

УДК 524.335

П. П. ПетровНаучно-исследовательский институт «Крымская астрофизическая обсерватория»
98409 АР Крым, п. Научный**Спектральные исследования звезд типа Т Тельца**

Кратко изложены основные представления о природе молодых звезд типа Т Тельца (TTS) и приведены примеры спектральных исследований этих звезд. Фотометрическая и спектральная переменность TTS обусловлена околозвездной экстинкцией, магнитной активностью и аккрецией вещества околозвездного диска на поверхность звезды. В 1990-х годах с помощью эшелювого спектрографа SOFIN на телескопе NOT были получены серии спектров высокого разрешения нескольких TTS. В частности, у звезды RW Aur A была обнаружена вращательная модуляция эмиссионных линий с периодом 2.7 сут, что было интерпретировано в рамках модели магнитосферной аккреции с наклоном оси магнитного диполя к оси вращения звезды. Спектры TTS, полученные на спектрографе UVES на телескопе VLT, показали, что эффект вуалирования фотосферного спектра, обычно связываемый с аккрецией, в значительной степени обусловлен хромосферной эмиссией. Предполагается, что аккреция является дополнительным источником нагрева хромосфер TTS.

СПЕКТРАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗІРОК ТИПУ Т ТІЛЬЦЯ, Петров П. П. — Коротко викладено основні уявлення про природу молодих зірок типу Т Тельця (TTS) і приведено приклади спектральних досліджень цих зірок. Фотометрична і спектральна змінність TTS обумовлена навколосоряною екстинкцією, магнітною активністю і акрецією речовини навколосоряного диска на поверхню зірки. У 1990-х роках за допомогою ешелювого спектрографа SOFIN на телескопі NOT було отримано серії спектрів високого розділення декількох TTS. Зокрема, у зірки RW Aur A виявлено обертальну модуляцію емісійних ліній з періодом 2.7 доби, що було інтерпретовано у рамках моделі магнітосферної акреції з нахилом магнітної осі диполя до осі обертання зірки. Спектри TTS, отримані на спектрографі UVES на телескопі VLT, показали, що ефект вуалювання фотосферного спектра, який звичайно пов'язують з акрецією, у значній мірі обумовлюється хромосферною емісією. Зроблено припущення, що акреція є додатковим джерелом нагрівання хромосфер TTS.

SPECTRAL INVESTIGATIONS OF T TAURI STARS, Petrov P. P. — The basic ideas on the nature of young T Tauri stars (TTS) are briefly outlined and some examples of spectral investigations of the stars are considered. Photometric and spectral variability of TTS is caused by circumstellar extinction, magnetic activity, and accretion of matter from the circumstellar disc onto the stellar surface. In 1990s, series of high resolution spectra of several TTS were obtained with the SOFIN echelle spectrograph installed at the Nordic Optical Telescope. In particular, rotational modulation of emission lines with a period of about 2.7 days was revealed in spectra of RW Aur A. This was interpreted in terms of magnetospheric accretion model with inclined magnetic rotator. Spectra of TTS obtained with the UVES spectrograph at VLT revealed that the effect of veiling, usually attributed to accretion, is caused largely by chromospheric emissions. It is suggested that the accretion is an additional source of heating in chromospheres of TTS.

ВВЕДЕНИЕ

Эмиссионные линии, наблюдаемые в спектрах звезд, образуются либо в хромосферах звезд, либо в более протяженных образованиях — звездном ветре, коронах, расширяющихся оболочках, коллимированных джетах и т. п. Анализ эмиссионных спектров позволяет определить не только химический состав и физические условия в излучающей среде, но также и динамику этой среды, что важно для изучения определенных фаз в жизни звезды.

Звезды типа Т Тельца известны как неправильные переменные поздних спектральных типов (G, K, M) связанные с молекулярными облаками Млечного пути. В начале 1940-х гг. Альфред Джой, работавший в обсерватории Маунт Вильсон, впервые исследовал спектры этих неправильных переменных и обнаружил характерный эмиссионный линейчатый спектр низкого возбуждения, похожий на спектр солнечной хромосферы. Эти звезды были выделены Джоем как новый класс астрофизических объектов — звезды типа Т Тельца. Спектральные исследования звезд типа Т Тельца были продолжены Джорджем Хербигом в Ликской обсерватории; именно он внес фундаментальный вклад в изучение природы этих объектов. Звезды типа Т Тельца входят в состав О- и Т-ассоциаций, открытых В. А. Амбарцумяном, их возраст составляет 1—10 млн лет. Сейчас известно около 60 группировок молодых звезд на расстояниях менее 2 кпк от Солнца. Наиболее хорошо изучена одна из ближайших группировок в Тельце-Возничем, на расстоянии 140 пк от Солнца. На таком расстоянии наиболее яркие TTS имеют блеск 10—12^m.

