

ПЕРЕМЕННЫЕ ЗВЕЗДЫ

Том 15

№ 1 (115)

1964

Основные астрофизические характеристики эруптивных звезд

А. А. Боярчук

Дан краткий обзор наблюдений блеска, цвета и спектров звезд типов T Tau, SS Cyg, U Gem, Z And. Рассмотрен вопрос об источнике возбуждения эмиссионных линий.

The Principal Astrophysical Characteristics of Eruptional Stars

by A. A. Boyarchuk

The review of brightness, colour and spectral observations of T Tau, SS Cyg, U Gem and Z And type stars is given.

The problem of exiting source of emission lines is considered.

Эруптивные звезды составляют одну из самых интересных групп звезд. На этих звездах происходят такие грандиозные явления, что буквально в течение нескольких минут основные характеристики звезд меняются существенным образом. Природа этих явлений все еще остается, в значительной мере, загадочной. Даже такая важная проблема, как проблема возбуждения эмиссионных линий в спектре этих объектов, еще не нашла своего окончательного решения. Высказывались лишь предположения о наличии горячего спутника у этих звезд [1], о возможном существовании некоторого источника нетеплового излучения новой природы [2] или очень плотной короны больших размеров, которая нагревается ударными волнами [3] и другие.

Излучение эруптивных звезд очень важно также и для понимания эволюции звезд, поскольку существует указание, что эти звезды представляют весьма важные этапы звездной эволюции [4, 5].

Рассматриваемые здесь типы звезд (T Tau, U Gem, UV Cet и симбиотические) имеют много общих черт (поздний спектральный класс, присутствие линий излучения, наличие вспышек и др.), которые у различных звезд выражены по разному. Поэтому мы сперва рассмотрим каждую группу звезд отдельно, а затем остановимся на общих проблемах.

Звезды типа T Tau

Среди неправильных переменных звезд типа RW Aur существует довольно большая группа так называемых звезд типа T Tau, которые имеют спектральный тип F8 и позже. Эти звезды выделяются среди

других звезд типа RW Aur по чисто спектроскопическим признакам. Хербиг [5] предложил такие критерии для определения звезд типа T Tau:

В спектрах звезд типа T Tau должны наблюдаться:

1. Водородные линии и линии H и K Ca II в эмиссии;
2. Флюоресцентные линии Fe I λ 4063 и 4132 (они наблюдаются только у звезд типа T Tau);
3. Линии [SII], [OI], но не всегда;
4. Сильная линия поглощения Li I.

Хербиг [5] считает, что граница T Tau звезд в районе F8 является реальной, а в ранних M — результатом селекции наблюдений.

Эмиссионные линии. Наиболее полное исследование спектров звезд типа T Tau было выполнено Джоем [6]. Он нашел, что в спектрах этих звезд присутствуют сильные линии водорода, которые можно проследить до H₁₁. Их декремент заметно более пологий чем у планетарных туманностей. Последний факт подтвердил позже Бём [7]. В спектре часто наблюдаются в эмиссии триплетные линии He I 5875, 4471, 4026, имеющие умеренную интенсивность. Линия He II 4686 встречается очень редко [6]. Кроме того наблюдаются многочисленные сравнительно слабые линии нейтральных и ионизованных металлов (Na I, Mg I, Al I, Si I, Sc I, Sc II, Ti II, Cr I, Cr II, Mn I, Fe I, Fe II, Ni I, Sr II). Линии Fe I 4063 и 4132 аномально сильны. Хербиг [8] предположил, что здесь имеет место флюоресцентный механизм. Длина волны линии λ 3969 этого же мультиплета совпадает с длиной волны бленды 3968 Ca II и 3970 H ϵ . Таким образом монохроматическое излучение двух последних линий может возбуждать в атоме Fe I уровень, с которого происходят эмиссионные линии λ 4063, 4132. Кроме разрешенных линий наблюдаются также и запрещенные линии [O I], [S II], [Fe II] [6, 9]. В спектрах некоторых звезд были найдены линии [O II] [7]. Однако пока не ясно, в какой мере эти линии относятся к самим T Tau — звездам, а в какой к окружающей туманности. Все наблюдаемые эмиссионные линии сравнительно узки ($\Delta\lambda \sim 1 \text{ \AA} \sim 200 \text{ км/сек}$) [9].

