

## О СПЕКТРЕ РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРОТОПЛАНЕТНЫХ ДИСКОВ

© 2022 г. В. П. Гринин<sup>1, 2, \*</sup>, Л. В. Тамбовцева<sup>1, \*\*</sup>, Д. В. Дмитриев<sup>1, 3, \*\*\*</sup>

<sup>1</sup> Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Астрономический институт им. В.В. Соболева, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия

\*E-mail: vgcrao@mail.ru

\*\*E-mail: lvtamb@mail.ru

\*\*\*E-mail: dmitrievdv242@gmail.com

Поступила в редакцию 15.12.2021 г.

После доработки 23.01.2022 г.

Принята к публикации 24.01.2022 г.

Изучена деформация фотосферного излучения молодой звезды при рассеянии во внутренних областях протопланетного диска. Искажение спектральных линий происходит в результате изменения частоты излучения вследствие эффекта Доплера при рассеянии движущимися пылинками. Показано, что сильные изменения фотосферных линий в спектре звезды RW Aur типа Т Тельца, наблюдавшиеся во время ее глубокого минимума, были вызваны рассеянием излучения на ближайших к звезде частицах пыли. В случае горячих звезд типа UX Ori искажение фотосферных линий при рассеянии менее существенно (за редким исключением), так как зона сублимации пыли находится значительно дальше от звезды, а сами фотосферные линии уширены быстрым вращением звезд.

*Ключевые слова:* звезды типа UX Ori, RW Aur, протопланетные диски, спектры рассеянного излучения

**DOI:** 10.31857/S0004629922050024

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Рассеянное излучение протопланетных дисков вносит, как правило, небольшой вклад в оптическое излучение молодых звезд и обычно игнорируется при моделировании их спектров. Исключение составляет семейство неправильных переменных звезд, прототипом которых является звезда UX Ori [1]. В него входят в основном звезды спектральных типов Ae. На важную роль рассеянного излучения для понимания природы переменности этих объектов было впервые указано в статье [2]. Во время глубоких ослаблений блеска, вызванных экранированием звезды околозвездными газопылевыми облаками, прямое излучение звезды блокируется. В такие моменты рассеянное излучение околозвездной пыли доминирует в наблюдаемом излучении. Этим объясняется целый ряд наблюдательных свойств этих объектов, включая необычное поведение показателей цвета звезды при ослаблениях блеска, ограничение амплитуды минимумов и увеличение линейной поляризации в минимумах. На основании этого в [3] было высказано предположение о том, что звезды этого семейства — это обычные звезды типа Ae Хербига. Они окружены прото-

планетными дисками, наклоненными под небольшим углом к лучу зрения. Это предположение подтвердилось в ходе дальнейших исследований [4–11], в том числе интерферометрическими наблюдениями [12–14].

В последние годы семейство звезд типа UX Ori, состоявшее первоначально из молодых горячих звезд, пополнилось более холодными звездами типа Т Тельца. У некоторых из них (получивших название дипперы (dippers)) наблюдались небольшие по амплитуде минимумы, вызванные кратковременными флуктуациями экстинкции (см., напр., [15, 16]). В отличие от горячих звезд типа UX Ori, у которых околозвездная пыль испаряется на расстояниях порядка 0.3–0.5 а.е. от звезды, у звезд типа Т Тельца она сохраняется вплоть до магнитосферы звезды и может даже проникать в нее [17]<sup>1</sup>.

Во всех перечисленных выше работах речь шла о рассеянном излучении околозвездных дисков в непрерывном спектре, применительно к широко-

<sup>1</sup> Возможно этим обстоятельством объясняется отсутствие связи между переменностью дипперов и ориентацией их дисков [18].

полосным фотометрическим и поляризационным наблюдениям. В связи со спектральными наблюдениями звезд типа UX Ori во время глубоких минимумов представляет интерес задача о трансформации фотосферного спектра звезды при рассеянии околозвездной пылью. Такая задача была впервые рассмотрена в [19]. Было показано, что изменение частоты излучения из-за эффекта Доплера при рассеянии движущимися пылинками околозвездного диска может привести к сильной деформации (уширению) исходного фотосферного профиля линии поглощения. Этот эффект особенно важен для звезд типа Т Тельца, у которых околозвездная пыль может сохраняться вплоть до расстояний порядка 5–10 радиусов звезды. На этом расстоянии скорость кеплеровского вращения диска равна 150–200 км/с. Поэтому уширение спектральной линии при рассеянии может быть весьма существенным.

В настоящей статье мы рассмотрим более детально особенности спектра рассеянного излучения применительно к звездам типа Т Тельца и обсудим в контексте этой модели изменения спектра звезды RW Aur, наблюдавшиеся недавно во время глубоких минимумов этой звезды Факкини и др. [20] и Таками и др. [21]. Будет рассмотрен также вклад рассеянного излучения в спектры горячих звезд типа UX Ori.