По современным представлениям звезды образуются в результате гравитационного коллапса фрагментов ядер плотных молекулярных облаков. Когда молодая звезда впервые становится видимой как оп-

тический объект, на диаграмме Герцшпрунга — Рессела она находится справа от главной последовательности (ГП). Стадия эволюции «до главной последовательности» (pre-main sequence, PMS) длится, в зависимости от массы звезды, 10^6 — 10^8 лет. Молодые звезды, находящиеся на стадии эволюции до ГП, можно разделить на две большие группы: звезды с массой от $2M_{\odot}$ и ниже (TTS) и более массивные звезды Ae-Be Хербига (HAEBE). Они различаются не только по массе и светимости, но и по внутреннему строению: TTS имеют конвективные оболочки, в то время как HAEBE находятся в радиативном равновесии [28].

Когда звезда солнечной массы впервые становится видимой как оптический объект, она еще окружена аккреционным диском, и у многих TTS аккреция вещества на звезду еще продолжается. Такие звезды называют классическими TTS (сTTS); они отличаются богатым эмиссионным спектром, избыточным непрерывным излучением как в УФ-так и в ИК-области спектра, и нерегулярной переменностью блеска. Объекты, описанные Джоем, были именно классическими TTS. Однако большинство TTS имеет слабые эмиссионные признаки и выделяются лишь эмиссией в линиях H и H, K Ca II. Такие звезды, в отличие от сTTS, называют wTTS (Weak Line T Tauri Stars).

TTS можно рассматривать как аналог нашего Солнца, когда вокруг него еще существовал протопланетный диск. Изучение таких звезд дает возможность заглянуть в прошлую историю Солнца. На протяжении почти 70 лет со времени открытия TTS удалось определить их основные параметры — массу, размеры, светимость, скорости вращения, темпы аккреции околозвездного вещества и темпы потери массы в звездном ветре. Были рассчитаны модели внутреннего строения этих звезд и определена эволюция основных звездных параметров на пути до главной последовательности. Были обнаружены околозвездные диски и биполярные джеты. Тем не менее, одно их самых заметных свойств молодых звезд — высокий уровень их активности, проявляющейся в изменениях блеска и спектра, остается предметом научной дискуссии уже не одно десятилетие. Сложность заключается в том, что здесь действуют одновременно различные физические механизмы, связанные как с внутренним строением звезды, так и с околозвездным окружением. Значительную, а иногда и определяющую роль в этих процессах играют магнитные поля TTS.

До конца 1960-х гг. считалось, что на TTS мы наблюдаем магнитную активность солнечного типа. Эти идеи были основаны на том, что TTS имеют глубокие конвективные зоны и сравнительно быстро вращаются, с периодами от 2 до 12 сут, поэтому можно ожидать генерации магнитного поля и сопутствующей магнитной активности. В начале 1970-х гг. уже имелись косвенные данные, указывающие на наличие магнитных полей порядка сотен миллитесла на поверхности TTS [24]. Впоследствии были получены и другие, более очевидные доказательства: вспышки в рентгеновском диапазоне и поляризация

излучения в эмиссионных линиях. И только в 1990-х гг. удалось измерить напряженность магнитного поля на поверхности некоторых TTS [8, 15, 17].

В 1990-е гг. представления о звездах типа Т Тельца претерпевали существенные изменения. Уже в 1980-х гг. стало ясно, что кроме магнитной активности у классических TTS наблюдается также активность, связанная с аккрецией. В начале 1990-х гг. появились первые теоретические разработки модели магнитосферной аккреции применительно к TTS, которые качественно объясняли наблюдаемые особенности эмиссионного спектра этих звезд. В то же время для количественного сравнения не хватало спектральных наблюдений высокого разрешения. Обычно проводились эпизодические наблюдения TTS в отдельных спектральных линиях, но для того чтобы «увидеть» динамику газовых потоков, требовались достаточно длительные и плотные по времени ряды спектральных наблюдений избранных TTS с высоким спектральным разрешением.

Ниже приведены примеры таких наблюдений, выполненных автором совместно с зарубежными коллегами за последние 10 лет, и кратко изложены основные результаты.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ TTS

Характерная спектральная особенность TTS, отмеченная еще в первых работах Джоя — аномально высокая интенсивность эмиссионных линий Fe I (43) — 406.3 и 413.2 нм. Это объясняется эффектом флуоресценции: одна из линий данного мультиплета, Fe I — 396.926 нм по длине волны почти совпадает с линией Ca II — 396.847 нм, поэтому атомы нейтрального железа поглощают излучение в длинноволновом крыле линии Ca II, что приводит к неравновесной населенности верхнего уровня и к избыточной эмиссии в линиях Fe I (43). Различие в указанных длинах волн Fe I и Ca II составляет 0.79 нм, или 60 км/с, поэтому данный механизм флуоресценции работает только в том случае, если ширина линии Ca II превышает 100 км/с. Флуоресценция в линиях Fe I (43) означает, что в эмиссионной оболочке TTS должно быть заметное поле скоростей, то есть это не обычная хромосфера.