Водородные линии часто имеют центральное обращение [6], которое делит эмиссионную линию на два компонента. Относительная интенсивность этих компонентов меняется неправильным образом. Характер изменений еще плохо изучен. Общая интенсивность эмиссионных линий также переменна, но здесь удалось обнаружить некоторую корреляцию с изменением блеска звезды: эмиссионные линии усиливаются с увеличением блеска звезды [6]. На рис. 1 приведены в качестве примера спектрограммы двух звезд типа T Tau: RU Lup и UZ Tau.

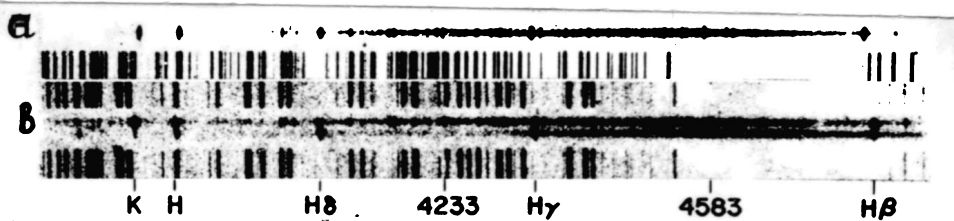


Рис. 1

Спектр поглощения из-за его слабости удалось наблюдать не у всех звезд. Там, где удавалось определить его тип он оказался в среднем G.

Недавно Хангер [10] сравнил регистрограммы спектров с большой дисперсией (10 Å/мм) звезд Т Тау, α Cet (G5V) и τ Cet (G8Ve). Оказалось, что Т Тау по своему спектральному классу занимает промежуточное положение между α Cet и τ Cet, то есть имеет спектральный класс несколько более поздний, чем класс G 5Ve, предлагаемый ранее. Кроме того, Хангер обнаружил ряд узких линий, аналогичных линиям в спектрах звезд сравнения α Cet и τ Cet. Это означает, что скорость вращения звезды Т Тау не превышает скорость вращения звезд сравнения, то есть $V \sin i < 15$ км/сек. Аналогичное положение имеем для RY Тау и UX Тау. По-видимому, прежние определения высокой скорости вращения звезд Т Тау [5], следует считать ошибочными. Недавно Уокер [11] нашел очень интересную особенность спектров звезд типа Т Тау с большим ультрафиолетовым избытком. Оказалось, что почти половина звезд этой группы имеет в спектрах абсорбционные компоненты водородных линий и линий Ca II, смещенные на 300-150 км/сек в красную сторону по отношению к другим линиям. Уокер считает, что это явление может служить доказательством выпадения вещества на звезду.

Бонсак и Гринстейн [12], [13] обнаружили, что содержание лития в атмосферах звезд типа Т Тау в среднем на два порядка выше, чем в солнечной атмосфере, и близко к межзвездному содержанию. Этот факт в настоящее время рассматривается как одно из доказательств молодости звезд типа Т Тау [5].

Турбулентные скорости в атмосферах Т Тау — звезд порядка 3-5 км/сек, что выше, чем солнечное значение [12].

Более детальных исследований абсорбционного спектра звезд типа Т Тау не было выполнено и это является одной из основных проблем, требующих быстрее разрешения.

Изменение блеска и цвета. Практически все звезды типа Т Тау изменяют свой блеск. Характер изменения блеска весьма сложен и недостаточно изучен. В настоящее время можно лишь говорить об общих особенностях. Амплитуда изменения различна у разных звезд и не постоянна у одной и той же звезды. Иногда она превышает две величины. По-видимому, нет существенных изменений блеска в течение одной ночи. Было найдено, что при изменении блеска существенно меняется цвет звезды. Бадалян [14] показал, что при изменении блеска этих звезд в фотовизуальных лучах на 0^m.4, блеск звезд в фотографических лучах менялся в три раза больше. Звезда становится краснее при уменьшении блеска. Хербиг [5] нашел, что цветовая температура также падает с уменьшением блеска. Фотозлектрические наблюдения RW Aug, выполненные в системе U, B, V, показали, что B-V растет с уменьшением блеска звезды, а U-B меняется довольно сложным образом [14, 15]. Чтобы разобраться в этих вопросах необходимы всесторонние одновременные наблюдения изменения блеска, цвета и спектров этих звезд.