## 2. ЗОНА ИСПАРЕНИЯ ПЫЛИ

Ближайшая к звезде область аккреционного газопылевого диска, в которой еще содержится пыль, это область испарения (сублимации) пылевых частиц под действием излучения звезды. Граница этой области играет важную роль в образовании инфракрасных (ИК) избытков излучения [22]: благодаря более эффективному нагреву пыли излучением звезды в этой области возникает утолщение, в котором формируется основная часть излучения в ближней ИК области спектра ( $\lambda \leq 10 \mu\text{m}$ ). Об этом же свидетельствуют результаты интерферометрических наблюдений звезд Хербига в ближней ИК области спектра (см. напр., [23–25], Креплин и др. [12, 13]).

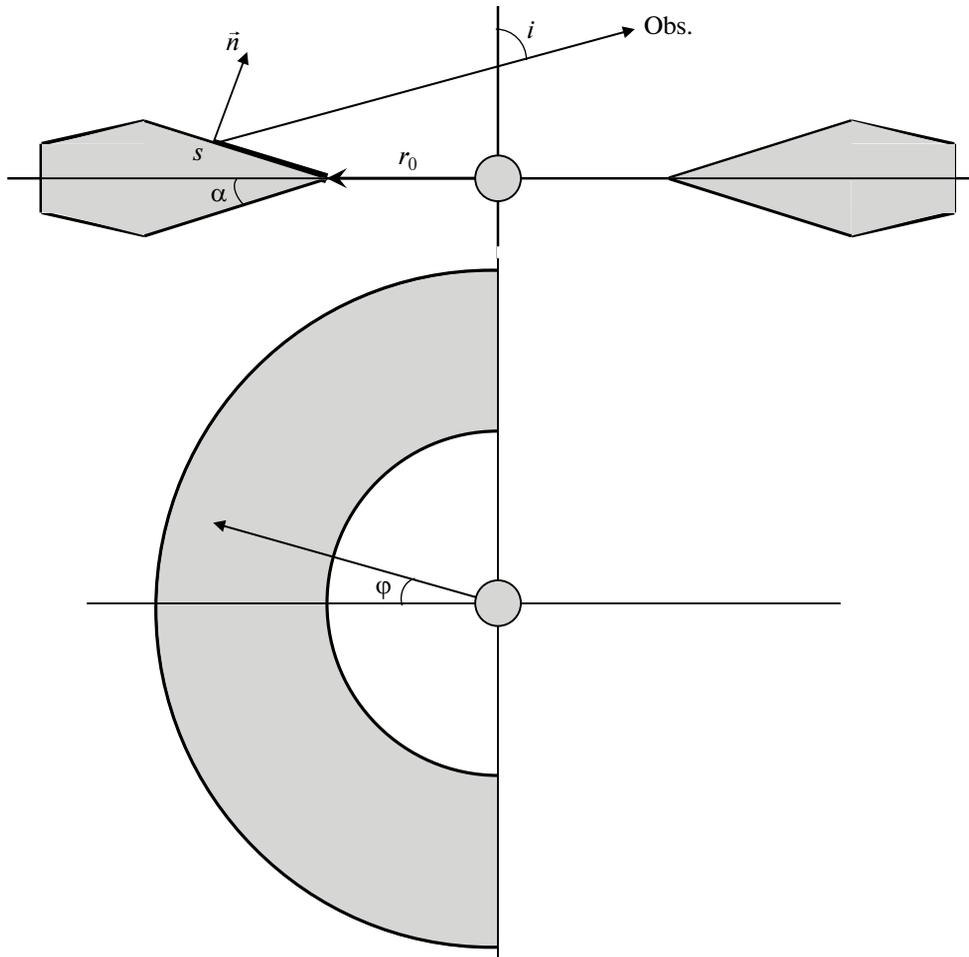
Увеличение геометрической толщины диска в зоне сублимации приводит к появлению протяженной теневой зоны на диске, не освещаемой прямым излучением звезды [26]. Существование этой зоны уменьшает вклад периферийных частей околозвездного диска как в тепловое, так и в рассеянное излучение, что еще больше усиливает роль зоны испарения. Согласно [27] молодые объекты с малыми избытками излучения в далекой ИК области спектра – это как раз такие звезды, у которых периферийные области аккреционных дисков находятся в зоне тени.

