

Переменные звезды 20, 179–195, 1975

Variable Stars 20, 179–195, 1975

О возможности термоядерной вспышки в сжимающейся протозвезде

В. С. Шевченко

Предполагается, что определенная концентрация дейтерия и изотопов лития, бериллия и бора в протозвездных облаках может существенно изменить ход эволюции протозвезды, а при некоторых условиях привести к ядерной вспышке с катастрофическими последствиями.

Современная теория гравитационного сжатия не в состоянии объяснить низкие значения осевых скоростей, изобилие тесных пар и кратных систем типа "Трапеции" среди звезд Т Тельца и родственных им объектов. Расширяющиеся оболочки H II в районах M42 и NGC 6618, летящие звезды Блау — это следствия взрывных процессов. Вспышки сверхновых II-го и III-го типов, возможно, соответствуют ранней фазе эволюции.

Протон-протонная цепочка из-за слабого взаимодействия не является типичной. Дейтерий, литий, бериллий и бор реагируют при более низких температурах, а каждая из реакций с легкими элементами дает выход энергии, намного превышающий выход энергии при протон-протонном цикле.

В межзвездной среде прямыми наблюдениями обнаружены дейтерий, литий и бериллий, причем есть основания предполагать, что содержание дейтерия в молекулярном облаке выше, чем в окрестностях Солнца.

Вспышки сверхновых и космические лучи значительно обогащают легкими элементами области звездообразования.

Произведена оценка содержания дейтерия и легких элементов, которые приводят протозвезду к взрыву.

Важную роль в эволюции протозвезды может играть отклонение модели от сферической симметрии и химическая стратификация в фазе коллапса.

Более точный учет непрозрачности и энергии на диссоциацию молекул может изменить эволюционный трек протозвезды так, что ядерная вспышка следует непосредственно после фазы коллапса. Явление вспышки связывается со вспышкой FU Ориона. Предполагается, что большинство звезд Т Тельца прошли активную фазу взрыва.

В заключении изложена программа дальнейших исследований.

On the Possibility of Nuclear Explosion in a Contracting Protostar by V. S. Shevchenko

The high abundance of deuterium and lithium isotopes, beryllium and boron in protostellar clouds is supposed to change essentially the evolution of a protostar and under some conditions to cause a nuclear explosion with disastrous results.

The modern theory of gravitational contraction cannot explain low axial rotation and plenty of close pairs and multiple systems like Trapezium among T Tauri stars and related objects. Expanding zones of H II in M42 and NGC 6618 regions, "flying" stars of Blaauw are results of explosive processes. Explosions of type II and III supernovae correspond probably to early phase of evolution.

Proton-proton chain reaction is not typical due to weak interaction. Deuterium, lithium, beryllium and boron react at lower temperatures, but any reaction of light elements gives off the energy much exceeding the same in proton-proton reactions.

Deuterium, lithium and beryllium were discovered in the interstellar medium by direct observations, there being reasons to believe that the abundance of deuterium in a molecular cloud is higher than in the solar surroundings.

Cosmic rays and explosions of supernovae enrich the zones of stars formation with light elements to a great extent.

The abundance of deuterium and light elements which leads a protostar to explosion was estimated.

The deviation from a model of spherical symmetry and chemical stratification may have much significance in a protostar evolution. More accurate calculation of opacity and dissociation energy may change evolutionary track so that a nuclear explosion will follow a collapse phase at once. The author connects an explosion with a flare of FU Ori. The main part of T Tauri stars seem to have passed the active phase of explosion.

In conclusion the program of the future investigations is given.

Из теории звездной эволюции после нулевого возраста, из наблюдений хорошо известно, что все активные фазы переменности наступают на поворотных этапах эволюции, при перестройке структуры звезды и смене источников энергии. Наиболее радикальная смена источников энергии и структуры происходит как раз при вступлении звезд на главную последовательность. В этом свете тот факт, что явление переменности Т Тельца связывают с конвективной неустойчивостью в период гравитационного сжатия, а сам процесс радикальной смены источников энергии проходит спокойно, выглядит необычным.

Рассматривая сжатие протозвезды, Хаяши (1966, 1970), Ибен (1965), Ларсен (1969), Колесник (1973, 1974, 1975) полагают, что содержание X, Y, Z в модели протозвезды близко к содержанию этих элементов у звезд главной последовательности и не рассматривают возможный ядерный синтез с легкими элементами до начала протон-протонной реакции на главной последовательности (ГП).

Определенная концентрация примесей дейтерия и элементов группы L в наблюдаемых областях звездообразования может изменить ход эволюции протозвезды, а при некоторых условиях привести к ядерной вспышке с катастрофическими последствиями еще до начала выделения энергии за счет протон-протонной цепочки.

Прежде чем рассмотреть такую возможность, отметим наиболее существенные наблюдательные факты, не укладывающиеся в рамки современной теории гравитационного сжатия (ТГС). При этом мы бу-

дем придерживаться общепризнанного отождествления орионовых переменных, переменных Т Тельца, Т-ассоциаций и объектов, родственных им, с объектами и областями звездообразования.

1. Некоторые наблюдательные факты.

Скорость осевого вращения звезд Т Тельца, если они находятся на завершающем этапе сжатия, должна быть очень высокой. Хербиг (1962) считает, что скорости осевого вращения звезд Т Тельца должны были бы составлять сотни км/сек. Если предположить наличие начального момента и осевой скорости 0.01 км/сек (что в 100 раз меньше характерных скоростей отдельных конденсаций в межзвездном газе) у протозвездной конденсации диаметром 1000 а. е., то при ее сжатии до диаметра Солнца, звезда имела бы скорость вращения порядка 1000 км/сек. Яркий пример увеличения скорости вращения при сжатии представляют собой пульсары.

Ротационная неустойчивость, в результате которой происходит потеря массы, удерживает звезду вблизи ротационного равновесия и неспособна свести до минимума скорость осевого вращения.

Оценка потери масс звездами типа Т Тельца, выполненная Кухи (1963, 1966) убеждает, что этот процесс малоэффективен в торможении вращения; для этого заключения достаточно воспользоваться схемой расчета Мартынова (1948). Легко также убедиться, что энергии, выделяемой при перестройке структуры протозвезды на этапах диссоциации водорода и формировании конвективной зоны, недостаточно для торможения вращения.

