, 1979.
3. *F. D'Antona, I. Mazzitelli*, Astron. and Astrophys., 127, 149, 1983.
4. *J. M. Scalo*, The stellar initial mass function.—Fundamentals of Cosmic Physics, 1986, vol. 11, p. 1—278.
5. *П. Траат*, Публ. Тартуск. обсерв., 44, 282, 1976.
6. *F. D'Antona, I. Mazzitelli*, Astron. and Astrophys., 113, 303, 1982.
7. *D. T. Hoxie*, Astrophys. J., 161, 1083, 1970.
8. *D. A. Vandenberg, F. D. A. Hartwick, P. Dawson, D. R. Alexander*, Astrophys. J., 266, 747, 1983.
9. *H. Copeland, J. O. Jensen, H. E. Jorgensen*, Astron. and Astrophys., 5, 12, 1970.
10. *H. L. Johnson*, Astrophys. J., 141, 170, 1965.
11. *H. L. Johnson*, Ann. Rev. Astron. and Astrophys., 4, 193, 1966.
12. *J. L. Greenstein, G. Neugebauer, E. E. Becklin*, Astrophys. J., 161, 519, 1970.
13. *B. W. Carney, M. Aaronson*, Astron. J., 84, 867, 1979.
14. *C. M. H. J. Habets, J. R. W. Heintze*, Astron. and Astrophys. Suppl. Ser., 46, 193, 1981.
15. *T. Herczeg*, Astrophys. and Space Sci., 99, 29, 1984.
16. *Х. А. Абт*, в кн. «Протозвезды и планеты», ч. 1, Мир, М., 1982, стр. 361.
17. *E. I. Popova, A. V. Tutukov, L. R. Yungelson*, Astrophys. and Space Sci., 88, 55, 1982.
18. *М. В. Попов*, Перемен. звезды, 17, 412, 1970.