Таким образом, в рамках моделей Натта и др. [22] и Дуллемон и др. [26] рассеянное излучение околозвездного диска состоит из двух частей: излучения, рассеянного в зоне испарения пыли, и излучения, рассеянного в периферийных областях диска. Ниже мы будем рассматривать только первую составляющую, поскольку только она может приводить к искажению абсорбционного спектра звезды. Ранее в [19] было принято для простоты, что эта область представляет собой цилиндрический слой пыли, поверхность которого локально может быть заменена плоскопараллельной полубесконечной средой. Это позволило воспользоваться при расчетах рассеянного излучения классическими результатами теории переноса излучения. Заметим, что приближение плоскопараллельного слоя, освещаемого внешним источником излучения, часто используется в теории аккреционных дисков. Основанием для этого служит то обстоятельство, что характерное расстояние, которое фотон проходит в среде до момента гибели в результате поглощения пылью, обычно очень мало по сравнению с расстоянием до источника света и характерным размером среды.

## 3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Согласно современным моделям (Танниркулам и др. [28]; Флок и др. [29]) зона испарения пыли имеет протяженную структуру, обусловленную присутствием в диске пылевых частиц разных сортов и размеров, и напоминающую конус с углом раствора  $\alpha \approx 20^\circ$  (см. рис. 1). В пределах этой зоны кеплеровская скорость меняется примерно в 1.4 раза относительно кеплеровской скорости в основании конуса  $u_K$  на расстоянии  $r_{sb}$ , соответствующем температуре сублимации силикатных частиц (ниже она принята равной 1500 К). Поскольку зона сублимации пыли находится на значительном удалении от звезды<sup>2</sup>, а ее эффективная толщина  $H$  значительно меньше радиуса сублимации  $r_{sb}$ , мы можем упростить задачу, заменив звезду точечным источником излучения и приняв, что каждая элементарная площадка конуса освещается параллельным пучком света под углом  $\theta_0 = 90 - \alpha$  к нормали к поверхности. При расчетах рассеянного излучения мы учли также, что из-за небольшого наклона диска к лучу зрения основной вклад в излучение дает область диска, находящаяся за звездой (рис. 1).

<sup>2</sup> Исключение составляют самые холодные звезды типа Т Тельца, у которых зона сублимации пыли подходит непосредственно к магнитосфере звезды.



**Рис. 1.** Схематическая модель внутренней части протопланетного диска согласно [28]. Заштрихована область, которая дает основной вклад в рассеянный спектр.

### 3.1. Рассеяние движущимися пылинками

При рассеянии движущимися частицами частота рассеянного излучения смещается из-за эффекта Доплера. В протопланетном диске частицы пыли участвуют вместе с газом в квазикеплеровском вращении, которое усиливается по мере приближения к центру. Максимальные скорости движения пыли достигаются в зоне испарения. Именно здесь при рассеянии излучения звезды происходит максимальное искажение ее спектра. Что касается периферийных областей диска (которые мы здесь не рассматриваем), то из-за малых скоростей вращения спектр рассеянного излучения в этой части диска будет в хорошем приближении идентичен фотосферному спектру центральной звезды.

### 3.2. Основные соотношения

Учитывая, что средняя длина свободного пробега кванта для оптического излучения в протопланетном диске (за исключением его перифе-

рии) много меньше его геометрической толщины, мы можем вновь заменить локально поверхность зоны испарения в каждой точке плоскопараллельным полубесконечным слоем. Это позволит нам, как и ранее в [19], использовать для расчетов результаты классической теории переноса излучения. Заметим, что в [19] были рассмотрены два случая: анизотропное рассеяние с индикатрисой Хензи-Гринстейна и изотропное рассеяние. Поскольку расчеты не выявили больших различий между этими двумя моделями, ниже мы ограничимся случаем изотропного рассеяния.

В этом случае согласно Амбарцумяну [30] интенсивность излучения, рассеянного под углом  $\theta$  к нормали к поверхности, может быть представлена в виде:

$$I(\eta, \zeta) = \frac{L_*}{4\pi^2 r^2} \rho(\eta, \zeta) \zeta. \quad (1)$$

Здесь  $\zeta = \cos \theta_0$ , где угол  $\theta_0$  определен выше,  $\eta = \cos \theta$ , где  $\theta$  – угол между нормалью к поверх-

Таблица 1. Параметры звезд

Name	$M_*$ , $M_\odot$	$R_*$ , $R_\odot$	$T_{\text{эф}}$ , К	$\lg g$	$V \sin i$ , км/с	$R_{sb}$ , а.е.	$u_K$ , км/с
RW Aur	1.35	1.6	4700	3.7	25	0.07	130
UX Ori	3.0	2.7	10000	3.5	140	0.50	72
BF Ori	2.6	3.3	9000	3.8	40	0.55	64
CQ Tau	1.5	1.9	7000	3.5	90	0.20	83

ности и направлением рассеянного излучения,  $r$  – расстояние от данной точки на рассеивающей поверхности до источника излучения,  $\rho$  – коэффициент отражения, определяемый соотношением:

$$\rho(\eta, \zeta) = \frac{1 - \varepsilon}{4} \frac{H(\zeta)H(\eta)}{\zeta + \eta}, \quad (2)$$

в котором  $1 - \varepsilon$  – вероятность выживания кванта при однократном рассеянии (альbedo однократного рассеяния, принятое равным 0.5),  $H(\eta)$  – функция Амбарцумяна<sup>3</sup>, удовлетворяющая нелинейному уравнению:

$$H(\eta) = 1 + \frac{1 - \varepsilon}{2} \eta H(\eta) \int_0^1 \frac{H(\eta')}{\eta + \eta'} d\eta'. \quad (3)$$

Ниже при расчетах коэффициента отражения были использованы таблицы функции Амбарцумяна из книги Соболева [32].

