

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 12

АВГУСТ, 1976

ВЫПУСК 3

К ВОПРОСУ О ПРОИСХОЖДЕНИИ И ЭВОЛЮЦИОННОЙ СТАДИИ СИМБИОТИЧЕСКИХ ЗВЕЗД

А. В. ТУТУКОВ, Л. Р. ЮНГЕЛЬСОН

Поступила 12 августа 1975

Анализ особенностей симбиотических звезд показывает, что их горячие компоненты должны быть или углеродно-кислородными карликами с тонкими водородно-гелиевыми оболочками или гелиевыми звездами с тонкими оболочками, а холодные компоненты — красными гигантами, теряющими вещество со скоростью $\sim 10^{-5} - 10^{-6} M_{\odot}/\text{год}$ на протяжении $10^5 - 10^6$ лет. Подобные системы могут образоваться из широких пар в результате потери оболочки первоначально более массивной звездой системы путем непрерывного истечения или сброса вследствие динамической неустойчивости на стадии красного гиганта, а из более тесных пар — в результате обмена веществом между компонентами. Показано, что горячие компоненты симбиотических звезд могут аккрецировать $10^{-6} - 10^{-9} M_{\odot}/\text{год}$ и рассмотрены некоторые следствия аккреции на C—O карлик.

Симбиотические звезды представляют собой сравнительно немногочисленную группу неправильных переменных звезд, в спектрах которых наблюдаются полосы поглощения TiO и эмиссионные линии высокого возбуждения. Для симбиотических звезд характерны большие вспышки ($\Delta m \leq 5^m$), интервал между которыми составляет несколько десятков лет, и вспышки меньшего масштаба ($\Delta m \approx 1^m$), происходящие с интервалом в несколько лет. Полная сводка особенностей симбиотических звезд и их пространственно-кинематические характеристики приведены в обзоре Боярчука [1]. Боярчуком [1] рассмотрены различные модели симбиотических звезд и показано, что их наблюдаемые проявления наиболее удовлетворительно описывает модель двойной звезды, состоящей из нормального холодного гиганта (G5 III—M7 III), блеск которого обычно не испытывает заметных изменений (но иногда это мирида), и горячего карлика с $T_{\text{eff}} \sim 10^3 \text{ K}$, $M_r \approx 0^m - 2^m$, изменения блеска которого и обуславливают наблюдаемую переменность симбиотических звезд. Орбитальные периоды симбиотических звезд порядка нескольких лет. Отношение массы красного

гиганта к массе горячей звезды ~ 4 . Обе компоненты окружены туманностью $n_e \sim 10^4 - 10^5 \text{ см}^{-3}$, $T_e \sim 17000 \text{ К}$, $R \sim 10^{15} - 10^{16} \text{ см}$. Пространственно-кинематические характеристики симбиотических звезд близки к характеристикам ядер планетарных туманностей. Оценка полного числа симбиотических звезд в Галактике $\sim 10^3 - 10^4$.

Приняв за основу модель, состоящую из красного гиганта и горячей карлика, окруженных туманностью, попытаемся выяснить, на какой эволюционной стадии находятся симбиотические звезды. Предварительно рассмотрим детальнее некоторые их характеристики.

Абсолютные визуальные величины горячих компонент, согласно Боярчуку [1], $+2^m \leq M_v \leq 0^m$. Учитывая большую (до -5^m) болометрическую поправку, характерную для звезд с аффективными температурами $\sim 10^4 \text{ К}$, можно найти, что светимости горячих компонент симбиотических звезд $10^3 \leq L_H/L_\odot \leq 10^4$. Согласно Боярчуку [1], все холодные компоненты симбиотических звезд являются гигантами спектральных классов от G5 до M7. Массы таких гигантов $3 - 8 M_\odot$ [2]. Следовательно, если отношение масс компонент близко к 4, то массы горячих компонент $\sim 1 - 2 M_\odot$. Таким образом, светимости, аффективные температуры и массы горячих компонент соответствуют либо гелиевым звездам на стадии горения гелия в ядре, либо звездам с вырожденным углеродно-кислородным ядром, тонкими слоевыми источниками горения гелия, водорода и водородной оболочкой.