Уширение эмиссионных линий макроскопическими движениями еще более очевидно в линиях водорода: ширина линии H — обычно составляет несколько сотен км/с и имеет сложный, несимметричный профиль с абсорбционным провалом, смещенным в коротковолновую сторону, что указывает на истечение вещества. Скорость истечения невелика, около 100 км/с, поэтому смещение абсорбционной детали обычно не выходит за пределы эмиссионной линии, как в классическом профиле типа P Cug. В то же время другие эмиссионные линии в том же спектре могут показывать обратный эффект — смещенные в длинноволновую сторону абсорбции, указывающие на движение газа

к звезде со скоростью до 450 км/с, что близко к скорости свободного падения на звезду. На рис. 1 показаны профили некоторых эмиссионных линий в спектре RW Aur A. Истечение газа (ветер) наиболее заметно в линиях водорода, в то время как падение (аккреция) — в линиях ионизованных металлов, а также в линиях He I 587.6 нм, O I 777.3 нм и Na I D. Как интенсивность, так и профиль линии изменяются с характерным временем около суток.

На рис. 1 видно, что профиль линии He I состоит из широкого и узкого компонентов. Это также характерная особенность сTTS, указывающая на то, что есть две разных излучающих области с разным полем скоростей. Широкие компоненты наблюдаются только у сTTS, что связано, по-видимому, с наличием аккреционного диска.

Кроме того, в спектрах сTTS есть эмиссии запрещенных переходов, например [O I] 630.0 нм и [S II] 673.1 нм. Эти линии образуются при низкой плотности на значительных расстояниях от звезды, в коллимированных потоках (джетах) истекающего газа.

Фотосферный спектр большинства TTS почти не отличается от спектра звезд главной последовательности соответствующего спектрального типа, за исключением аномально сильной абсорбции в линии Li I 670.7 нм, что является одним из критериев молодости этих звезд. Кроме того, у сTTS с сильным эмиссионным спектром часто наблюдается эффект вуалирования — фотосферные линии оказываются менее глубокими по сравнению со спектром звезды главной последовательности. Это может быть вызвано как влиянием хромосферной

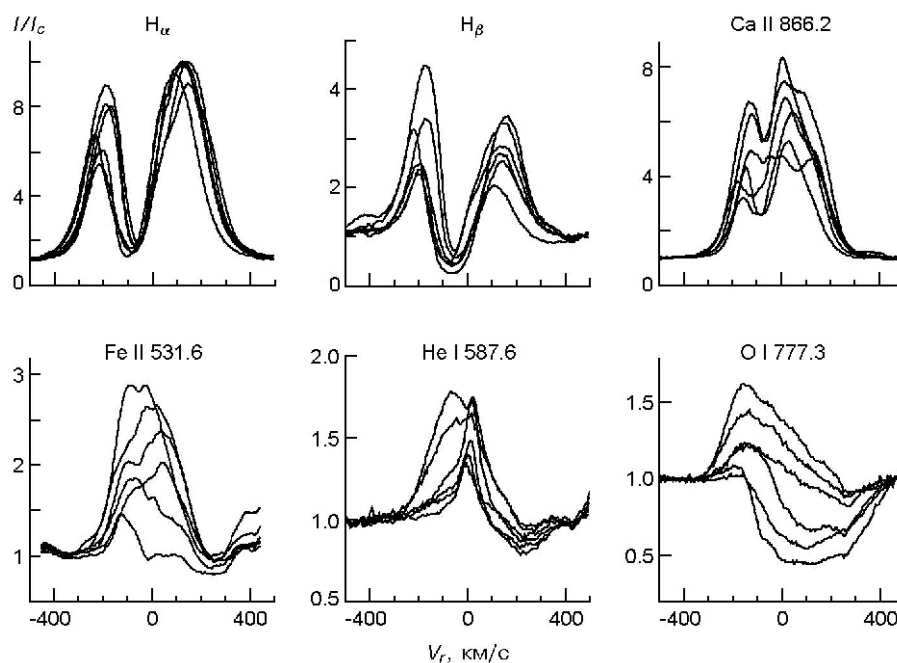


Рис. 1. Профили эмиссионных линий в спектре сTTS RW Aur A, нормированные к уровню континуума; v_r — лучевая скорость относительно звезды. Для каждой линии показаны несколько профилей, полученных в разные даты (наблюдения автора)

эмиссии в линиях, так и наличием дополнительного (не фотосферного) источника непрерывного излучения, например горячего пятна на поверхности звезды.

Подробное изложение наблюдаемых особенностей TTS и теоретических представлений о ранних стадиях эволюции можно найти в работах [1, 26, 28].