Хунгер (1963), определивший верхний предел скорости вращения Т Тельца $v \sin i < 15$ км/сек, полагает, что звезды типа Т Тельца не имеют быстрого вращения. До сих пор спектральные наблюдения не установили значительных осевых скоростей ни у орионовых переменных, ни у родственных им объектов.

Ве-звезды, по фундаментальным параметрам мало отличающиеся от О-В-звезд поля, только в результате перестройки внутренней структуры увеличивают осевую скорость в 3–5 раз. Массивные звезды в Орионе, закончившие сжатие и недавно вступившие на ГП имеют осевые скорости ненамного выше, чем О-В-звезды поля (Шевченко, 1967а).

Необходимо искать механизм торможения вращения, соответствующий энергетике $\sim 10^{46}$ эрг для звезд средней массы. ТГС такого механизма не предусматривает.

Изобилие тесных пар среди звезд ГП является одним из непонятных фактов, если образование звезд происходит по ТГС. Фрагментация на стадии гравитационного сжатия (ГС) дает объяснение наблюдаемому распределению расстояний между компонентами широких пар (около 1000 а. е) как среди звезд Т Тельца, так и на ГП (Закиров, 1973). Однако, закон Роша, накладывает жесткие ограничения на образование тесных пар с характерным расстоянием около 1 а. е. в процессе сжатия (Закиров, 1975а). Нет необходимости приводить аргументы против идеи образования пары после вступления звезды на ГП.

Идеи Джинса об образовании тесных пар делением в результате ротационной неустойчивости опровергнуты дальнейшими расчетами. В дан-

ном случае гипотетической вращательной энергии протозвезды хватило бы на образование пары: препятствием делению служит структура звезды и на ГП и, особенно, в период гравитационного сжатия.

На вопрос, каким образом в изобилии образуются тесные пары, ТГС ответа не дает.

Кратные системы типа Трапеции представляют особый интерес. Кроме хорошо известной Трапеции Ориона, в А-ассоциациях существует несколько десятков аналогичных систем, в которых одна или более звезд являются переменными типа Т Тельца (Закиров, 1975б). Особенно высок процент таких систем среди объектов Хербига-Аро (ННО).

Конечно, можно сомневаться в результатах Паренаго (1954), установившего разбегание и положительную энергию "Трапеции" Ориона, но тот факт, что среди звезд на поздних стадиях эволюции "трапеций" нет, свидетельствует об их неустойчивости и распаде. В М31, М33, БМО и других близких Галактиках обнаружены сотни О-ассоциаций или гигантских скоплений О-В-звезд. Вместе с тем в галактиках значительная часть звезд О, В, и большинство звезд Ое-Ве, представляющих более позднюю стадию эволюции звезд О-В, принадлежит звездам фона (Кардополов, 1972). Существование областей образования одиночных массивных звезд представляется весьма гипотетичным.

Амбарцумян (1972) подчеркивает важную роль взрывных процессов при звездообразовании. Его противники приводят множество доводов в пользу того, что положительная энергия молодых звездных группировок строго не доказана. Но доказательств того, что эти группировки имеют отрицательную энергию (как и облако сжимающегося газа) также не существует. Более того, в наблюдениях на это нет и намека.

Может быть до строгих доказательств наличия положительной энергии, хотя бы в некоторых системах типа Трапеции, эти факты и не являются серьезным аргументом против современной ТГС, но отрицать роль взрывных процессов — значит становиться на другую крайнюю точку зрения; опыт убеждает нас, что в природе часто противоположные силы служат целям эволюции и формирования нового. Весьма вероятно, что звезды не составляют исключения.

Расширяющаяся оболочка II в Орионе (петля Барнарда), как принято считать, является следствием взрыва, или нескольких взрывов, имевших место $2 \div 5 \cdot 10^6$ лет назад вблизи центра ассоциации Ориона (Блау, 1961). Знаменитые "летающие" звезды 53 Овна, АЕ Возничего и μ Голубя "вылетели" из туманности Ориона 4.9, 2.7 и 2.2 миллиона лет назад, вероятнее всего из-за эффекта "пращи". Аналогичная расширяющаяся эллиптическая оболочка обнаружена Гершбергом (1963) в районе туманности "Подкова" (M17).

В центре этой туманности расположено очень молодое скопление NGC 6618. Гершберг нашел три звезды сравнительно большой массы, убегающие от центра Подковы с большими скоростями. Взрывы, по-видимому, произошли всего несколько десятков тысяч лет назад.

Эти явления Шкловский (1966) связывает со вспышками сверхновых II-го типа.

Широко распространено мнение, что взрыв сверхновой наступает на завершающем этапе эволюции, когда в составе звезды достаточно много тяжелых элементов. Водород и гелий при температуре 10^9 °K не дают нужный выход энергии. Есть веские доказательства, что сверхновые I-го типа действительно вспыхивают после исчерпания основных источников энергии. Что касается сверхновых II-го и III-го типов, во многом отличающихся от сверхновых I-го типа, таких доказательств нет.

Шкловский (1966), анализируя эффект "пращи" высказывает следующее предположение (§ 4, стр. 72):

"Коль скоро массы взрывающихся звезд получаются большими (вероятнее всего более $100 M_{\odot}$), они должны быть молодыми, т.е. время, прошедшее после их формирования из межзвездной газовой-пылевой среды, должно быть невелико. Скорее всего взрыв происходит еще до того, как звезда достигнет главной последовательности. Это означает, что они находятся в стадии гравитационного сжатия".

Для случаев предполагаемых взрывов в Туманности Ориона вероятность взрыва сверхновой в стадии сжатия в 10–100 раз больше, чем по завершению эволюции массивных звезд, гипотетических компонентов "летающих" звезд. Для туманности "Подкова" вторая вероятность в 10^3 – 10^4 раз меньше первой.

Однако и альтернативная вероятность представляет чрезвычайный интерес, в связи с возможностью обогащения межзвездной среды дейтерием и легкими элементами (об этом будет сказано ниже).

Последствиями мощных взрывных процессов являются также многочисленные неправильные и кометарные туманности, которые окружают значительную часть (около 20%) изолированных от яркого фона "общей" туманности звезд типа Т Тельца.

В заключение отметим еще одну любопытную особенность объектов в стадии звездообразования.