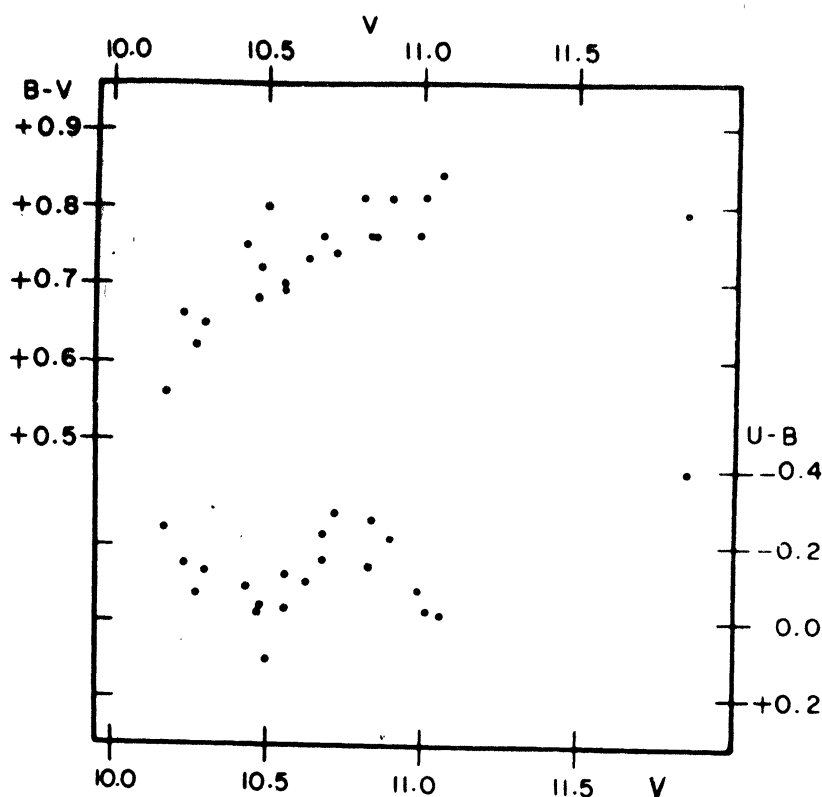


Рис. 2

Звезды типа U Gem

Звезды этого типа характеризуются часто повторяющимися вспышками на 2-4 величины, среднее время между которыми у отдельных звезд различно и колеблется от 10 до 150 дней. Продолжительность вспышек около одной недели.

По-видимому можно считать, что в нормальном состоянии эти звезды находятся между вспышками. Для нескольких звезд Джой [16] нашел спектр поглощения, соответствующий классам dG5-dK0. Однако для большинства звезд спектр поглощения пока не удалось классифицировать из-за его слабости. Кроме линий поглощения в спектрах звезд этого типа наблюдаются эмиссионные линии водорода, ионизованного кальция и у некоторых звезд линии He I и He II. На рис. 3 представлены спектрограммы нескольких звезд типа U Gem. Все наблюдаемые эмиссионные линии довольно широки ($\Delta\lambda \sim 20 \text{ \AA}$). Наблюдается также непрерывная эмиссия водорода и эмиссионный бальмеровский скачок. Типичный представитель этой группы звезд SS Cyg непрерывно меняет свой блеск между вспышками [17]. Причем амплитуда изменения блеска заметно больше в ультрафиолете, чем в визуальной области. Эти флуктуации можно рассматривать как результат статистического переналожения большого числа вспышек малой амплитуды, характеризующихся быстрым подъемом блеска и плавным спуском. Следует отме-

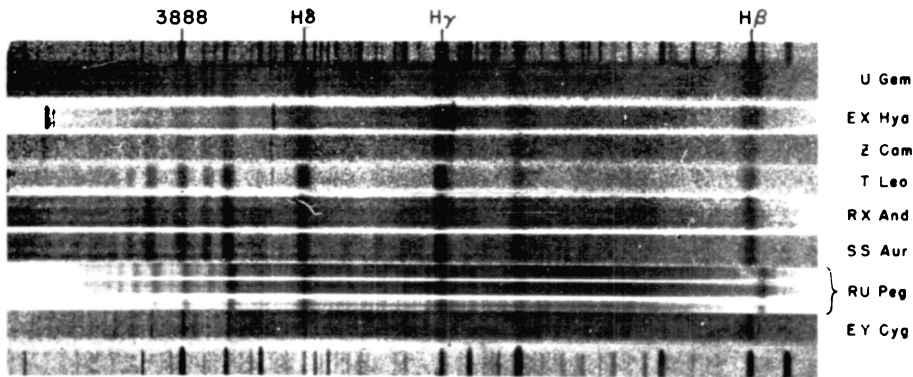


Рис. 3

тить, однако, что не все звезды показывают большую активность между вспышками. Существуют отдельные звезды, блеск которых мало меняется между вспышками [18].