Если радиус туманности $\approx 10^{16} \text{ см}$ и масса симбиотической звезды $\sim 5 M_\odot$, то скорость убегания на границе туманности $\sim 3 \text{ км/сек}$. Скорость звука в туманности при $T_e \approx 17000 \text{ К}$ $v_s \approx 10 \text{ км/сек}$. Запрещенные линии, образующиеся в туманности, часто показывают, что существуют еще более быстрые движения, скорость которых $\sim 100 \text{ км/сек}$. Размеры туманности более чем на порядок превосходят размеры двойной системы. Следовательно, туманность нестационарна и теряет вещество в пространство. Время рассеяния туманности $\tau \sim R/v_s \approx 3 \cdot 10^4 \text{ лет}$. Масса туманности $\sim 10^{-1} M_\odot$ [1]. Для поддержания туманности необходимо, чтобы в нее непрерывно поступало вещество со скоростью $\sim 10^{-5} - 10^{-6} M_\odot/\text{год}$. Такая скорость потери вещества характерна для красных гигантов на поздних стадиях эволюции [3, 4]. Истечение происходит при этом из атмосферы со скоростью в несколько десятков км/сек. Линии однократно ионизованных металлов в спектрах симбиотических звезд, образующиеся в атмосферах их холодных компонент, имеют ширину $\sim 20 \text{ км/сек}$ [1], как и у одиночных звезд. Если красный гигант заполняет свою полость поверхности Роша, то следует ожидать, что между компонентами происходит обмен веществом со скоростью $\sim 10^{-6} M_\odot/\text{год}$ [5, 6]. По оценкам ряда авторов, в результате вспышек горячих компонент сим-

биотических звезд они теряют $\sim 10^{-1} M_{\odot}/\text{год}$ при скоростях истечения порядка нескольких сот км/сек [7, 8]. Поскольку вспышки редки, этого вещества недостаточно для поддержания туманности.

Туманность, окружающая симбиотическую звезду, ионизируется излучением горячей компоненты. Для поддержания ее в ионизованном состоянии необходимо, чтобы число ионизирующих квантов, излучаемых горячей звездой в единицу времени N_r , превышало число атомов водорода N_H , поступающих в туманность. Число ионизирующих квантов ($\lambda \leq 912 \text{ \AA}$):

$$N_r \approx 10^{46} \frac{L_H}{T_H},$$

где L_H — светимость горячей компоненты в L_{\odot} , T_H — ее эффективная температура. Число атомов водорода:

$$N_H \approx 10^{46} M,$$

где M — скорость поступления вещества в туманность в $M_{\odot}/\text{год}$. Условие стационарности выполняется при

$$L_H \geq 10 T_H M. \quad (1)$$

Поскольку $M \sim 10^{-6} M_{\odot}/\text{год}$, $T_H \sim 10^4 \text{ K}$, $L_H \sim 10^2 - 10^4 L_{\odot}$, условие можно считать выполненным.

Согласно Спитцеру [9], время рекомбинации

$$\tau_r \approx \frac{4 \cdot 10^4}{n_e} \left(\frac{T_e}{10^4} \right)^{1.3} \text{ лет.}$$

При указанных выше параметрах туманностей время τ_r много меньше времени их рассеивания, следовательно, наблюдаемые размеры туманностей определяются размерами зон Стремгrena, создаваемых горячими компонентами. Радиус зоны Стремгrena вокруг горячей звезды определяется условием равенства числа ионизаций и рекомбинаций в ее объеме и равен:

$$R_S = 10^{20} \left(\frac{L_H}{L_{\odot}} \right)^{1/3} T_H^{-1/3} n_e^{-2/3}. \quad (2)$$

Наблюдаемые радиусы туманностей $\sim 10^{13} - 10^{14} \text{ см}$ могут быть обеспечены при $T_H \approx 10^4 \text{ K}$, $n_e \approx 10^4 \text{ см}^{-3}$, $L_H/L_{\odot} \approx 10^2 - 10^4$.

Химический состав туманностей восьми симбиотических звезд, исследованных Боярчуком [1], не отличается от химического состава солнечной атмосферы.

Таким образом, анализ модели симбиотических звезд указывает на то, что их горячие компоненты должны были в ходе эволюции потерять большую часть водородной оболочки, а их холодные компоненты должны

в настоящее время терять вещество со скоростью 10^{-4} — $10^{-6} M_{\odot}$ год. Абсолютные размеры систем таковы, что в некоторых из них красный гигант может заполнять свою полость поверхности Роша (см. рис. 1). Однако некоторые системы настолько широки (например, R Aqr с периодом $\sim 10^3$ дней), что подобная возможность для них полностью исключена.