НАБЛЮДЕНИЯ С NOT/SOFIN: МАГНИТОСФЕРНАЯ АККРЕЦИЯ

В начале 1990-х гг. в Крымской астрофизической обсерватории, совместно с Обсерваторией Хельсинского университета, был создан эшелонный спектрограф SOFIN для нового 2.56-м оптического телескопа скандинавских стран (Nordic Optical Telescope, NOT). С помощью этого спектрографа в 1993—2000 гг. были получены длительные серии спектральных наблюдений нескольких TTS с разрешением $\Delta\lambda \approx 25000$ ($v \approx 12$ км/с).

Наиболее результативными оказались наблюдения одной из самых активных сTTS RW Aur A. Звезда имеет сложный спектр с широкими, накладывающимися друг на друга эмиссионными линиями, и сильно вуалированный фотосферный спектр позднего типа. Основная задача наблюдений состояла в том, чтобы обнаружить корреляцию между яркостью звезды и степенью вуалирования фотосферного спектра, предсказываемую моделью магнитосферной аккреции. Согласно модели [6] при аккреции газа на поверхность звезды образуется горячее (8000 К) пятно в основании аккреционной колонки, и излучение этого пятна приводит как к вуалированию спектральных линий, так и к переменности блеска звезды. По иронии судьбы именно этот эффект не был подтвержден, но было обнаружено много других. Прежде всего нам впервые удалось разложить сложный блендированный спектр RW Aur на несколько составляющих:

- 1) фотосферный спектр около K3V;
- 2) широкие эмиссионные линии водорода и металлов: полуширина около 250 км/с у Fe I и Fe II и до 500 км/с у линии H;
- 3) широкие абсорбционные компоненты Fe I, Fe II, Si II, Na I и других линий, смещенные в красную сторону на 100—400 км/с, что можно рассматривать как спектр падающего газа; это так называемые аккреционные компоненты линий;
- 4) узкие эмиссионные линии, в основном He I и He II, с полушириной около 40 км/с;
- 5) абсорбционные компоненты наиболее сильных линий (H I, Ca II, Na I), смещенные в коротковолновую сторону на 100 км/с, указывающие на истечение вещества от звезды.

Профили линий в спектре падающего газа указывают на то, что температура и плотность газа повышаются по мере приближения к поверхности звезды, в согласии с моделью магнитосферной аккреции. Наиболее интересным результатом было обнаружение эффектов, свя-

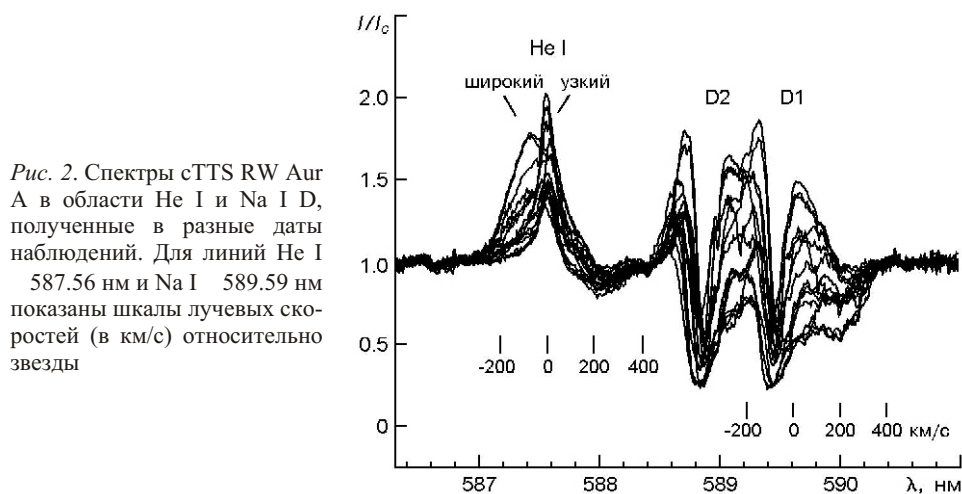


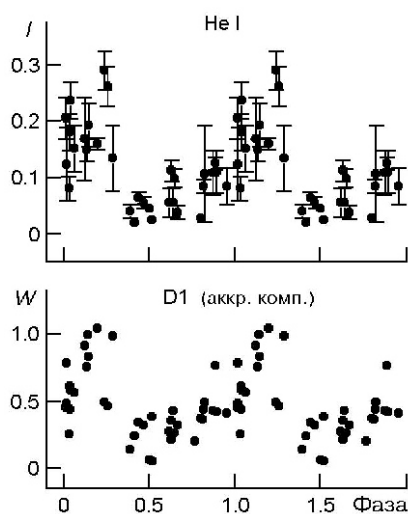
Рис. 2. Спектры ϵ TTS RW Aur A в области He I и Na I D, полученные в разные даты наблюдений. Для линий He I 587.56 нм и Na I 589.59 нм показаны шкалы лучевых скоростей (в км/с) относительно звезды

занных с вращением звезды. Период 2.7 сут был обнаружен в изменениях лучевых скоростей как фотосферных линий, так и узких эмиссионных линий гелия.