Обозначим через  $i$  угол между осью симметрии аккреционного диска и лучом зрения. При определении углов, входящих в соотношения для коэффициента отражения  $\rho$ , следует учесть, что максимальная геометрическая толщина диска в зоне сублимации пыли  $H_m$  много меньше расстояния до звезды. В этом случае можно принять, что каждый элемент поверхности зоны испарения пыли освещается звездой под углом  $70^\circ$  к нормали к поверхности и  $\zeta = 0.34$ . В результате коэффициент отражения в (2) становится функцией одной переменной:  $\rho(\eta) = \rho(\eta, \zeta = 0.34)$ . Если воспользоваться обозначениями рис. 1, то для любого элемента поверхности зоны испарения можно получить следующее выражение для косинуса угла рассеяния в направлении на наблюдателя:

$$\eta(\phi) = \zeta \sin i \cos \phi + \cos i \sin \theta_0, \quad (4)$$

где  $i$  – угол между осью симметрии диска и направлением на наблюдателя.

Обозначим через  $u(s)$  скорость кеплеровского движения элемента конической поверхности на

внутренней границе диска на расстоянии  $s$  от вершины конуса (см. рис. 1), а через  $v'$  частоту излучения, смещенную из-за эффекта Доплера при рассеянии элементарным участком этой поверхности с координатами  $\phi$ ,  $s$ . Нетрудно показать, что

$$v'(s, \phi) = v \left( 1 + \frac{u(s)}{c} \sin i \sin \phi \right). \quad (5)$$

Здесь

$$u(s) = u_K (\omega(s_0)/\omega(s))^{1/2}, \quad (6)$$

где  $\omega(s) = r_0 + s \sin \theta_0$ .

С учетом этого выражение для интенсивности излучения, рассеянного всей видимой частью поверхности зоны испарения пыли, может быть записано в виде:

$$I(v) = \frac{2}{\pi} \int_0^{s_0} r(s) ds \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \frac{L_*(v')}{4\pi r(s)^2} \rho(\eta(\phi)) \eta(\phi) \zeta d\phi, \quad (7)$$

$$r(s) = (s^2 + r_0^2 + 2sr_0 \sin \theta_0)^{1/2}, \quad (8)$$

где  $r_0 = r(s = 0)$ .

При вычислениях шаг интегрирования по  $\phi$  в формуле (7) был принят равным  $5^\circ$ . Интеграл по  $s$  был разбит на три зоны таким образом, чтобы их вклад в рассеянное излучение был одинаков. Значение локальной кеплеровской скорости в каждой зоне принималось для ее центра. Полученные спектры нормированы на единицу в континууме.

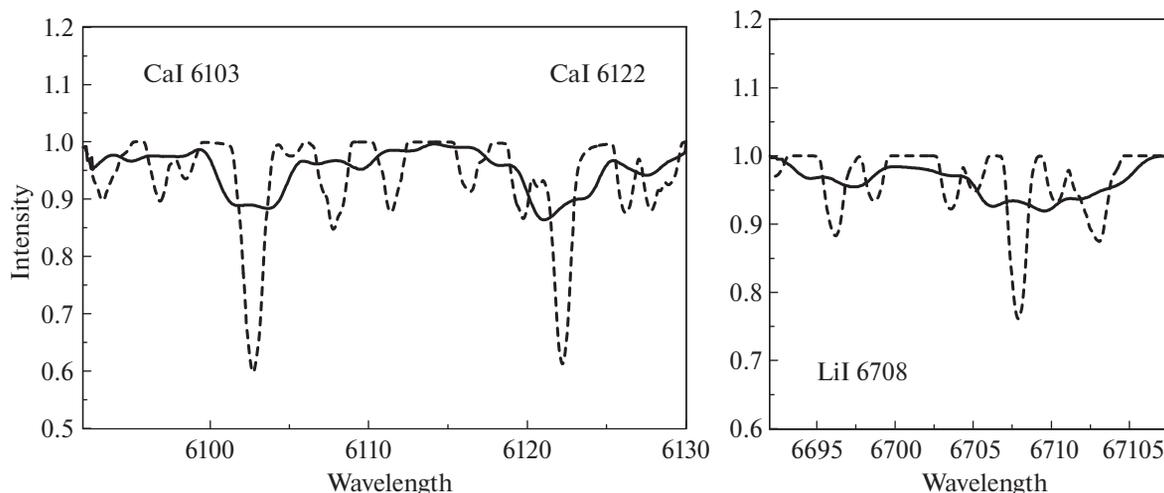
#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе приведенных выше соотношений были рассчитаны спектры рассеянного излучения в нескольких спектральных интервалах для трех звезд типа UX Ori: CQ Tau, BF Ori и UX Ori, а также для звезды типа Т Тельца RW Aur. В табл. 1 приведены параметры этих звезд по данным Rodriguez et al. [33] и Ростопчиной [34]. Скорости вращения  $v \sin i$  для звезд типа UX Ori взяты из статьи Гринина и др. [35]. В качестве исходных спектров были приняты синтетические спектры рассматриваемых звезд, рассчитанные на основе моделей звездных атмосфер Куруча [36] с использованием параметров, приведенных в табл. 1, и базы данных VALD [37–39]. Спектры расширены вращением звезд с использованием программы SynthV Цымбала [40]. Угол наклона  $i$  принят равным  $55^\circ$  для RW Aur [41] и  $70^\circ$  для звезд типа UX Ori [13].