Во время вспышек цвет и спектр звезд меняется существенным образом. Так, например, в случае SS Cyg [17]. Величина $B-V$ обычно уменьшается приблизительно от $+0^m.5$ до нуля. Величина $U-B$ остается практически неизменной во время всей вспышки, кроме момента подъема блеска, когда $U-B$ немного возрастает (рис. 4). Обычно вспышки продолжаются около недели. Однако отдельные вспышки длятся почти вдвое больше. Есть указания, что вспышки с большей интенсивностью являются двойными вспышками [17].

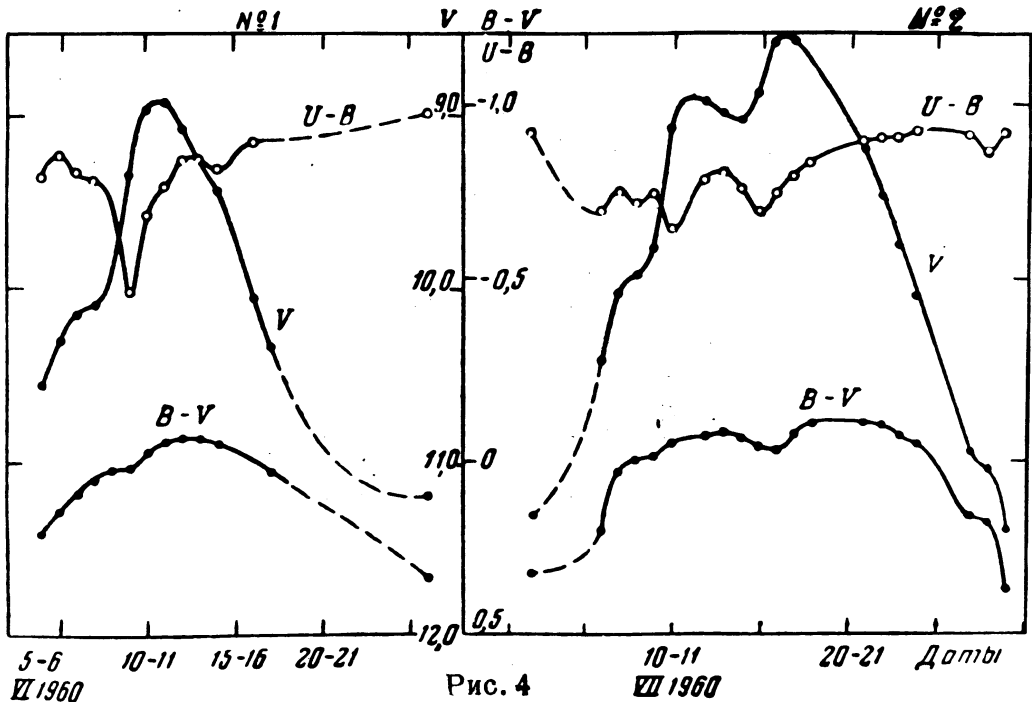


Рис. 4

Изменение спектра во время вспышек звезд типа U Gem изучено очень слабо и в настоящее время известна лишь общая качественная картина. Спектр звезд меняется существенным образом. При возрастании яркости звезд характеристики спектра типа G ослабевают и исчезают полностью еще до максимума блеска. Эмиссионные линии как правило слабеют и часто они вообще пропадают. У многих звезд эмиссионные линии водорода и гелия даже переходят в линии поглощения и их спектры напоминают спектры звезд типа В - А. По мере ослабления блеска спектр изменяется примерно в обратном порядке.