На рис. 2 показаны спектры RW Aur A в области эмиссионной линии He I 587.6 нм и дублета Na I D, полученные в разные даты. Приведенные спектры дают представление о полном диапазоне изменений в эмиссионных линиях. Линия He I состоит из узкого и широкого компонентов и имеет слабый аккреционный компонент. В линии Na I D1 аккреционный компонент простирается до скорости +400 км/с. Глубокие абсорбции в линиях Na I образуются в ветре.

Профиль линии He I был разложен на две гауссианы — широкую и узкую. Измерены лучевая скорость и эквивалентная ширина узкого компонента, которая затем с использованием фотометрических данных была пересчитана в поток излучения. В линии D1 Na I измерялась эквивалентная ширина аккреционного компонента в диапазоне скоростей от +200 до +400 км/с (см. рис. 3). Этот параметр зависит от плотности падающего газа на луче зрения и характеризует локальный

Рис. 3. Синфазные изменения потока I в узкой линии He I и эквивалентной ширины W аккреционного компонента Na I D1



темп аккреции в момент наблюдений. Заметим, что при массе звезды $1.1 M_{\odot}$, радиусе звезды $1.4R_{\odot}$ и внутреннем радиусе аккреционного диска $(5...7)R^*$ [21] скорость свободного падения на поверхность звезды составляет 500—600 км/с. Из-за наклона оси вращения звезды к лучу зрения радиальная составляющая этой скорости не превышает 450 км/с. Измеряемый диапазон скоростей от +200 до +400 км/с соответствует нижней половине аккреционной колонки.

Оказалось, что поток в узких линиях гелия усиливается в те моменты времени, когда усиливается аккреция на луче зрения, то есть когда мы видим звезду сквозь поток падающего газа. По-видимому, излучение в узких линиях гелия локализовано в области аккреционного ударного фронта. Была предложена модель аксиально-несимметричной аккреции: падение газа на звезду идет по двум диаметрально противоположным потокам, что вызвано, возможно, наклоном оси магнитного диполя к оси вращения звезды.

Наблюдаемые вариации лучевой скорости RW Aur с периодом 2.7 сут могут быть вызваны также хромосферной эмиссией, частично заполняющей профиль фотосферной абсорбции. Если эмиссия не равномерно распределена по диску звезды, а локализована в определенной области «хромосферного пятна», то при вращении звезды происходит смещение центра тяжести в профиле фотосферных линий, что выглядит как изменение лучевой скорости звезды; при этом лучевая скорость звезды и лучевая скорость хромосферных эмиссионных линий должны изменяться в противофазе, что действительно наблюдается.

Эти результаты, наряду с другими аналогичными исследованиями, стимулировали расчеты модели магнитной аккреции для случая наклонного ротатора (магнитная ось наклонена к оси вращения) [27].

Из фотометрических наблюдений RW Aur, охватывающих интервал времени более 20 лет, хорошо известно, что в изменениях блеска этой звезды отсутствует вращательная модуляция, подобная той, что наблюдается у многих TTS с пятнами на поверхности. Однако в изменениях показателя цвета $U - V$ нам удалось найти вполне достоверный период 2.64 сут [23]. Это объясняется тем, что периодически изменяется не континуум, а эмиссионные линии, а поскольку вклад эмиссионных линий максимален в полосах U и B , возникает вращательная модуляция в показателях цвета. Возможно, и у других сTTS можно обнаружить периоды вращения по модуляции показателей цвета $U - B$ и $B - V$.

Несколько обескураживающим результатом наших наблюдений было полное отсутствие корреляции между яркостью звезды и вуалированием фотосферного спектра, хотя оба параметра менялись в широких пределах. Это означает, что по каким-то причинам мы не видим горячего фотосферного пятна в основании аккреционной колонки, а большие изменения в вуалировании вызваны не столько горячим пятном, сколько хромосферной эмиссией в линиях.

Более подробно эти результаты изложены в работах [20, 21, 23]. Аналогичные серии спектральных наблюдений других сTTS представлены также в работах [2, 3, 13, 18, 22].

НАБЛЮДЕНИЯ С VLT/UVES: ХРОМОСФЕРНАЯ ЭМИССИЯ

Спектроскопия еще более высокого разрешения используется в настоящее время для поиска маломассивных компонент TTS: наличие планеты с массой Юпитера может быть обнаружено по изменениям лучевой скорости TTS. Пока имеются лишь косвенные свидетельства существования протопланет в околозвездных дисках TTS. Тем временем спектры TTS, получаемые в ходе программ по поиску маломассивных компонентов, обнаруживают новые свойства этих звезд. При исследовании слабых звезд с высоким разрешением используются спектрографы на больших телескопах. Одним из наиболее эффективных приборов является эшелый спектрограф UVES на 8-м телескопе VLT.