##### 4.1. RW Aur

На рис. 2 приведены два участка синтетического спектра RW Aur в ярком состоянии и во время глубокого минимума, когда прямое излучение

<sup>3</sup> Как и в [19], мы используем здесь обозначение этой функции, введенное Чандрасекаром [31], поскольку буква  $\phi$ , которой эта функция обозначается в российской и советской литературе по переносу излучения, используется нами для обозначения азимута.



**Рис. 2.** Модели спектра рассеянного излучения RW Aur в окрестностях линий Ca I и Li. Штриховая линия – синтетический спектр звезды (что соответствует яркому состоянию); сплошная линия – синтетический спектр рассеянного излучения (что соответствует глубокому минимуму).

звезды полностью блокировано пылевым облаком и звезда наблюдается в рассеянном свете. Видно, что фотосферные линии в минимуме блеска сильно расширены при рассеянии на внутренней границе пылевого диска. В результате соседние линии поглощения в спектре звезды блендируют друг друга, что приводит к исчезновению узких фотосферных линий.

Расчеты показали, что широкие фотосферные линии, расширенные эффектом Штарка, почти не меняются при рассеянии движущейся пылью. Исключение составляет узкие ядра таких линий, которые замыкаются, как при вуалировании непрерывным спектром.

#### 4.2. Звезды типа UX Ori

На рис. 3 показан участок синтетического спектра с линиями Fe II двух звезд типа UX Ori. Один из них принадлежит звезде BF Ori, являющейся самой медленно вращающейся звездой этого типа<sup>4</sup>:  $V \sin i = 40$  км/с. Светимость этой звезды значительно больше, чем у RW Aur. Поэтому зона испарения пыли находится дальше от звезды и имеет значительно меньшую скорость кеплеровского вращения. Тем не менее из-за низкой скорости вращения самой звезды эффект рассеяния на внутренней границе пылевого диска создает ощутимые изменения в исходном спектре: фотосферные линии становятся заметно шире и мельче по сравнению с внезатменным спектром.

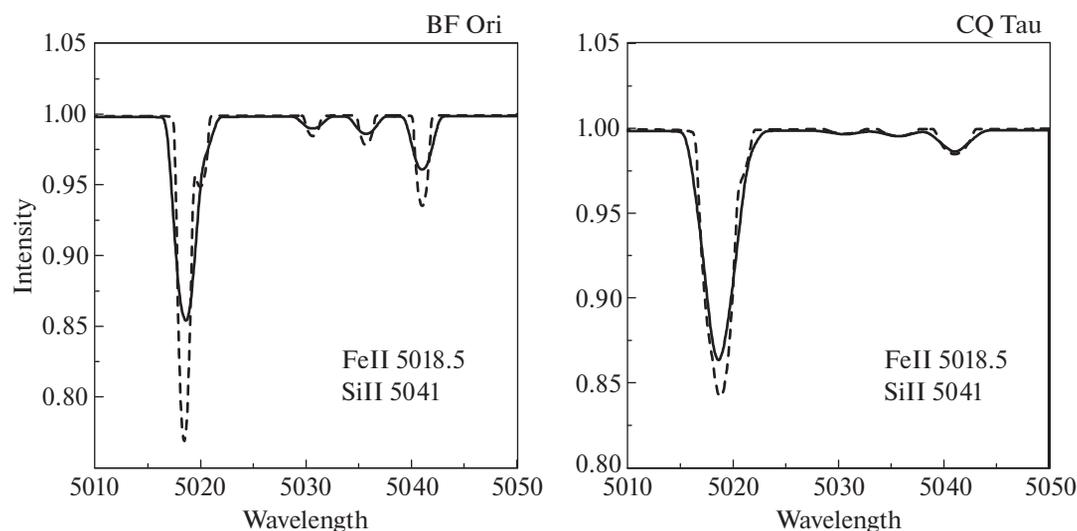
<sup>4</sup> Возможные причины замедленного вращения BF Ori обсуждаются в статье [42].