Некоторые очень молодые скопления довольно уверенно дифференцируются по возрасту несколькими независимыми методами. Следовало бы ожидать, что изохронное усреднение Т-полосы подтвердит такую дифференциацию. На самом деле вид Т-полосы на протяжении довольно длительного интервала возрастов ($5 \cdot 10^5$ – $5 \cdot 10^6$ лет) никак не коррелирует с возрастом скоплений и Т-ассоциаций (Шевченко, 1975). Обработка аналогичных диаграмм в ближней инфракрасной области спектра, где искажения минимальны, привела автора к такому же выводу (Шевченко, 1975).

В скоплении Ориона существует так же некоторое число неизменных нормальных звезд 12^m – 14^m V с нормальными показателями цвета (от U–V до V–J) и очень малым собственным движением (как и у звезд скопления). Эти звезды проектируются на непрозрачное пылевое облако. Больше всего их в центральной части скопления, а на периферии района с большим поглощением таких звезд практически нет. Спектры этих звезд не наблюдались, но по остальным характеристикам – это обычные звезды ГП. Парадокс заключается в том, что для достижения ГП им требуется от $2 \cdot 10^7$ до 10^8 лет по ТГС Ибена и Хаяши, в то время как возраст скопления Ориона не более $5 \cdot 10^6$ лет.

Складывается впечатление, что длительное время оптические характеристики звезд Т Тельца и орионовых переменных не являются функцией возраста из ТГС. Лишь по истечении значительных сроков ($2 \cdot 10^7$ лет) светимость объектов в среднем как будто начинает соответствовать изохроме.

Гипотеза о том, что аномалии в оптических характеристиках звезд Т Тельца обязаны их субхромосферам, оболочкам и околозвездному пространству, ранее уже высказывалась (Шевченко, 1967б).

Рассмотрим теперь ядерные реакции, которые в принципе возможны на начальном этапе эволюции.

2. Ядерные реакции с легкими элементами.

Особенности протон-протонной цепочки. Хорошо известная запись начала протон-протонной реакции:



в действительности состоит из двух ступеней:



Промежуточное ядро ${}^2\text{He}$ очень неустойчиво. Вероятность его превращения путем β -распада в дейтрон очень низка. В результате вместо образования дейтрона, как правило, происходит распад ${}^2\text{He}$ на исходные протоны:



Поскольку вероятность β -распада всегда очень низка, а слабое взаимодействие всегда замедляет процесс, протон-протонная цепочка среди ядерных реакций *не является типичной*. И хотя следовало бы ожидать, что чисто водородные реакции (протоны обладают наименьшим зарядом) идут в первую очередь, на самом деле ядерные реакции с другими элементами тяжелее водорода начинаются при более низких температурах, идут с большей вероятностью, а скорость генерации энергии в этих реакциях намного выше.

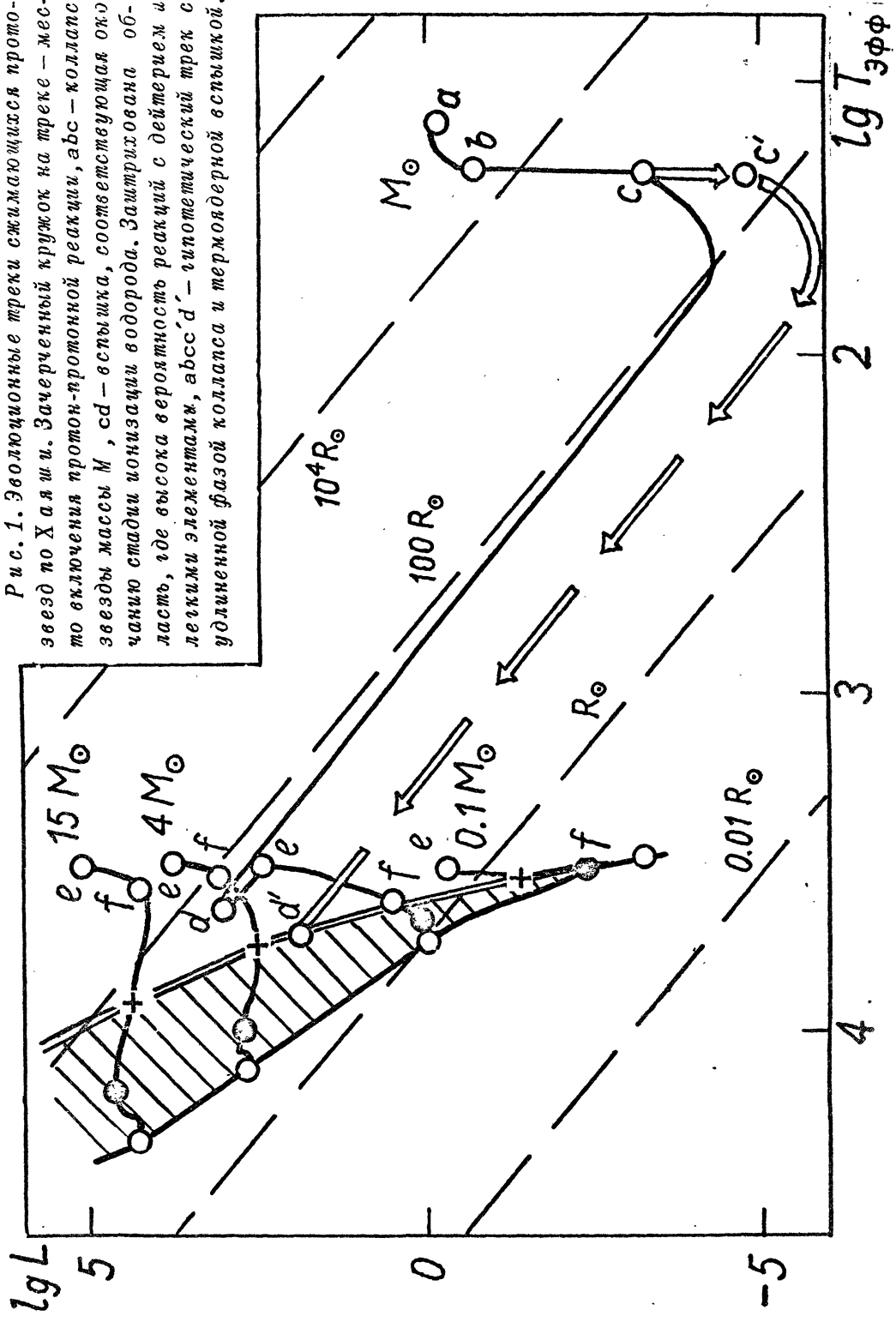
Отметим теперь важное следствие из упомянутой особенности водородного цикла. Именно благодаря нетипичности и низкой генерации энергии протон-протонная цепочка считается определяющей на ГП. В самом деле при энерговыделении со следующим за ним повышением температуры и соответствующим изменением гидростатического давления на долю λ в центральной зоне, где идут ядерные реакции, требуется какое-то время t для восстановления равновесия (Тейлер, 1973). Однако из-за очень низкого удельного энерговыделения протон-протонной реакции величина λ ничтожно мала и не приводит к заметным изменениям структуры (для Солнца $\lambda \ll 10^{-27}$).