Рассмотрим возможности образования симбиотических звезд в ходе эволюции двойных систем.

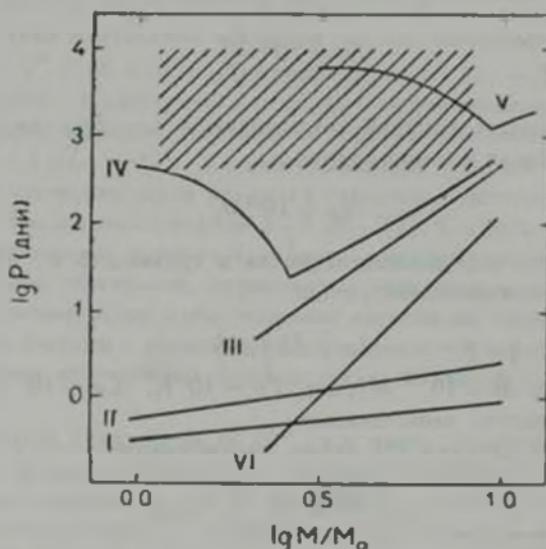


Рис. 1. Значения периодов, разграничивающие различные случаи обмена веществом в тесных двойных системах. Смысл отдельных кривых пояснен в тексте статьи.

На рис. 1 показаны в зависимости от исходной массы первичной компоненты периоды, разграничивающие различные случаи обмена веществом в двойных системах. При построении графика были использованы данные Пачинского [10] и авторов [11]. Если исходный период системы имеет значение, ограниченное кривыми I и II, то обмен веществом начнется на стадии горения водорода в ядре первичной компоненты; если значение периода ограничено кривыми II и III, то обмен начнется на стадии горения водорода в слоевом источнике первичной, до того, как первичная компонента достигнет границы Хаяши на диаграмме Герцшпрунга—Рессела; если значение периода ограничено кривыми III и IV, то первичная компонента заполнит полость Роша, находясь у границы Хаяши, но еще до загорания He в ядре; если период ограничен кривыми IV—V, то заполнение полости Роша произойдет на стадии роста углеродно-кислородного ядра. На рис. 1 заштрихована область, в которую попадают симбиотические звезды. Кри-

вая V на рис. 1 может быть смещена вниз, так как ее положение найдено в предположении о сохранении массы звезды на стадии роста углеродно-кислородного ядра, в то время как наблюдения красных сверхгигантов обнаруживают значительную потерю ими вещества [3, 4], которая, вероятно, приводит к потере звездой оболочки прежде, чем в ядре начинается взрывной процесс горения углерода и радиус звезды достигает максимального значения. Звезда, потеряв свою оболочку, частично за счет непрерывного истечения со скоростью $10^{-3} - 10^{-4} M_{\odot}/\text{год}$, а частично путем быстрого сброса вещества вследствие динамической неустойчивости, превратится, в конечном итоге, в ядро планетарной туманности. Горячее ($T_{\text{eff}} \sim 10^4 \text{ K}$) углеродно-кислородное ядро, окруженное разреженным остатком водородно-гелиевой оболочки, в которой жесткое излучение ядра перерабатывается в кванты видимого света, — объект, который относительно легко обнаружить, что и облегчает наблюдения звезд на этой стадии. Возможно, что система R Aqr, окруженная туманностью радиусом $\sim 5 \cdot 10^{13}$ см, находится на подобной стадии эволюции.

Положение симбиотических звезд на рис. 1 указывает на то, что их первичные компоненты могут потерять оболочку прежде, чем они заполнят полость Роша. Учитывая это, можно полагать, что горячие компоненты — это остатки первоначально более массивных компонент, которые уже прошли стадию красного гиганта, потеряли практически всю водородную оболочку и в настоящее время находятся на стадии ядра планетарной туманности. Вторая звезда системы находится на стадии красного гиганта и теряет вещество со скоростью $10^{-5} - 10^{-6} M_{\odot}/\text{год}$. Оценим число подобных систем в Галактике. Используя данные Тинсли [12] и учитывая, что половина всех звезд — двойные, функцию звездообразования для двойных звезд можно записать в виде:

$$dN = \frac{1}{6} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-2.5} d \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right).$$