В 1954 г. Джой [19] обнаружил, что AE Aqr является спектроскопической двойной звездой. Затем, работа по изучению двойственности звезд типа U Gem была продолжена Крафтом [20]. В настоящее время уже известно 8 спектроскопически двойных систем (SS Cyg, U Gem, RX And, RU Peg, SS Aur, EY Cyg, Z Cam, AE Aqr) и не обнаружено еще ни одной единичной, среди тех звезд, которые изучались на двойственность. Недавно Мамфорд [18] обнаружил, что U Gem и Z Cam являются затменными двойными с периодом, равным периоду, определенному Крафту [20]. Все это дает основание полагать, что все звезды типа U Gem спектроскопические двойные. Их средние характеристики таковы: период ~ 6 часов, абсолютная величина $+9^m$, масса системы $\sim 2M_{\odot}$, отношение масс компонент 1:1. Гринстейн [21] отметил, что оба компонента (звезда типа G5 и ее горячий спутник) лежат существенно ниже главной последовательности и, по-видимому, находятся в конце звездной эволюции.

Звезды типа UV Cet

Наиболее примечательной чертой этих звезд являются внезапные, очень кратковременные вспышки на 1^m - 2^m . Во время вспышек подъем блеска до максимума занимает всего лишь несколько десятков секунд, а спад продолжается порядка получаса [22]. На рис. 5 представлена вспышка звезды EV Lac. Между вспышками у одних звезд блеск обычно постоянен (EV Lac [22]), в то время как у других звезд он значительно меняется (UV Cet [23]). Во время возрастания блеска, звезда

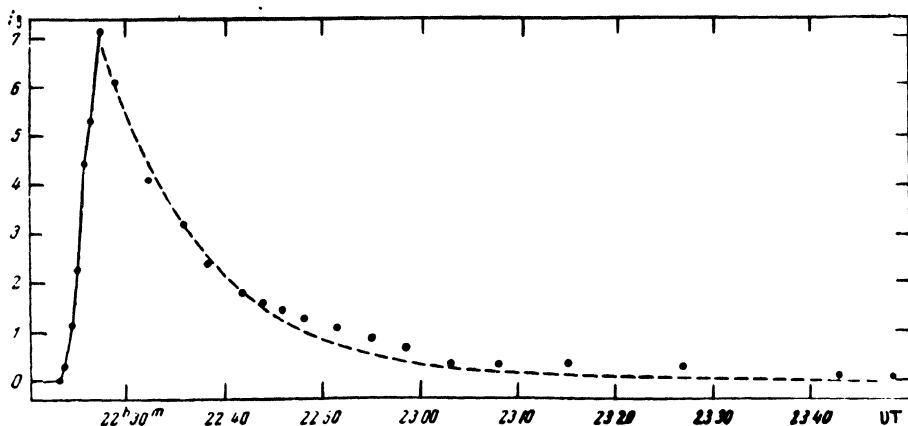


Рис. 5

становится более голубой. Особенно сильно возрастает излучение в ультрафиолетовой области.

В нормальном состоянии между вспышками спектр звезд представляет собой спектр поглощения типа dM3, на который накладываются довольно сильные узкие линии излучения водорода и ионизованного кальция, а иногда, слабые линии нейтрального гелия. Во время вспышек эмиссионные линии водорода становятся сильнее и шире. Появляются слабые эмиссионные линии ионизованного гелия. Спектр поглощения типа M "заливается" непрерывной эмиссией и практически исчезает в синей и фиолетовой областях спектра [23]. На рис. 6 показаны

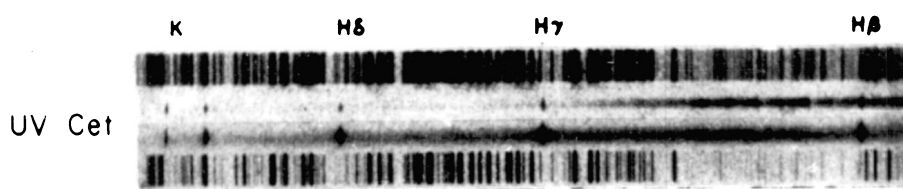


Рис. 6

спектры UV Ceti в разных фазах. Следует отметить, что из-за кратковременности вспышек наблюдаемые спектры экспонировались в течение всей вспышки и часто даже некоторое время вне ее.

Среди других особенностей звезд типа UV Ceti нужно отметить большой процент двойных (спектральных и визуальных).