CQ Tau вращается значительно быстрее по сравнению с RW Aur. Кеплеровская скорость в зоне сублимации пыли у этой звезды также заметно больше, чем у BF Ori. В результате, как видно из рис. 3, фотосферные линии в спектре рассеянного излучения CQ Tau лишь ненамного шире по сравнению с внезатменным спектром.

Кроме этих звезд мы рассчитали также фрагменты спектра рассеянного излучения UX Ori. Радиус зоны сублимации пыли у этой звезды почти такой же, как у BF Ori. Однако в отличие от нее UX Ori относится к числу быстро вращающихся звезд этого семейства (см. табл. 1). Поэтому уширение линий в спектре ее рассеянного излучения оказалось незначительным и мы его здесь не приводим. Аналогичный результат получен также для другой быстро вращающейся звезды этого семейства RR Tau.

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные выше результаты подтверждают сделанный ранее в [19] вывод о сильном искажении фотосферного спектра звезд типа Т Тельца во время затмений околозвездными пылевыми структурами. Причина такого искажения очень проста: благодаря сравнительно небольшой светимости этих звезд, внутренняя граница пылевого диска подходит близко к магнитосфере звезды и вращается с большой скоростью, намного превышающей скорость вращения самих звезд. Когда прямое излучение звезды во время затмения блокировано, наблюдатель регистрирует рассеянное излучение, исходящее преимущественно от внутренней области диска. Широкие и мелкие по глубине линии поглощения в спектре рассеянного излучения блендируют друг друга и образу-



**Рис. 3.** Модели спектра рассеянного излучения звезд типа UX Ori CQ Tau и BF Ori в окрестности линии Fe II 5018 Å. Штриховая линия – синтетический спектр звезды (что соответствует яркому состоянию); сплошная линия – синтетический спектр рассеянного излучения (что соответствует глубокому минимуму).

ют квазиконтинуум. При этом широкие фотосферные линии, такие как линии бальмеровской серии, расширенные эффектами давления (Штарк-эффект, уширение Ван дер Вальса), меняются за счет рассеянного излучения незначительно. Подобная трансформация фотосферного спектра наблюдалась Факкини и др. [20] и Таками и др. [21] во время глубокого минимума RW Aur. Обсуждая возможные причины исчезновения фотосферного спектра, авторы этих работ не нашли (как они пишут) приемлемого объяснения наблюдавшемуся ими явлению. Между тем, эффект, который они наблюдали, был предсказан в статье [19].

Другим объектом, в спектре которого наблюдался эффект уширения фотосферных линий поглощения в глубоком минимуме блеска, является звезда типа UX Ori RZ Psc [43]. По своим спектральным характеристикам она близка к семейству звезд типа WTTS (weak line T Tauri star) и интересна тем, что окружена не диском, а газопылевым кольцом, внутренняя граница которого находится на расстоянии 0.5–0.7 а.е. от звезды [44, 45]. За пределами этого кольца, на проекционном расстоянии 23 а.е. от звезды Кеннеди и др. [45] обнаружили маломассивный компаньон с массой  $0.12M_{\odot}$ .

В нашей статье мы ограничились моделированием спектра рассеянного излучения фотосферы звезды и не рассматривали рассеянное излучение эмиссионных линий, наблюдаемых в спектрах молодых звезд. Ширина многих из этих линий сравнима со скоростью кеплеровского вращения в окрестностях звезд. Опираясь на результаты моделирования спектра рассеянного излучения

быстровращающихся звезд типа UX Ori, можно определенно сказать, что эффект уширения эмиссионных линий при рассеянии будет незначительным. Несмотря на это, присутствие рассеянного излучения диска можно наблюдать и в этом случае по изменению параметров поляризации при обходе по контуру эмиссионной линии (см. [46] и цитированную там литературу).

Следует отметить, что кроме пылевого диска излучение молодой звезды может рассеиваться также в магнитоцентричном дисковом ветре. Он стартует с поверхности диска и кроме газа содержит также мелкую пыль [47]. Вследствие этого ближайшие к диску области ветра могут быть непрозрачными для излучения звезды и могут быть источником дополнительного рассеянного излучения. В отличие от диска, в дисковом ветре присутствуют два компонента скорости – тангенциальный и направленный от звезды полоидальный компонент. В этом случае, как показывает анализ [19, 48], фотосферные линии не только расширяются дифференциальным вращением ветра, но и смещаются в длинноволновую сторону. Такое смещение линий в минимуме блеска RW Aur действительно наблюдалось Факкини и др. [20] и Катами и др. [21]. Следует также отметить, что в работе Петрова и др. [49] (см. статью Додина и др. [50]) гипотеза об экранировании RW Aur собственным дисковым ветром рассматривалась в качестве возможной причины наблюдавшегося затмения этой звезды.