У звезды, приближающейся к ГП, температура в центре растет еще за счет гравитационного сжатия. Поскольку при малых температурах скорость генерации энергии растет пропорционально температуре в четвертой степени

$$\epsilon_{pp} \sim \epsilon X_H^2 \rho T^4, \quad (4)$$

казалось бы, что достаточно даже небольшого повышения температуры для значительного увеличения энерговыделения. На самом деле очень низкая вероятность протон-протонной цепочки и в данном случае сводит

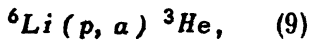
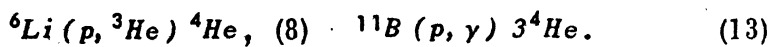
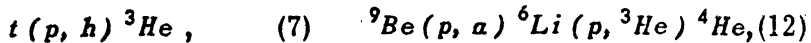
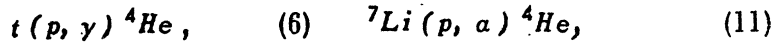
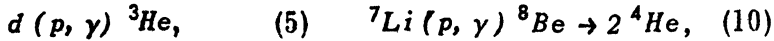
Рис. 1. Эволюционные треки сжимающихся прото-звезд по Хаяши. Зачерченный кружок на треке — место включения протон-протонной реакции, абс — коллапс звезды массы M , cd — вспышка, соответствующая окончанию стадии ионизации водорода. Затрихована область, где высока вероятность реакций с дейтерием и легкими элементами, абс d' — типичный трек с удлинением фазой коллапса и термоядерной вспышкой.



на нет повышение температуры. На треках сжимающихся звезд на рис. 1 зачерченным кружком показано место, где включается водородный цикл, звезда с массой Солнца продолжает сжатие $\sim 3 \cdot 10^7$ лет, и только после этого ядерного энерговыделения оказывается возможной остановка сжатия.

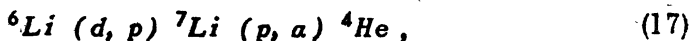
Дейтерий, литий, бериллий и бор реагируют при более низких температурах, чем водород, а каждая из реакций с легкими элементами дает выход энергии, намного превышающий этот выход при протон-протонном цикле.

Самым распространенным элементом является водород. Дейтерий и устойчивые изотопы лития, бериллия и бора разрушаются в реакциях с участием протонов. Отметим следующие реакции:



Сечения этих реакций как правило на порядок или на несколько порядков выше, чем сечения для протон-протонного цикла в целом.

Но если в плазме содержится заметное количество дейтерия, то представляют интерес реакции на ядрах дейтерия, которые имеют самые большие сечения при низких температурах и самую высокую скорость энерговыделения:



Вторая часть реакции (14) используется в водородной бомбе, а реакции (14) и (15) связаны с попытками осуществления управляемых термоядерных реакций в лабораторных условиях. Реакция (5) — второй необходимый элемент в протон-протонной цепочке, следующий за (2).

Следует отметить, что второй по значимости на ГП — CN-цикл — идет при более высоких температурах, чем (5–18). Ядра углерода и азота имеют относительно большие электрические заряды, и скорости реакций значительно меньше, чем были бы, если бы все взаимодействующие ядра имели низкие электрические заряды.

Итак, если дейтерий или литий, бериллий и бор присутствуют в протозвездном веществе в заметном количестве, с неизбежностью следуют два важных для теории звездной эволюции вывода:

1). В любой звезде термоядерные реакции с легкими элементами предшествуют протон-протонной цепочке и CN-циклу. Поскольку вероятность этих реакций высока, а скорость энерговыделения значительна, они могут играть существенную роль в начальной звездной эволюции.

2). Для нормальной эволюции на ГП (т.е. для нормального протекания водородных реакций) необходимо, чтобы в какой-то начальный период до нулевого возраста концентрация легких элементов оказалась очень малой.

Обратим внимание на некоторые следствия из этих выводов: коль скоро в недрах сжимающейся протозвезды температура повышается, а вероятность и скорость энерговыделения в реакциях с легкими элементами высока, появляется возможность необратимого вывода звезды из равновесия (взрыва). Для этого необходимо, чтобы в какой-то момент доля гидродинамического давления, обусловленная выделением энергии за счет таких реакций λ_p , совместно с другой причиной повышения давления — приростом температуры в период быстрого сжатия $\lambda_c - (\lambda_p + \lambda_c)$ была значительной, чтобы время t оказалось малым. Эта доля, как и время t в конечном счете является только функцией массы протозвезды. Существование ограничений в начальной функции масс может быть обусловлено именно этой причиной.

Так как подавляющее большинство астрономических объектов — это звезды, звездные группировки, возбуждаемый или освещаемый ими газ (который чаще всего является продуктом тех же звезд), то все легко доступные для наблюдений астрономические объекты должны иметь низкое содержание дейтерия, лития, бериллия и бора.

3. Содержание легких элементов в протозвездных облаках.

Рассмотрим теперь возможность высокого начального содержания легких элементов в протозвездных облаках и протозвездах. При этом предпочтение будем отдавать тем областям пространства, где происходит интенсивное звездообразование.