Симбиотические звезды.

Эти звезды часто называют звездами типа Z And, так как Z And является наиболее типичным и наиболее изученным представителем этой группы звезд.

Главной отличительной чертой этих звезд является большая несогласованность спектра поглощения с эмиссионными линиями. В среднем эти звезды имеют спектральный тип gM3. В их спектрах видны полосы TiO, линия CaI 4227 и одновременно наблюдаются характеристики высоковозбужденной туманности: запрещенные линии [Fe VII], [Ne V] ($\chi_{\text{ион}} \sim 100$ э.в.), линии He II, O IV, с сильным рекомбинационным континуум, почти полностью "заливающий" спектр поглощения в ультрафиолетовой области. Кроме этого наблюдаются эмиссионные линии низкого возбуждения Fe II, [Fe II], Ca II, [24] [25]. Эмиссионные линии довольно узкие, $\Delta\lambda \sim 1 \text{ \AA}$.

Блеск звезд непостоянен. Кривая блеска показывает отдельные вспышки. Например, у Z And вспышки на $2^m - 3^m$ происходят примерно через 12 лет (см. рис. 7). В промежутке между большими вспышками наблюдается серия мелких $\Delta m \sim 1^m$. Быстрых изменений блеска (в течение одной ночи) не было обнаружено [26].

Во время вспышки спектр звезды претерпевает радикальные изменения. Во время максимума блеска полностью исчезают характери-

ки спектра поглощения gM3 и эмиссионные линии высокого возбуждения [Fe VII], [Ne V] и другие. Практически отсутствует балмеровский скачок. Водородные линии имеют контур типа P Cug: сильная эмиссионная линия с абсорбционным компонентом с фиолетовой стороны.

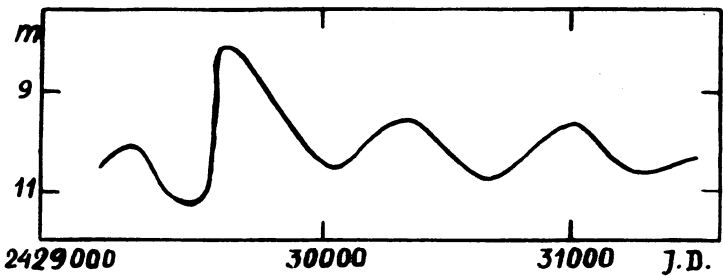


Рис. 7

Лучевая скорость этих линий поглощения указывает на расширение оболочки со скоростью порядка 80 км/сек.

При уменьшении блеска происходит постепенное усиление эмиссионных линий, появляются линии высокого возбуждения и признаки спектра поглощения позднего спектрального типа (полосы T10). На рис. 8 представлены спектрограммы Z And в различные фазы изменения блеска.



Рис. 8

Лучевая скорость, определенная по эмиссионным линиям вне больших вспышек, меняется в пределах 20 км/сек с периодом в 690^d [27]. Однако разброс точек довольно велик, чтобы считать это убедительным доказательством двойственности этих звезд. Кроме того пульсации звезд могут дать такую же картину переменности лучевых скоростей.

Подводя итог краткого обзора основных рассматриваемых астрофизических характеристик звезд, можно отметить их общие черты.

1. Все звезды сочетают в своих спектрах (в области 3300-7000 Å) противоречивые черты: низкотемпературный спектр поглощения и линии эмиссии высокого возбуждения. Особенно сильно выражено это противоречие у симбиотических звезд.

2. Все звезды временами вспыхивают в той или иной мере. У звезд типа UV Cet вспышки наиболее ярко выражены.

3. Все звезды меняют блеск между вспышками. Но особенно сильны такие изменения у звезд типа U Gem.

Наличие общих черт у рассматриваемых звезд позволяет поставить общие для них проблемы. В первую очередь следует отметить проблему возбуждения эмиссионных линий. Совершенно ясно, что низкотемпературное излучение звезды не может возбудить эмиссионные линии даже с самым низким потенциалом возбуждения. Необходим источник излучения (или частиц) высоких энергий. Здесь в первую очередь необходимо знать условия в районе возникновения эмиссионных линий, т.е. электронную плотность, электронную температуру, коэффициент дилуции и т.д. Но, к сожалению, в настоящее время мы располагаем сравнительно полными сведениями лишь для симбиотических звезд.