Периоды рассматриваемых нами систем должны иметь значения, больше ограниченных кривой IV на рис. 1. Согласно Ван ден Хойпелу [13] по данным не исправленным за вероятность открытия, доля систем с такими параметрами $\sim 10\%$; согласно Попову [14] (с учетом вероятности открытия) их доля меньше 4%. Примеч, что доля подобных систем равна 10%. Эта оценка, вероятно, завышена, так как периоды систем должны быть ближе к значениям, соответствующим кривой V, чем к IV. Время жизни одиночных звезд в области ядер планетарных туманностей ограничено запасом ядерного горючего в очень тонких оболочках и равно $\sim 10^4$ лет. Однако в относительно тесной двойной симбиотической звезде запас ядерного горючего у горячей звезды может постоянно пополняться вследствие аккреции части вещества, выброшенного холодной компонентой.

Поэтому можно принять, что время жизни симбиотической звезды того же порядка, что и время жизни холодной компоненты на стадии роста углеродно-кислородного ядра, то есть $\sim 10^6$ лет. Нижняя граница интервала масс звезд, проходящих стадию симбиотических, оценивается из условия достижения более массивной компонентой стадии ядра планетарной туманности за время жизни Галактики: $\sim M_{\odot}$. Верхний предел интервала масс значительно менее определен: 3—8 M_{\odot} по данным разных авторов (см. [4]), но от его точного значения численная оценка практически не зависит. С учетом указанных факторов число симбиотических звезд:

$$N_s \approx \int_3^8 \left[\frac{1}{6} \cdot \frac{1}{10} \cdot \frac{10^{-6}}{(M/M_{\odot})^{2.5}} \right] d(M/M_{\odot}) \approx 10^4.$$

Другой путь образования симбиотических звезд может быть связан с обменом веществом между компонентами. Предположим, что первоначально более массивная компонента систем заполнила полость Роша на стадии красного гиганта. В этом случае в результате одного [5] или двух [6] этапов потери вещества звезда превратится в углеродно-кислородный карлик и, когда вторая компонента системы достигнет стадии красного гиганта и начнет терять вещество, образуется система, подобная уже рассмотренной выше. Число таких систем в Галактике также может быть $\sim 10^4$. В этих системах холодная компонента может терять вещество или из-за неустойчивости оболочки, уже упомянутой выше, или из-за того, что она заполняет полость Роша. Лаутерборн [5] и Плавец и др. [6] показали, что у красных гигантов с массой 5—7 M_{\odot} , заполняющих полость Роша у границы Хаяши, существует относительно долгая — порядка нескольких сот тысяч лет — стадия потери вещества со скоростью $\sim 10^{-3}$ — $10^{-6} M_{\odot}/\text{год}$. Отметим, что если отсутствует аккреция части вещества, выбрасываемого красным гигантом, время эволюции горячей компоненты будет сравнительно мало — порядка нескольких десятков тысяч лет — и оценка числа симбиотических звезд в Галактике понизится до $\sim 10^2$, что заметно ниже их наблюдаемого числа.

Возможно, что исходная система была еще более тесной и ее первичная компонента заполнила полость Роша на стадии горения водорода в слоевом источнике, но еще до того, как она стала красным гигантом (на диаграмме Герцшпрунга—Рессела звезда в это время пересекает «провал Герцшпрунга»). В результате потери вещества первичная компонента превращается в гелиевую звезду. Вторая компонента системы заполняет полость Роша на стадии красного гиганта, если период системы до первого обмена веществом имел значение большее ограниченной кривой VI на рис. 1. Можно принять, что подобные системы составляют примерно половину всех двойных

звезд. Интервал масс звезд, которые могут пройти в данном случае через стадию симбиотических, — $3-10 M_{\odot}$, так как звезды меньших масс в результате потери вещества превращаются в холодные белые карлики. Учитывая все перечисленные факторы, мы снова приходим к оценке числа симбиотических звезд в Галактике $\sim 10^6$.