На рис. 4 показан небольшой фрагмент спектров сTTS S CrA SE и RU Lup, полученных с помощью VLT/UVES со спектральным разрешением $\lambda/\Delta\lambda \approx 60000$ ($v \approx 5$ км/с). Обе звезды относятся к наиболее активным сTTS с большой переменностью эмиссионного спектра и с большими изменениями вуалирования фотосферного спектра от ночи к ночи, что предполагает активную аккрецию вещества на поверхность этих звезд. На рис. 4 приведены по два спектра каждой звезды, относящиеся к наименьшему и к наибольшему уровням вуалирования. Видно, что в моменты максимального вуалирования фотосферные линии металлов становятся настолько слабыми, что при меньшем спектральном разрешении были бы неразличимы на фоне шумов континуума. При этом обнаруживается, что внутри абсорбционного профиля многих фотосферных линий наблюдается узкое эмиссионное ядро (на рис. 4 эти линии отмечены стрелками). При максимальном вуалировании эта эмиссия поднимается выше континуума, происходит «обращение» спектра. Это наиболее заметно в спектре S CrA SE, в то время как в спектре RU Lup фотосферные линии заполняются эмиссией, но не превышают уровня континуума. Изменения происходят на шкале времени порядка суток.

Спектральные линии, в которых наблюдается эффект обращения, относятся к наиболее сильным фотосферным линиям Fe I в спектре нормальной звезды. Поскольку ядра сильных линий образуются в более высоких слоях фотосферы в области температурного минимума, можно предположить, что узкие эмиссионные ядра являются хромосферной эмиссией. При этом переменным фактором является, по-видимому, оптическая глубина, на которой начинается температурная инверсия. Таким образом, эффект вуалирования обусловлен не только дополнительным непрерывным излучением, но и хромосферной

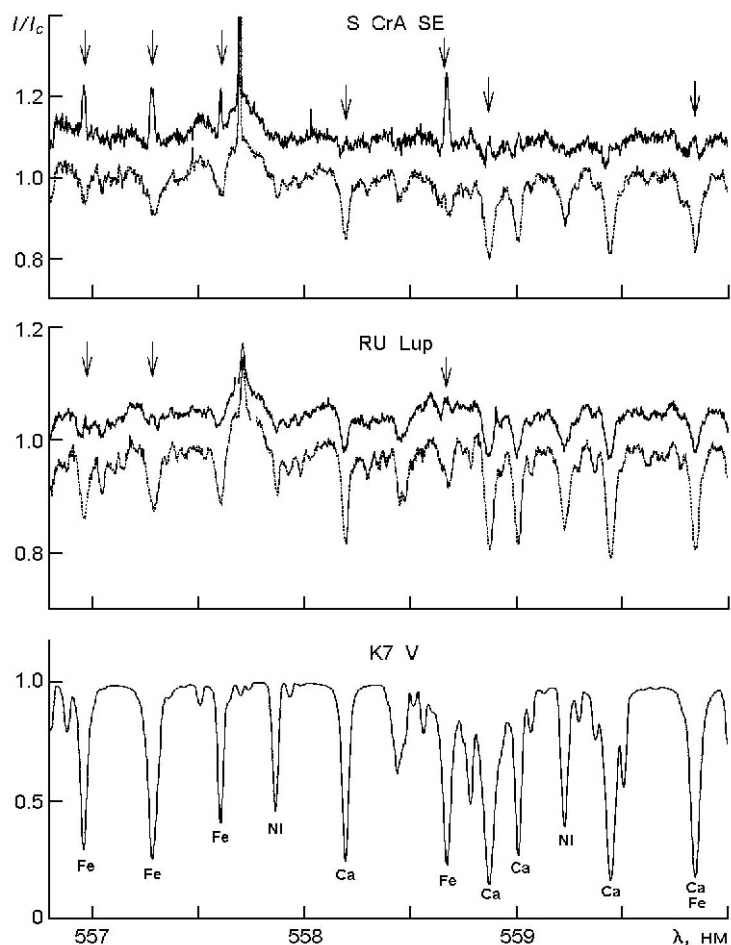


Рис. 4. Пары спектров R CrA SE и RU Lup, полученные в разные даты наблюдений. Стрелками указаны эмиссионные ядра, заполняющие профили фотосферных линий; внизу — синтетический спектр фотосферы K7V

эмиссией в линиях. Отметим, что ранее уже обсуждались модели «глубокой хромосферы» у классических звезд TTS [5, 7]. Почему происходят столь быстрые изменения этой хромосферной эмиссии, остается пока непонятным. Возможно, это связано с аккрецией. Более подробно эти результаты изложены в работе [12].