По времени изменения интенсивности линий [25], и по отношениям интенсивностей линий [O III] [28] было найдено, что в районе возникновения эмиссионных линий $n_e \geq 10^7 \text{ см}^{-3}$. По величине бальмеровского скачка найдено, что в этом районе электронная температура $\sim 2-3 \cdot 10^4 \text{ }^\circ\text{K}$ [29].

Для других типов звезд мы не располагаем подобными данными. Можно лишь на основании косвенных данных (присутствие линий Ca II, Fe II и [Fe II]) считать, что электронная плотность в звездах T Tau, UV Cet и U Gem значительно выше, чем у симбиотических; приблизительно такая, как у звезд Be, т.е. порядка $10^9 - 10^{11} \text{ см}^{-3}$.

Электронная температура еще не определялась для подобных объектов.

Отсутствие сведений о физических условиях для указанных звезд очень затрудняет их интерпретацию, и здесь дело, по существу, не продвинулось дальше высказывания всевозможных гипотез. Перечислим основные из них.

1. Наиболее простая и понятная гипотеза была высказана впервые по-видимому, Берманом [1]. Он предположил, что указанные звезды представляют собой тесные двойные системы, состоящие из звезды позднего спектрального класса и очень горячего глубокого карлика. Яркость горячего карлика в наблюдаемой области спектра мала в сравнении с яркостью позднего компонента. Но в далекой ультрафиолетовой области интенсивность излучения карлика достаточно велика для возбуждения эмиссионных линий.

Эту гипотезу легко проверить, если получить спектры звезд в спектральной области 1000 Å. Однако мы не располагаем пока еще такой возможностью и вынуждены довольствоваться другими аргументами.

После того, как Джой [19] и Крафт [20] нашли, что из 6-ти исследуемых звезд типа U Gem, все шесть оказались спектрально-двойными с периодом $0^d.6 - 0^d.8$, не осталось сомнения в том, что все звезды этого типа являются двойными. Кроме того было установлено, что в спектрах этих звезд существуют две системы линий: линии поглощения позднего класса и линии излучения типа звезд Ве, которые показывают противоположные смещения. Отсюда можно заключить, что действительно один из компонентов является холодной звездой, другой горячей.

Из 20 звезд типа UV Cet 15 являются двойными (спектроскопическими или визуальными). Однако не всегда известно, имеет ли один из компонентов очень ранний спектральный класс и можно ли его рассматривать в качестве источника возбуждающей радиации.

В случае симбиотических звезд нет совершенно уверенных доказательств двойственности. По крайней мере шесть звезд (Z And, BF Cyg, CI Cyg, RW Hya, AG Peg, AX Per) показывают периодические изменения ($400^d - 800^d$) лучевой скорости, определенной по линии излучения. Скорость по линиям поглощения определяется неточно и не были обнаружены ее периодические изменения, превышающие ошибки измерения. С другой стороны, повторная новая T CrB и долгопериодическая переменная R Aqr, имеющие подобные симбиотические спектры являются двойными системами. Кроме того многие спектральные особенности довольно легко объясняются при предположении, что симбиотическая звезда представляет двойную систему, состоящую из красного гиганта и голубого карлика и окруженную газовой оболочкой типа планетарной туманности. Можно считать, что гипотеза двойственности лучше других объясняет свойства симбиотических звезд. Но до окончательного выяснения здесь еще далеко. Среди имеющихся наблюдений звезд типа T Tau нет указаний на то, что эти звезды являются двойными и мы можем рассматривать их как одиночные. Однако, поскольку не были произведены специальные поиски признаков двойственности этих звезд, то это заключение не следует рассматривать как окончательное.

Близкой по характеру к предыдущей является гипотеза о существовании горячего пятна (подобно вспышке на Солнце) на поверхности холодной звезды. Излучение этого горячего пятна и возбуждает в протяженной оболочке, окружающей звезду, эмиссионные линии. Такое объяснение можно предложить для звезд типа T Tau, т.е. тех звезд, для которых гипотеза о двойственности встречает наибольшие трудности. К сожалению, гипотеза о горячем пятне не разрабатывалась детально и мы не будем здесь рассматривать ее подробно. Следует заметить, что существование горячего пятна на поверхности звезды в течение долгого времени без существенного изменения окружающей атмосферы может вызвать большие сомнения.