Дейтерий. Аллер (1963) полагает, что в среднем в межзвездной среде и окрестностях Солнца $N(D)/N(H) \approx 10^{-4}$. В 1973 г. в молекулярном облаке туманности Ориона Шнайдер и Бакал (1973) обнаружили молекулу DCN . Данные наблюдений дали отношение двух изотопических молекул $N(DCN)/N(HCN) \approx 2.4 \cdot 10^{-2}$. Это конечно не означает, что дейтерия в облаке Ориона всего в 40 раз меньше, чем водорода: предполагают, что образование молекулы DCN имеет большую вероятность, поэтому ожидается $N(D)/N(H) \approx 10^{-2} - 10^{-3}$. Исследуя межзвездный молекулярный водород с помощью аппаратуры, установленной на спутнике "Коперник", Спитцер с соавторами (1973) обнаружил в спектрах девяти звезд две линии молекулы HD . Механизм образования H_2 намного эффективнее, чем механизм образования HD , а разрушается молекула HD значительно легче, поэтому оцененное авторами отношение $N(HD)/N(H_2) \approx 10^{-6}$ не отражает содержание протонов и дейтронов. В ординарном межзвездном облаке границы содержания дейтерия $N(D)/N(H) \approx 10^{-2} - 10^{-5}$.

Если верхняя граница содержания дейтерия имеет место в протозвездных облаках, то реакции (5), (14) и (15) становятся эффективными и определяют эволюцию до ГП.

Тритий, 3He , 4He . Содержание трития в межзвездных облаках вряд ли может быть значительным из-за очень малого времени полураспада. Поэтому реакции (6) и (7) скорее всего не являются определяющими при самых низких температурах.

Содержание трития и 3He в атмосферах звезд Т Тельца и родственных им объектов представляет интерес в связи с возможностью реакций (8), (9), (14). Тритий, как продукт реакции (8) при определенной температуре с высокой вероятностью участвует в реакциях (6) и (7).

${}^3\text{He}$ является продуктом реакций (5), (7), (8), (9), (11) и (15). Конечным продуктом почти всех перечисленных реакций является и ${}^4\text{He}$. Отсюда следует, что легкие элементы, разрушаясь в сжимающейся протозвезде при термоядерных реакциях, увеличивают содержание гелия. В связи с этим представляла бы интерес оценка отношения содержания гелия в звездах и протозвездных облаках.

Мы обращаем также внимание на явление, наблюдавшееся Шаниным, Шевченко и Щербаковым (1975) при исследовании поведения инфракрасной линии гелия $\lambda 10830 \text{ \AA}$ у звезды Т Тельца. Эта линия, которая чаще всего видна в поглощении, на протяжении часа (длительность экспозиции) 26 октября 1973 г. наблюдалась в эмиссии. На рис. 2 приведены контуры линий $\text{He } \lambda 10830 \text{ \AA}$ за 29 октября и 26 октября 1973 г. и инструментальный контур. Из-за низкого разрешения изотопический состав ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ оценить не удается.

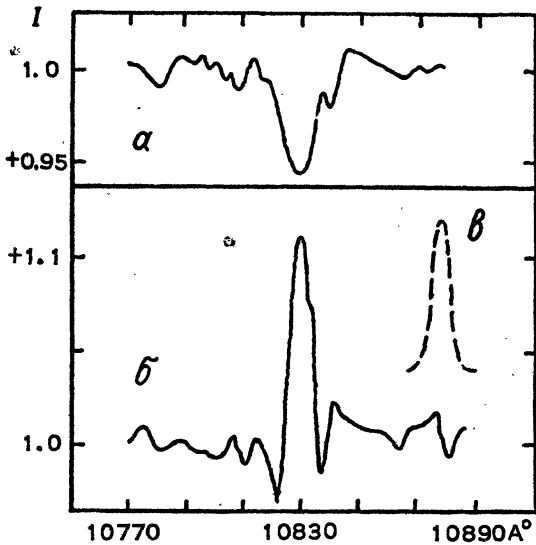


Рис. 2. Профиль линии $\text{He } \lambda 10830 \text{ \AA}$ в спектре Т Тельца: сверху 29.10.73 г., внизу 26.10.73 г., пунктир-инструментальный контур.

в результате pp -цепочки (вариант 2), как следствие реакций (1), (5), затем:



завершаясь (11) образованием ${}^4\text{He}$. Реакция (5), начавшись, также может привести к (20).

В обоих случаях вероятность образования ${}^7\text{Li}$ очень низка, если полагать начальный состав близким к солнечному, и вряд ли может привести к наблюдаемому изобию. Кроме того, скорость энерговыделения в pp -цепочке на стадии Т Тельца ничтожно мала. Поэтому такой механизм неэффективен.

В другом варианте авторы рассмотрели реакции "скалывания": при ускорениях в магнитных полях протоны отрывают от ядер С, N и O частицы, оказывающиеся ядрами ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$. Бэбкок (1958) считает, что

Такое явление в принципе могло бы иметь место при локальной термоядерной реакции в недрах звезды и выносе наружу продуктов этой реакции механизмом, родственном тому, который рассмотрел Горбачки й (1964).

Литий, бериллий, бор.

Хорошо известный факт повышенного содержания лития в атмосферах звезд типа Т Тельца до сих пор не получил однозначного объяснения. Бонзак и Гринстейн (1960) и Бонзак (1961), обнаружившие это явление, рассмотрели возможность образования лития в недрах звезд типа Т Тельца и переноса наружу конвекцией.

В частности, ${}^7\text{Li}$ возникает

напряженность магнитного поля у Т Тельца меньше 1000 гаусс.

Франк-Камеицкий (1963) привлекает переменные магнитные поля на ранней фазе образования протозвезды для реакций холодного синтеза при ускорениях α -частиц.



Наиболее простое предположение, что наблюдаемое изобилие лития в звездах Т Тельца *отражает первоначальный состав* протозвездных облаков, не пользуется популярностью из-за трудностей наблюдений химсостава межзвездной среды.

Становясь на точку зрения, что звезды типа Т Тельца – это объекты, которые большей частью прошли фазу активной термоядерной вспышки, мы тем самым полагаем, что в звездах Т Тельца лития меньше, чем в протозвездном облаке,

Литий в межзвездном газе обнаружен по наблюдениям линии $\lambda 6708 \text{ \AA}$ в спектрах некоторых горячих звезд, и в частности 55 Лебеда. Ванден Боут и Грансмит (1974) определили поверхностную плотность лития в направлении на эту звезду – $1.7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Сравнивая содержание лития с содержанием железа и кальция, авторы делают вывод, что в направлении на 55 Cyg и особенно на ξ Ori тяжелые элементы менее обильны, чем в окрестностях Солнца. Альтернативное предположение о нормальном содержании Fe и Ca и повышенном изобилии Li с нашей точки зрения также правомерно. Пока проведенных наблюдений недостаточно, чтобы сделать однозначный вывод.