Кроме обсуждаемых здесь изменений характеристик фотосферного спектра звезд типа UX Ori в глубоких минимумах блеска, в такие моменты на фоне ослабленного спектра звезды могут по-

явиться эмиссионные линии, принадлежащие протопланетному диску или дисковому ветру, которые не обнаруживаются в ярком состоянии звезд из-за их слабости. На это указывают спектральные наблюдения Роджерс и др. [51] в глубоких минимумах RR Tau, во время которых в спектре звезды появились не наблюдавшиеся ранее эмиссии в линиях некоторых металлов. Наблюдения и моделирование таких линий могут дать ценную информацию о структуре газовой атмосферы протопланетных дисков.

Суммируя изложенное выше, мы можем сказать, что получение высококачественных спектров звезд типа UX Ori во время затмений является весьма важной наблюдательной задачей, которая до сих пор решена лишь в сильно ограниченном виде из-за непредсказуемости таких событий. Такие спектры позволят получить новую информацию о структуре и динамическом состоянии вещества в околозвездном окружении молодых звезд и построить их более совершенные модели.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторы благодарны Министерству высшего образования и науки РФ за финансовую поддержку грантом № 075-15-2020-780.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *W. Herbst, D. K. Herbst, E. J. Grossman, and D. Weinstein*, *Astron. J.* **108**, 1906 (1994).
2. *V. P. Grinin*, *Soviet Astron. Letters* **14**, 27 (1988).
3. *V. P. Grinin, N. N. Kiselev, G. P. Chernova, N. Kh. Minikulov, and N. V. Voshchinnikov*, *Astrophys. Space Sci.* **186**, 283 (1991).
4. *N. N. Kiselev, N. Kh. Minikulov, and G. P. Chernova*, *Astrophysics* **34**, 175 (1991).
5. *V. P. Grinin and A. N. Rostopchina*, *Astron. Rep.* **40**, 171 (1996).
6. *A. N. Rostopchina, V. P. Grinin, A. Okazaki, P. S. The, S. Kikuchi, D. N. Shakhovskoy, and N. Kh. Minikulov*, *Astron. and Astrophys.* **327**, 145 (1997).
7. *M. Vioque, R. D. Oudmaijer, D. Baines, I. Mendigutia, and R. Perez-Martinez*, *Astron. and Astrophys.* **620**, id. A128 (2018).
8. *A. Natta, V. P. Grinin, V. Mannings, and H. Ungerechts*, *Astrophys. J.* **491**, 885 (1997).
9. *A. Natta and B. Whitney*, *Astron. and Astrophys.*, **364**, 633 (2000).
10. *A. N. Rostopchina, V. P. Grinin, D. N. Shakhovskoi, A. A. Lo-mach, and N. Kh. Minikulov*, *Astron. Rep.* **51**, 55 (2007).
11. *D. N. Shakhovskoi, A. N. Rostopchina, V. P. Grinin, and N. Kh. Minikulov*, *Astron. Rep.* **47**, 301 (2003).
12. *Kreplin, G. Weigelt, S. Kraus, V. Grinin, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **551**, id. A21 (2013).
13. *A. Kreplin, D. Madlener, L. Chen, G. Weigelt, S. Kraus, V. Grinin, L. Tambovtseva, and M. Kishimoto*, *Astron. and Astrophys.* **590**, id. 96 (2016).
14. *K. M. Pontoppidan, C. P. Dullemond, G. A. Blake, N. J. Evans II, V. C. Geers, P. M. Harvey, and W. Spiesman*, *Astrophys. J.* **656**, 991 (2007).
15. *M. M. Alencar, S. H. P. Teixeira, P. S. Guimaraes, M. M. McGinnis, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **519**, id. A88 (2010).
16. *P. T. McGinnis, S. H. P. Alencar, M. M. Guimaraes, A. P. Sousa, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **577**, id. A11 (2015).
17. *E. Nagel and J. Bouvier*, *Astron. and Astrophys.* **643**, id. 157 (2020).
18. *M. Ansdell, E. Gaidos, C. Hedges, M. Tazzari, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **492**, 572 (2020).
19. *V. P. Grinin, A. S. Mitskevich, and L. V. Tambovtseva*, *Astron. Letters* **32**, 110 (2006).
20. *S. Facchini, C. F. Manara, P. C. Schneider, C. J. Clarke, J. Bouvier, G. Rosotti, R. Booth, and T. J. Haworth*, *Astron. and Astrophys.* **596**, id. A38 (2016).
21. *M. Takami, Y.-J. Wei, M.-Y. Chou, J. L. Karr, et al.*, *Astrophys. J.* **820**, id. 139 (2016).
22. *A. Natta, T. Prusti, R. Neri, V. P. Grinin, and V. Mannings*, *Astron. and Astrophys.* **371**, 186 (2001).
23. *P. G. Tuthill, G. Peter, J. D. Monnier, and W. C. Danchi*, *Nature* **409**, 1012 (2001).
24. *R. Millan-Gabet, F. P. Schloerb, and W. A. Traub*, *Astrophys. J.* **546**, 358 (2001).
25. *J. A. Eisner, B. F. Lane, R. L. Akeson, L. A. Hillenbrand, and A. I. Sargent*, *Astrophys. J.* **588**, 360 (2003).
26. *P. Dullemond, C. Dominik, and A. Natta*, *Astrophys. J.* **560**, 957 (2001).
27. *P. Dullemond and C. Dominik*, *Astron. and Astrophys.* **417**, 159 (2004).
28. *A. Tannirkulam, T. J. Harries, and J. D. Monnier*, *Astrophys. J.* **661**, 374 (2007).
29. *M. Flock, S. Fromang, N. J. Turner, and M. Benisty*, *Astrophys. J.* **835**, id. 230 (2017).
30. *В. А. Амбарцумян*, *Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз.* **3**, 97 (1942).
31. *S. Chandrasekhar*, *Radiative Transfer* (Oxford: Clarendon Press, 1950).
32. *В. В. Соболев*, *Перенос лучистой энергии в атмосферах звезд и планет* (М.: ГИТТЛ, 1956).
33. *J. E. Rodriguez, J. Pepper, K. G. Stassun, R. J. Siverd, P. Cargile, T. G. Beatty, and B. S. Gaudi*, *Astron. J.* **146**, id. 112 (2013).
34. *N. Rostopchina*, *Astron. Rep.* **43**, 113 (1999).
35. *V. P. Grinin, O. V. Kozlova, A. Natta, I. Ilyin, I. Tuominen, A. N. Rostopchina, and D. N. Shakhovskoy*, *Astron. and Astrophys.* **379**, 482 (2001).
36. *R. L. Kurucz*, CD-ROM 13 (1993).
37. *N. E. Piskunov, F. Kupka, T. A. Ryabchikova, W. W. Weiss, and C. S. Jeffery*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **112**, 525 (1995).
38. *F. G. Kupka, T. A. Ryabchikova, N. E. Piskunov, H. C. Stempels, and W. W. Weiss*, *Baltic Astronomy* **9**, 590 (2000).