Для объяснения характера спектра симбиотических звезд Гози [3] выдвинул предположение, что эти звезды представляют собой холодные гиганты, окруженные очень плотной короной, в которой действует тот же механизм возбуждения, что и в солнечной короне.

В. А. Амбарцумян [2] предположил, что у этих звезд во время вспышек происходит выделение нового, еще неизвестного нам вида внутризвездной энергии. Эта энергия способна возбудить наблюдаемые эмиссионные линии и создать непрерывную эмиссию. Высказывались и другие предположения для объяснения особенностей спектров эруптивных звезд, в частности предположение об аккреции вещества, но они плохо согласовались с наблюдениями и мы не будем останавливаться на них.

Как можно заключить из предыдущего, многие гипотезы не разработаны детально и одна из причин здесь заключается в отсутствии необходимых данных. Особенно важны здесь спектральные и колориметрические наблюдения. Из этих наблюдений можно судить о величине электронной температуры и электронной плотности в оболочке звезды, о характере изменения интенсивности источника возбуждения и др.

Другой весьма важной проблемой является установление места рассматриваемых звезд в эволюции. Сейчас, по-видимому, установлено, что звезды типа T Tauri являются сравнительно молодыми [4], [5]. С другой стороны звезды типа U Gem, по-видимому, находятся в конце эволюционного пути [21]. Относительно звезд типа UV Cet и симбиотических не ясно. Правда, отсутствие сильной линии Li I в спектре симбиотической звезды AG Dra, позволяет предположить, что эта звезда не является молодой.

Вероятно, многие из этих звезд являются двойными, как об этом говорилось раньше. И это обстоятельство накладывает сильный отпечаток на их эволюцию. Возможно именно этому мы обязаны тем, что наблюдаем на определенных этапах также интересные и довольно загадочные явления.

Литература

1. L. Berman, PASP **44**, 318, 1932.
2. В. А. Амбарцумян, Сообщ. Бюраканской Обс. XIII, 1954.
3. J. Gauzit, Annd'Ap. **18**, 354, 1955.
4. П. И. Холопов. Труды IV косм. совещания, стр. 375, Москва, 1955.
5. G. H. Herbig, Advances in Astronomy and Astroph. Vol 1, 56, 1962.
6. A. Joy, ApJ **102**, 187, 1945.
7. K. H. Bohm, ZfAp **43**, 4, 1957.
8. G. H. Herbig, PASP **57**, 166, 1945.
9. R. F. Sanford, PASP **59**, 134, 1947.
10. K. Hunger, ZfAp **56**, 285, 1963.
11. M. Walker, AJ **68**, 291, 1963.
12. W. K. Bonsack, J. L. Greenstein, ApJ **131**, 83, 1960.
13. W. K. Bonsack, ApJ **133**, 340, 1961.
14. Г. С. Бадалян, Сб. "Нестационарные звезды" Ереван, 1957, стр. 53.
15. F. Lenoüvel, Observateurs **40**, 37, 1957.
16. A. N. Joy. "Stellar Atmospheres", Ed. by J. L. Greenstein, Pp. 671, Chicago, 1960.
17. К. К. Чуваев, Изв. КрАО, XXVIII, 141, 1962.
18. G. S. Mumford. AJ **68**, 286, 1963.
19. A. N. Joy, ApJ **120**, 577, 1954.

20. R. P. Kraft, ApJ 135, 408, 1962.
21. J. L. Greenstein, "Stellar Atmospheres". p. 684, Chicago, 1960.
22. П. Ф. Чугайнов, Изв. КрАО XXVIII, 150, 1962.
23. A. H. Joy, M. L. Humason, PASP 61, 133, 1949.
24. P. Swings, O. Struve, ApJ 96, № 1, 1942.
25. L. H. Aller, Publ. Dom. Ap. Obs, Victoria, IX, No. II, 1954.
26. Т. С. Белякина, (частное сообщение).
27. P. Mervill, ApJ 99, 15, 1944.
28. А. А. Боярчук, ApJ (в печати).
29. Т. С. Белякина, А. А. Боярчук, Р. Е. Гершберг. Изв. КрАО, XXX, (в печати).

КрАО АН СССР,
ноябрь 1963 г.