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Различие спектральных характеристик wTTS и cTTS обусловлено тем, что у cTTS кроме хромосферного спектра наблюдается еще спектр, образующийся в околосредной газовой оболочке — в «интерфейсе» между звездой и внутренней границей аккреционного диска. Жесткое излучение ударного фронта в основании аккреционных колонок иони-

зует окружающий газ, который светится в эмиссионных линиях как в оптическом, так и в УФ-диапазонах спектра. В коротковолновой (< 200.0 нм) области УФ-спектра сTTS наблюдаются эмиссионные линии, образующиеся при температурах $2 \cdot 10^5$ К (C IV, Si IV, N V и др.). По мере эволюции звезды прекращение аккреции, вероятно, переводит сTTS в класс wTTS, где есть только магнитная активность.

Тем не менее, магнитная активность есть в полной мере и в фазе сTTS. Как у сTTS, так и у wTTS наблюдаются холодные пятна на поверхности, что является индикатором магнитного поля. По наблюдениям зеемановского уширения фотосферных линий, напряженность магнитного поля сTTS, усредненная по поверхности фотосферы, составляет 100—300 мТл [16].

Другим индикатором магнитной активности TTS является рентгеновское излучение. Рентгеновское излучение является общим свойством как сTTS так и wTTS, причем во всех случаях это излучение наблюдается в виде вспышек, аналогичных солнечным. В диапазоне от 0.5 до 8 кэВ рентгеновская светимость TTS составляет в среднем 10^{22} Дж/с во время самых мощных вспышек может достигать 10^{25} Дж/с [10]. По сравнению с Солнцем, рентгеновские вспышки на TTS более мощные, происходят чаще и имеют большую продолжительность. Поскольку активность в рентгеновском диапазоне почти не зависит от наличия или отсутствия аккреционного диска TTS, ее обычно связывают с излучением корон этих звезд. Наличие аккрецирующего газа в магнитосфере лишь незначительно уменьшает рентгеновскую светимость сTTS [25]. Нагрев короны происходит, скорее всего, за счет диссипации магнитной энергии. Другой возможный источник рентгеновского излучения — ударный фронт в основании аккреционной колонки. Ударный фронт достигает температуры 10^6 К и может излучать мягкий рентген [14, 19]. Однако в большинстве случаев у TTS наблюдается более жесткий рентген, соответствующий температуре порядка 10^7 К. Анализ данных, полученных на XMM-Newton, показал, что в тех случаях, когда есть как жесткий ($3 \cdot 10^7$ К) так и мягкий (3 К) компоненты рентгеновского спектра, мягкий рентген излучается в плазме существенно более низкой плотности по сравнению с тем, что предсказывает модель ударного фронта [14]. Тем не менее, нельзя исключить, что ударный фронт может вносить свой вклад в наблюдаемую рентгеновскую светимость. Вопрос о природе источников рентгеновского излучения TTS остается предметом дискуссии [9, 10, 15, 25, 29].

Наиболее мощные вспышки рентгеновского излучения происходят, по-видимому, в корональных петлях, размеры которых сравнимы с расстоянием от звезды до внутренней границы аккреционного диска — на это указывают высокая светимость и большая продолжительность вспышек. Но большинство вспышек малой мощности происходят вблизи поверхности звезды, поскольку наблюдается вращательная модуляция рентгеновского излучения [11]. Это является свидетельством того, что на поверхности TTS есть области мультиполярных

структур магнитного поля, аналогичные активным областям на Солнце.

Наши спектральные наблюдения, рассмотренные выше, также обнаруживают локальные активные области на поверхности cTTs, причем эти области, по-видимому, связаны с аккрецией. Наблюдаемые нами эффекты обращения фотосферного спектра в хромосферный, а также локализация хромосферной эмиссии у основания аккреционного потока свидетельствуют о том, что аккреция может быть дополнительным источником нагрева хромосфер cTTs.