39. *T. Ryabchikova, N. Piskunov, R. L. Kurucz, H. C. Stempels, U. Heiter, Y. Pakhomov, and P. S. Barklem*, *Physica Scripta* **90**, id. 054005 (2015).
40. *V. Tsymbal*, in *M.A.S.S., Model Atmospheres and Spectrum Synthesis*, edited by *S. J. Adelman, F. Kupka, and W. W. Weiss*, *ASP Conf. Ser.* **108**, 198 (1996).
41. *J. E. Rodriguez, R. Loomis, S. Cabrit, T. J. Haworth, et al.*, *Astrophys. J.* **859**, 150 (2018).
42. *S. G. Shulman*, *Astrophysics* **59**, 20 (2016).
43. *I. S. Potravnov, V. P. Grinin, and N. A. Serebriakova*, *Astron. and Astrophys.* **630**, id. A64 (2019).
44. *W. J. de Wit, V. P. Grinin, I. S. Potravnov, D. N. Shakhovskoi, A. Muller, and M. Moerchen*, *Astron. and Astrophys.* **553**, id. L1 (2013).
45. *G. M. Kennedy, C. Ginski, M. A. Kenworthy, M. Benisty, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **496**, L75 (2020).
46. *J. S. Vink*, *Astrophys. Space Sci.* **357**, 98 (2015).
47. *P. Safier*, *Astrophys. J.* **408**, 115 (1993).
48. *V. P. Grinin, L. V. Tambovtseva, and G. Weigelt*, *Astron. and Astrophys.* **544**, id. A45 (2012).
49. *P. P. Petrov, G. F. Gahm, A. A. Djupvik, E. V. Babina, S. A. Artemenko, and K. N. Grankin*, *Astron. and Astrophys.* **577**, id. A73 (2015).
50. *A. Dodin, K. Grankin, S. Lamzin, A. Nadjip, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **482**, 5524 (2019).
51. *B. Rodgers, D. H. Wooden, V. Grinin, D. Shakhovsky, and A. Natta*, *Astrophys. J.* **564**, 405 (2002).