Итак, существуют три механизма, способные превратить тесную двойную систему умеренной массы ($M \leq 8-10 M_{\odot}$) в симбиотическую звезду, однако сделать между ними однозначный выбор на сегодняшний день сложно, хотя предположение о том, что симбиотическая звезда — это углеродно-кислородный карлик в паре с красным гигантом кажется более перспективным. Весьма вероятно, что группа симбиотических звезд неоднородна и включает объекты, образовавшиеся разными путями. В этой связи укажем, что с симбиотическими звездами сходны еще малоисследованные звезды типа ВQ [] (см., например, [15]), которые отличаются от симбиотических более компактными туманностями и отсутствием фотометрической переменности. Число ВQ [] звезд, возможно, того же порядка, что и число симбиотических, так как их известно около 70 и условия видимости сравнимы с условиями для симбиотических звезд. Возможно, что ВQ [] и симбиотические звезды представляют собой разные стадии развития одних и тех же объектов или различаются по характеру горячей компоненты — в первом случае это гелиевые звезды, а во втором — углеродно-кислородные.

Важная нерешенная проблема — это механизм неустойчивости симбиотических звезд. Изменения яркости их горячих компонент могут быть связаны с тепловой неустойчивостью невырожденных тонких слоевых источников горения He. Однако особенность наблюдаемых вспышек горячих компонент состоит в том, что при мало изменяющейся светимости радиус звезды значительно возрастает (до двух порядков [7]) и их характерное время порядка нескольких лет, в то время как расчеты моделей звезд с вырожденными углеродно-кислородными ядрами и тонкими водородно-гелиевыми оболочками [16, 17] показывают, что для их неустойчивости характерны значительно меньшие изменения радиусов и большие изменения светимости с характерными временами порядка сотен и тысяч лет. О возможности повторных вспышек у ядер планетарных туманностей (одиночных), интервал между которыми по оценкам Калера [18] ~ 5000 лет, свидетельствует наличие у, примерно, трети из них двойных оболочек. Отличие между ядрами планетарных туманностей и горячими компонентами симбиотических звезд, возможно, в том, что на поведение последних существенно влияет аккреция, которая, вероятно, меняет тепловой режим слоевых источников таким образом, что вспышки происходят чаще и с меньшей амплитудой.

Рассмотрим некоторые особенности аккреции на горячий углеродно-кислородный карлик, входящий в состав широкой двойной звезды. Предпо-

ложим, что вторая компонента—красный гигант—теряет $10^{-5} - 10^{-6} M_{\odot}/\text{год}$, не заполняя полость Роша. Из этого потока карлик захватывает долю:

$$\mu = \frac{G^2 M_{II}^2}{v^3 R^2} \quad (3)$$

где v — скорость истечения вещества, R — расстояние между компонентами. При R и v , характерных для симбиотических звезд, горячий карлик будет захватывать до $10^{-1} - 10^{-3}$ всего вещества, теряемого гигантом. (Мы принимаем, что пыль, если она содержится в истекающей оболочке, испаряется жестким излучением горячей звезды и поэтому давление излучения не препятствует аккреции).

Таким образом, горячий карлик аккрецирует ежегодно $10^{-4} - 10^{-7} M_{\odot}$ вещества, богатого водородом. Если бы карлик имел массивную водородно-гелиевую оболочку, то масса его ядра увеличивалась бы ежегодно на $\sim 10^{-6} M_{\odot}$ за счет горения вещества в двойном слоевом источнике. В рассматриваемом же случае, когда масса оболочки мала ($\sim 10^{-7} M_{\odot}$) скорость выгорания вещества в оболочке определяется скоростью поступления в нее вещества в результате аккреции. Светимость карлика должна быть ниже, чем светимость, генерируемая слоевыми источниками, окружающими вырожденное углеродно-кислородное ядро звезды с массивной оболочкой, задаваемая известным [16, 19] соотношением

$$\frac{L_{II}}{L_{\odot}} \approx 6 \cdot 10^4 \left(\frac{M_{II}}{M_{\odot}} - 0.5 \right),$$

где M_{II} — масса С—О ядра. При выгорании в ядерных реакциях аккрецированного вещества выделяется $\sim 10^{10}$ эрг/г, в то время, как выделение гравитационной энергии при дисковой аккреции на поверхность карлика с радиусом $\sim 10^8$ см составляет всего $\sim 10^8$ эрг/г, следовательно, аккреция не будет проявляться в спектре звезды.

Если светимость горячих компонент симбиотических звезд действительно обеспечивается выгоранием аккрецированного вещества, то соотношение (3) показывает, что широкие системы с $P \gtrsim 10^4$ дней не могут проявляться как симбиотические звезды, так как у них светимость горячих компонент из-за малого захвата вещества должна быть недостаточна для создания заметной зоны Стремгrena.