1. *Петров П. П.* Звезды типа Т Тельца // *Астрофизика*.—2003.—**466**, № 4.— С. 611—643.
2. *Beristain G., Edwards S., Kwan J.* Permitted iron emission lines in the classical T Tauri Star DR Tauri // *Astrophys. J.*—1998.—**499**.—P. 828—852.
3. *Bouvier J., Chelli A., Allain S., et al.* Magnetospheric accretion onto the T Tauri star AA Tauri. I. Constraints from multisite spectrophotometric monitoring // *Astron. and Astrophys.*—1999.—**349**.—P. 619—635.
4. *Bouvier J., Grankin K., Alencar S., et al.* Eclipses by circumstellar material in the T Tauri star AA Tau. II. Evidence for non-stationary magnetospheric accretion // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**409**.—P. 169—192.
5. *Calvet N., Basri G., Kuhl L. V.* The chromospheric hypothesis for the T Tauri phenomenon // *Astrophys. J.*—1984.—**277**.—P. 725—737.
6. *Calvet N., Gullbring E.* The structure and emission of the accretion shock in T Tauri stars // *Astrophys. J.*—1998.—**509**, N 2.—P. 802—818.
7. *Cram L. E.* Atmospheres of T Tauri stars — the photosphere and low chromosphere // *Astrophys. J.*—1979.—**234**.—P. 949—957.
8. *Donati J.-F., Semel M., Carter B. D., et al.* Spectropolarimetric observations of active stars // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1997.—**291**.—P. 658—682.
9. *Feigelson E., Montmerle T.* High-energy processes in young stellar objects // *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.*—1999.—**37**.—P. 363—408.
10. *Feigelson E., Townsley L., Gudel M., Stassun K.* X-ray properties of young stars and stellar clusters // *Protostars and Planets V* / Eds B. Reipurth, D. Jewitt, K. Keil. Arizona: Univ. Press, 2007.—P. 313—328.
11. *Flaccomio E., Micela G., Sciortino S., et al.* Rotational modulation of X-ray emission in Orion nebula young stars // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2005.—**160**, N 2.—P. 450—468.
12. *Gahm G. F., Walter F. M., Stempels H. C., et al.* Unveiling extremely veiled T Tauri stars // *Astron. and Astrophys.*—2008.—**482**, N 3.—P. L35—L38.
13. *Giampapa M. S., Basri G. S., Johns C. M., Imhoff C. L.* A synoptic of H line profile in the T Tauri star SU Aurigae // *Astrophys. J. Suppl.*—1993.—**89**, N 2.—P. 321—344.
14. *Gudel M., Skinner S. L., Mel'nikov S. Yu., et al.* X-rays from T Tauri: a test case for accreting T Tauri stars // *Astron. and Astrophys.*—2007.—**468**, N 2.—P. 529—540.
15. *Guenther E. W., Lehmann H., Emerson J. P., Staude J.* Measurements of magnetic field strength on T Tauri stars // *Astron. and Astrophys.*—1999.—**341**.—P. 768—783.
16. *Johns-Krull C. M.* The magnetic fields of classical T Tauri Stars // *Astrophys. J.*—2007.—**664**, N 2.—P. 975—985.
17. *Johns-Krull C. M., Valenti J. A., Hatzes A. P., Kanaan A.* Spectropolarimetry of magnetospheric accretion on the classical T Tauri star BP Tauri // *Astrophys. J.*—1999.—**510**, N 1.—P. L41—L44.
18. *Lago M. T. V. T., Gameiro J. F.* Time-variability analysis of the H, He I and Na I D lines in the T Tauri star LkH 264 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1998.—**294**.—P. 272—282.

19. *Lamzin S. A.* X-ray emission from T Tauri stars attributable to an accretion shock wave // *Astron. Lett.*—1999.—**25**, N 7.—P. 430—436.
20. *Petrov P. P.* Magnetospheric accretion in T Tauri stars: observational test // *Odes. Astron. Publ.*—2001.—**14**.—P. 194—197.
21. *Petrov P. P., Gahm G. F., Gameiro J. F., et al.* Non-axisymmetric accretion on the classical TTS RW Aur A // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**369**.—P. 993—1008.
22. *Petrov P. P., Gullbring E., Ilyin I., et al.* The gas flows of SU Aurigae // *Astron. and Astrophys.*—1996.—**314**.—P. 821—834.
23. *Petrov P. P., Pelt J., Tuominen I.* Periodic variations in the colours of the classical T Tauri star RW Aur A // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**375**.—P. 977—981.
24. *Petrov P., Shcherbakov A.* Observational data indicating existence of magnetic fields in T Tau type stars // *Proc. of the Third European Astronomical Meeting, Tbilisi, 1—5 July 1975* / Ed. by E. K. Kharadze. Tbilisi, 1976.—P. 163—165.
25. *Preibisch T., Kim Y., Favata F., et al.* The origin of T Tauri X-ray emission: new insights from the Chandra Orion ultradeep project // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2005.—**160**, N 2.—P. 401—422.
26. *Protostars and Planets V* / Eds B. Reipurth, D. Jewitt, K. Keil. Arizona: Univ. Press, 2007.—944 p.
27. *Romanova M. M., Ustyugova G. V., Koldoba A. V., Lovelace R. V. E.* Three-dimensional simulations of disk accretion to an inclined dipole. II. Hot spots and variability // *Astrophys. J.*—2004.—**610**, N 2.—P. 920—932.
28. *Stahler S. W., Palla F.* The formation of stars. — Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA, 2004.—852 p.
29. *Stassun K. G., van den Berg M., Feigelson E., Flaccomio E.* A simultaneous optical and X-ray variability study of the Orion nebula cluster. I. Incidence of time-correlated X-Ray / Optical Variations // *Astrophys. J.*—2006.—**649**, N 2.—P. 914—926.

Поступила в редакцию 01.10.09