Бериллий, правда в малом количестве, также обнаружен в межзвездной среде прямыми наблюдениями (Бойсгард, 1974).

И в том и в другом случае содержание лития и бериллия может относиться к области околос звездного пространства и отражать химсостав горячих звезд, в спектрах которых и исследуют межзвездные линии. А вероятность звездного происхождения пыли довольно существенна (Кардополов, 1972).

Есть два существенных обстоятельства, которые затрудняют оценку содержания легких элементов в межзвездной среде.

Первое из них заключено в том, что элементы тяжелее гелия могут входить в состав межзвездных пылинок, причем оценить вклад каждого элемента в аккрецию на пыли пока невозможно (Филд, 1974).

Второе связано с трудностью сравнения содержания элементов в межзвездных облаках по отношению к водороду. Значительная доля водорода заключена в молекулах H_2 и других молекулах, которые в изобилии найдены в областях звездообразования. Как правило, для отдельно взятой области пространства не удается провести количественный химический анализ: спектральные линии различных химических соединений и молекул проявляют себя при различных физических условиях.

В настоящее время можно констатировать, что по крайней мере убедительных наблюдательных фактов, противоречащих гипотезе первичного повышенного содержания легких элементов в протозвездных облаках, нет.

Вклад космических лучей. В космических лучах группа "L" – литий бериллий и бор по изобилию не уступает C, N; O. На рис. 3 показан

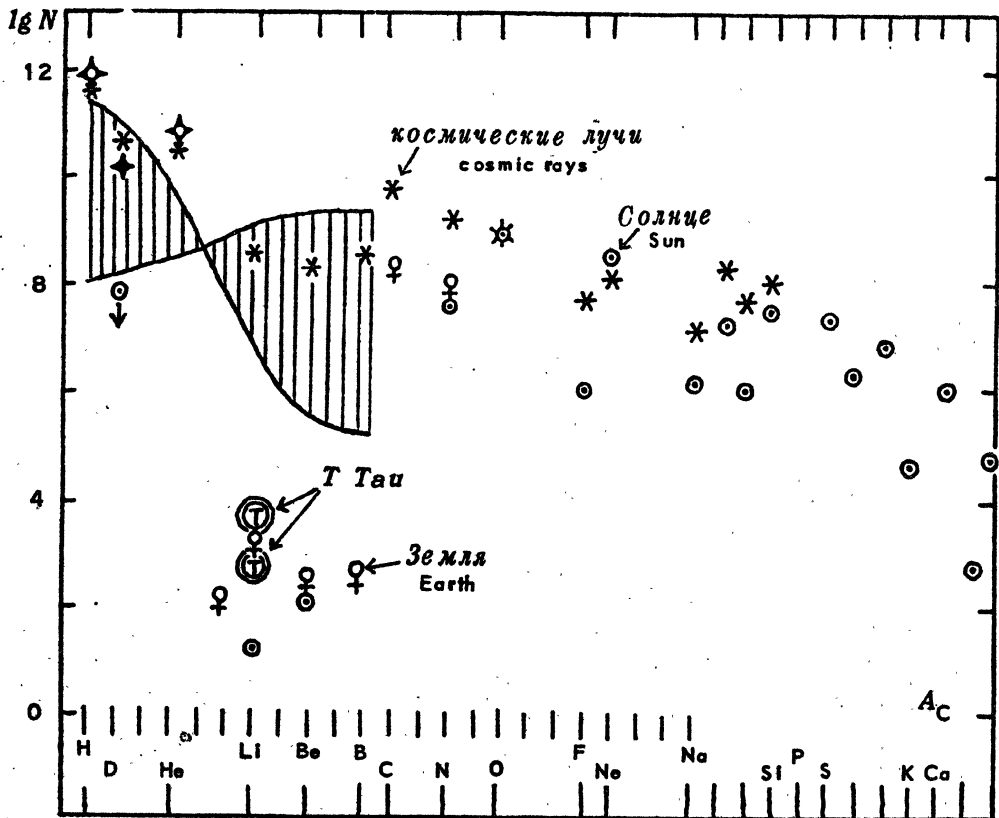


Рис. 3. Распространенность химических элементов в различных космических объектах. Если кривая изобилия элементов в сжимающейся протозвезде попадет в заштрихованную область, эволюция до ГП завершается термоядерными взрывами.

химический состав космических лучей по Аллеру (1963). До сих пор не существует достаточно определенного мнения о происхождении космических лучей. Предположение, что космические лучи могут отражать первичный состав протозвездных облаков сейчас также выглядит неубедительно.

Одна из распространенных теорий предполагает происхождение космических лучей при вспышках сверхновых (Шкловский, 1966). Вероятно состав космических лучей отражает ядерные реакции при вспышке и последующие реакции высокоэнергетичных продуктов взрыва с межзвездной средой.

Мы уже рассмотрели вероятность вспышки сверхновой в областях звездообразования. Полагая, что космические лучи — конечный продукт вспышки сверхновой II типа, попробуем оценить вклад взрывов сверхновых в состав облака Ориона (M 42).

Южная часть этого облака по данным автора (Шевченко, 1975) содержит массу $5 \cdot 10^4 M_{\odot}$. Полагая, что массы взорвавшихся звезд около $150 M_{\odot}$ (Шкловский, 1966) и большая часть массы взорвавшейся звезды остается в облаке, поскольку плотность его достигает $\rho > 10^7 \cdot N \text{ см}^{-3}$, при начальном составе, близком к солнечному, после взрыва логарифм числа атомов Li , Be и B достигает 6.7, 6.4 и 6.6. Полагая, что количество дейтронов до взрыва $lg N_D = 8$, после взрыва $lg N_D = 10.3$. Возможно, это несколько завышенные оценки, но, с другой стороны, количество взрывов могло быть и более трех.

На рис. 3 показано содержание химических элементов на Солнце, в окрестностях Солнца, в звездах Т Тельца и в космических лучах.