Аккреция на горячий углеродно-кислородный карлик, происходящая со скоростью $\sim 10^{-6} - 10^{-8} M_{\odot}/\text{год}$ в течение $10^6 - 10^8$ лет, может существенно повлиять на его эволюцию, так как она приводит к непрерывному увеличению массы его ядра. В частности, при определенных условиях масса ядра может превысить критическое значение, при котором происходит возгорание углерода в сильно вырожденном веществе, что приведет к

термоядерному взрыву Сверхновой. Подобная схема эволюции была предложена Виланом и Ибеном [20] для объяснения причин взрыва Сверхновых I типа. Отметим, что в условиях, когда скорость роста C—O ядра регулируется темпом аккреции, условия в центре звезды в момент загорания углерода должны отличаться от условий в центре звезды с «нормальной» массивной оболочкой. Кроме того, отсутствие у предсверхновой — горячей компоненты симбиотической звезды протяженной водородной оболочки, характерной для одиночных звезд, должно сказаться на форме кривой блеска Сверхновой.

Таким образом, современные представления об эволюции одиночных и тесных двойных звезд позволяют объяснить основные свойства симбиотических звезд и указать их эволюционную стадию. Однако некоторые детали предложенной выше схемы все еще неясны, в особенности картина движения вещества в оболочке, окружающей систему, и механизм неустойчивости горячих компонент.

Авторы выражают глубокую благодарность А. А. Боярчуку за обсуждение ряда вопросов.

Астросовет АН СССР

ON THE ORIGIN AND EVOLUTIONARY STAGE OF SYMBIOTIC STARS

A. V. TUTUKOV, L. R. YUNGELSON

The analysis of the parameters of symbiotic stars shows that their hot components have to be either carbon-oxygen dwarfs with thin hydrogen-helium envelopes or helium stars with thin hydrogen-helium envelopes, while the cold components—red giants loose mass at the rate of 10^{-3} — $10^{-6} M_{\odot}/\text{year}$ over the period of 10^3 — 10^6 years. Such systems may be formed from wide pairs if the envelope of the initially more massive component is lost due to continuous mass loss or due to rapid mass loss caused by the dynamical instability on the red giant stage. If the initial system is not too wide, a hot star may be formed due to mass exchange. It is shown that hot components of symbiotic stars may accrete 10^{-6} — $10^{-1} M_{\odot}/\text{year}$. Some consequences of accretion on C—O dwarfs are discussed.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Боярчук и сб. «Эруптивные звезды», Наука, М., 1970, стр. 113.
2. Trimble, A. J., 79, 967, 1974.
3. R. D. Gehrz, N. J. Woolf, Ap. J., 165, 295, 1971.

4. *B. Paczynski*, IAU Symp. 66, „Late Stages of Stellar Evolution“, Warsaw, 1973.
5. *D. Lauterborn*, *Astron. Astrophys.*, 7, 150, 1970.
6. *M. Plavec, R. K. Ulrich, S. Polidan*, *P. A. S. P.*, 85, 769, 1973.
7. *А. А. Боярчук*, в сб. «Космическая газодинамика», Мир, М., 1972, стр. 324.
8. *В. Г. Горбачук*, Новоподобные и новые звезды, Наука, М., 1974.
9. *L. Spitzer*, *Diffuse Matter in Space*, *Inter. Sci. Publ.*, 1968.
10. *B. Paczynski*, *Acta Astron.*, 20, 2, 1970.
11. *А. В. Тутуков, Л. Р. Юнгельсон, А. Я. Кляйман*, Научные информации Астрономического совета АН СССР, 27, 3, 1973.
12. *B. M. Tinsley*, *Astron. Astrophys.*, 31, 463, 1974.
13. *E. P. J. van den Heuvel*, *BAN*, 19, 376, 1968.
14. *М. В. Попова*, Диссертация, ГАИШ, 1968.
15. *F. Statti, S. D'Odorico, A. Mammano*, *Astron. Astrophys.*, 34, 181, 1974.
16. *B. Paczynski*, *Acta Astron.*, 21, 4, 1971.
17. *J. I. Katz, R. C. Malone, E. E. Salpeter*, *Ap. J.*, 190, 359, 1974.
18. *J. V. Kalor*, *A. J.*, 79, 594, 1974.
19. *У. Х. Уус*, Научные информации Астрономического совета АН СССР, 17, 32, 1970.
20. *J. Whelan, I. J. Iben*, *Ap. J.*, 186, 1007, 1973.