Можно оценить *необходимый для взрыва* состав при сжатии прото-звезды. Для этого в моделях Ибена (1965) или Хаяши (1966) рассчитаем число реакций R в единице массы вещества в единицу времени между протонами или дейтронами i :

$$R = C \rho \frac{X_i}{A_i} \frac{X_j}{A_j} \tau^2 [\exp(-\tau) (A q_i q_j)]^{-1}, \quad (23)$$

где

$$\tau = 4.25 \cdot 10^3 (e^2 q_i^2 A / T)^{1/3}, \quad (24)$$

а

$$A = A_i A_j / (A_i + A_j). \quad (25)$$

X_i — доля массы вещества, заключенная в протонах или дейтронах, (14) — (18), X_j — в легких элементах A_i и A_j , а q_i, q_j — массы и заряды ядер, C — постоянная, зависящая от свойств реагирующих ядер.

Варьируя X_i и X_j так, чтобы получить избыток давления λ , соответствующий времени устойчивости $t = 10^5$ сек, получим грубые оценки содержания дейтерия и легких элементов в протозвезде, которая взрывается после коллапса при достижении в центре температуры 2–3 млн градусов за счет сжатия (заштрихованная область на рис. 3).

Данные расчетов очень приближенны из-за неопределенности коэффициентов и выбранных формул. Возможны ошибки на порядок, хотя мы стремились занижить результат. Для окончательных выводов необходимы более точные расчеты.

4. Некоторые "тонкие" эффекты и место термоядерной вспышки.

Если на пути эволюции до ГП звезды проходят стадию термоядерной вспышки или взрыва, некоторые "тонкие" эффекты, обычно не принимаемые во внимание теоретиками, могут приобрести важное значение.

Отклонения от сферической симметрии. Такие отклонения могут привести к нетривиальным процессам на заключительных этапах сжатия. В частности, фрагментация и образование нешироких пар может идти легче в сферически несимметричных конденсациях. Сам процесс сжатия начальных форм типа цилиндров или вытянутых эллипсоидов не приводит к условию сферической симметрии. Такая форма прото-звездных облаков следует из наблюдений (Шевченко, 1975; Слупкий, 1975). Объекты Клеймана-Лоу, Беклина-Нейгебауэра, Хербига-Аро и сверхплотные конденсации нельзя считать сферически симметричными.

Химическая стратификация не исключена на заключительном этапе адиабатического сжатия (коллапса). При некотором радиусе сжимающейся конденсации r_k и соответствующей ему плотности ρ_k , газовое давление соединений легких элементов будет препятствовать их свободному падению к центру, в то время как более тяжелые элементы могут продолжать коллапс. На следующем этапе давление станет существенным для другой группы молекул и т.д. При подходящей температуре через некоторое время звезда может стать полностью стратифицированной, как Земля или планеты. В модели с металлическим ядром, составляющим 10^{-4} – 10^{-5} от массы конденсации, процессы сжатия могут сущест-

венно отличаться от принятых в ТГС.

В дальнейшей эволюции, возникновении конвекции стратификация может нарушаться. Колесник (1972, 1974), анализируя начальный этап сжатия, приходит к выводу об образовании ядра, на периферии которого образуется градиент скорости и ударная волна. Эти процессы, по-видимому, также препятствуют стратификации, хотя пока не ясно, в какой степени.

Возможность и продолжительность фазы стратификации для термоядерных реакций с легкими элементами чрезвычайно существенна. У звезд самой большой массы выделение плотного и тяжелого ядра сводит механизм взрыва при ГС к механизму взрыва сверхновой (Шкловский, 1966).

У звезд меньшей массы взрыв может носить ограниченный характер, без катастрофических последствий, тогда явление фуора (Амбарцумян, 1971) можно было бы отнести к этому этапу эволюции.

Наконец, у звезд-карликов вряд ли достигается необходимая температура в период коллапса. Термоядерные реакции легких элементов могут иметь место в дальнейшей эволюции, как локальные явления. Уместно отметить, что у многих карликов наблюдается повышенное содержание лития и бериллия (Хербиг, 1965).

Попробуем оценить *время и место на диаграмме Герцшпрунга-Рессела* термоядерной вспышки.

В фазе непрозрачности (рис. 1, трек *ab*) скорость повышения температуры максимальна. Повышение плотности и температуры в центре звезды происходит до тех пор, пока продолжается диссоциация молекулярного, а затем ионизация атомарного водорода. Заключительный этап этой фазы (трек *bd*) многие сейчас называют явлением фуора.

Скорость повышения температуры в центре протозвезды может оказаться еще выше, если точнее учесть непрозрачность оболочки, а также энергию на диссоциацию молекул, наблюдаемых в районах звездообразования.

Среди них важную роль играют как молекулы, в состав которых входит водород — CH , OH , HCN , H_2O , H_2CO , CH_3 , $HNCO$, HC_3N и др., так и молекулы, состоящие из других распространенных элементов: CN , CO , CS , OCS и т.п.

Поскольку температура, при которой происходит диссоциация перечисленных молекул, значительно выше, чем для H_2 , фаза *ab* протозвезды на самом деле может быть более эффективной: предварительные оценки показывают, что участок *a-b* может продлиться до *a-b'*.

Заштрихованная область на диаграмме Герцшпрунга-Рессела, ограниченная с одной стороны двойной линией, а с другой — ГП, соответствует большой вероятности ядерных реакций с легкими элементами: температура в центре звезд в этой области более 1 млн. градусов.

Мы предполагаем, что если вместо эволюции *abc* имеет место трек *ab'c'* последний участок (*b'c'*) соответствует как раз термоядерной вспышке или явлению фуора. Не исключено, что в дальнейшем центральная зона протозвезды средней массы постепенно приходит в квазистационарное равновесие. В этот период в ядре в принципе может продолжаться нестационарный процесс включения реакций в отдельных частях высокотемпературной зоны, которая после взрыва может иметь значи-

тельные отклонения от симметрии. Процесс сопровождается значительными эруптивными выбросами в оболочку и окружающее пространство. Этот этап, к которому, как мы полагаем, *относится большинство звезд типа Т Тельца* может продолжаться длительное время до прихода центральной зоны (будущей звезды) в стационарное состояние сферически симметричного тела с балансом теплоотвода и энерговыделения.

5. Заключение.

В статье изложена гипотеза термоядерной вспышки сжимающейся протозвезды с достаточным содержанием дейтерия и других легких элементов.

На основании очень приблизительных оценок определен необходимый для взрыва химический состав (рис. 3), время и место процесса в начальной эволюции протозвезды (рис. 1). Мы привели также ряд аргументов в пользу гипотезы.

В заключение следует отметить направления, в которых желательно провести исследования.

А. Теория.

1) Определение возраста межзвездного газа, оценка вклада звезд и космических лучей в химический состав межзвездных облаков.

2) Исследование влияния отклонений от сферической симметрии на модели протозвезд.

3) Расчет возможности химической стратификации на стадии адиабатического сжатия.

4) Расчет сжатия на этапе непрозрачности с учетом диссоциации молекул, более точно отражающий состав облаков в областях звездообразования.

5) Расчет скорости энерговыделения при ядерных реакциях легких элементов в разных моделях и для звезд разных масс.

6) Расчет процесса взрыва в моделях разной массы в предположениях: а) наличия плотного ядра, б) различного химсостава, в) химической стратификации, г) отклонений от сферической симметрии.

7) Исследование процессов ионизации непрозрачных и оптически тонких оболочек продуктами реакций (5) – (18) – γ, p, n, α и т.д.

8) Расчет спектра вспышки.

Б. Наблюдения.

1) Уточнение химического и изотопного состава межзвездной среды в районах звездообразования и широкого класса объектов, предшествующих ГП: сверхплотных конденсаций, объектов Херbiga-Aro, фуоров, звезд типа Т Тельца.

2) Поиск фуоров и быстро протекающих процессов переменности у звезд типа Т Тельца и вспыхивающих звезд в туманностях. Количественный анализ спектров в эпоху быстрых процессов.

3) Поиск γ -излучения у фуоров, звезд типа Т Тельца и родственных объектов.

4) Поиск остатков взрыва звезд большой массы в областях звездообразования.

5) Исследование экстремально молодых двойных систем типа ВМ Ориона.

Автор заранее признателен всем, кто направит свои замечания или сообщит о наблюдательных фактах в альтернативу или в подтверждение изложенной гипотезы.

Литература:

- Аллер Л., 1963, "Распространенность химических элементов", М, ИИЛ.
 Амбарцумян В.А., 1971, *Астрофизика* 7, 557.
 Амбарцумян В.А., 1972, "Проблемы современной космогонии", М, Наука.
 Блау, 1961 – Blaauw A., *BAN* 15, 265.
 Бонзак, 1961 – Bonsack W.K., *ApJ* 133, 551.
 Бонзак и Гринштейн, 1960 – Bonsack W.K., Greenstein I.L., *ApJ* 131, 83.
 Бэбкок, 1958 – Babcock H.W., *ApJ Suppl. ser. 3*, 141.
 Ванден Боут, Грансмит, 1974 – Vanden Bout P.A., Grupsmith G., *ApJ* 187, No 1, L9.
 Гершберг Р.Е., 1963, *Изв. КРАО* 30, 90.
 Горбацкий В.Л., 1964, *ПЗ* 15, № 1, 27.
 Закиров М.М., 1973, *АЦ* № 757.
 Закиров М.М., 1975а, *ПЗ* в этом номере.
 Закиров М.М., 1975б, "Исследование экстремально молодых звездных комплексов", сб., "ФАН", Ташкент.
 Ибен, 1965 – Iben I., *ApJ* 141, 993.
 Кардополов В.И., 1972, "Молодые звездные комплексы", *Астроклимат*, сб., "ФАН", Ташкент.
 Колесник И.Г., 1973, *Астрометрия и астрофизика*, 18, "Наукова думка", Киев.
 Колесник И.Г., 1974, *Астрометрия и астрофизика*, 22, "Наукова думка", Киев.
 Колесник И.Г., 1975, *Астрометрия и астрофизика*, 25, "Наукова думка", Киев.
 Кухи, 1963 – Kuhl L.V., *PASP* 75, 416.
 Кухи, 1966 – Kuhl L.V., "Stellar Evolution" 373, New York.
 Ларсен, 1969 – Larson R.V., *MNRAS* 145, 3, 271.
 Мартынов Д.Я., 1948, *Докл. АН СССР* 60, 1149.
 Паренаго П.П., 1954, *Труды ГАИШ* 25.
 Слуцкий В.Е., 1975, "Исследование экстремально молодых звездных комплексов", сб., "ФАН", Ташкент.
 Спитцер и др., 1973 – Spitzer L., Drake J., Jenkins E.V., Morton D.C., Rogerson I.V., York D., *ApJ* 181, No 3, L116.
 Филд, 1974 – Field G.V., *ApJ* 187, No 3, 453.
 Франк-Каменецкий Д.А., 1963, *АЖ* 40, 235.
 Тейлер Р., 1973, "Строение и эволюция звезд", М., Мир.
 Хаяши, 1966 – Hayashi Ch., *Ann. Review of Astr. and Ap.* 4, 171.
 Хаяши, 1970 – Hayashi Ch., *Mem. Soc. Roy. Sci. Liège* 19, 127.
 Хербиг, 1962 – Herbig G.H., *Advances in Astr. and Ap.* 1, 47, New York.
 Хербиг, 1965 – Herbig G.H., *ApJ* 141, 588.
 Хунгер, 1963 – Hunger K., *Zs. f. Ap.* 56, 285.
 Шанин Г.И., Шевченко В.С., Шербаков А.Г., 1975 – Shanin G.I., Shevchenko V.S., Shcherbakov A.G., *Variable Stars and Stellar Evolution, Symp. No 67, Moscow, Copyright by the IAU.*

- Шевченко В.С., 1967а, "Нестационарные звезды в Т-ассоциациях", сб. "ФАН", Ташкент.
- Шевченко В.С., 1967б, ПЗ 16, 121.
- Шевченко В.С. 1975, "Исследование экстремально молодых звездных комплексов", сб., "ФАН", Ташкент.
- Шкловский И.С., 1966, "Сверхновые звезды", М., Наука.
- Шнайдер и Бакал, 1973 — Snyder L.E., Buhl D., ApJ 185, No 2, L79.

Астрономический институт
АН Узбекской ССР,
Ташкент.

*Поступила в редакцию
8 августа 1975 г.*