

ЭФФЕКТ РОССИТЕРА-МАКЛАФЛИНА В
ИЗЛУЧЕНИИ ЗВЕЗД ТИПА UX OriВ.П.ГРИНИН^{1,2}, И.С.ПОТРАВНОВ^{1,2}

Поступила 10 ноября 2012

Рассматривается возможность обнаружения изменений лучевых скоростей звезд типа UX Ori во время затмений околозвездными пылевыми облаками. Расчеты показывают, что, несмотря на большие размеры облаков, этот эффект может быть реально наблюдаем и, возможно, уже наблюдался во время спектральных наблюдений звезд этого типа. Мониторинг таких событий может дать важную информацию о движении вещества в ближайших окрестностях молодых звезд, а также о структуре газопылевых облаков, экранирующих звезды.

Ключевые слова: *звезды: типа UX Ori; лучевые скорости*

1. *Введение.* Звезды типа UX Ori занимают особое место среди молодых звезд. По своим основным характеристикам они не отличаются от других молодых звезд таких же спектральных типов. Главным их отличием является бурная фотометрическая активность. В начале девяностых годов были получены доказательства того, что эта активность обусловлена сильным наклоном околозвездных дисков относительно картинной плоскости [1]. Экранирование звезд непрозрачными фрагментами газопылевых дисков и является причиной сильных изменений их блеска.

С изменениями блеска связана также специфическая спектральная переменность, наблюдаемая у звезд этого типа: при ослаблениях блеска в их спектрах увеличиваются эквивалентные ширины эмиссионной линии H α и ряда других линий [2-6]. Это вызвано тем, что пылевые облака, экранирующие звезду от наблюдателя и вызывающие ослабления ее блеска, не экранируют полностью более протяженную эмиссионную область, в которой образуется эмиссионный спектр звезды. В результате эмиссия в линиях хотя и ослабляется во время минимумов, но не так сильно, как непрерывный спектр, образующийся в фотосфере звезды¹.

В данной заметке мы обращаем внимание на то, что изменения блеска звезд типа UX Ori должны сопровождаться также деформациями профилей линий поглощения, образующихся в атмосферах звезд, что должно

¹ Кроме спектральной переменности, вызванной затмениями, эмиссионные линии в спектрах звезд типа UX Ori флуктуируют вследствие нестабильности процесса аккреции околозвездного вещества на звезды (см. например, [6-9]).

приводить к кажущимся изменениям их лучевых скоростей RV . Эффект, который обсуждается ниже, имеет ту же природу, что и эффект Росситера-МакЛафлина (далее Р-М эффект), впервые наблюдавшийся указанными выше авторами при спектральных наблюдениях затменных двойных звезд [10,11].

2. *Эффект Росситера-МакЛафлина в условиях звезд типа UX Ori.* Физика Р-М эффекта весьма проста: в начале затмения закрывается один край вращающейся звезды, а при выходе из затмения - противоположный. В результате происходит деформация профилей линий поглощения. Это приводит к кажущемуся смещению лучевой скорости затмеваемой звезды сначала в одну сторону, затем в обратную. Р-М эффект наблюдался во многих затменных двойных системах. Его амплитуда зависит от глубины затмений. При прочих равных условиях она тем больше, чем больше скорость вращения звезд. В последние годы этот эффект удалось наблюдать при прохождении экзопланет (extrasolar planets) по диску звезд (см., например, [12-14] и цитированную там литературу), что позволило получить уникальные сведения о наклоне планетных орбит относительно экваториальной плоскости родительских звезд.

Если бы околозвездные облака, экранирующие звезды типа UX Ori, имели резкие границы, то на входе в затмение и на выходе из него можно было бы наблюдать максимальный Р-М эффект с амплитудой изменения лучевой скорости звезды RV , равной ее удвоенной скорости вращения (рис.1). Знак изменения RV при изменении блеска зависит от того, является ли движение облака по орбите прямым или обратным в системе координат вращающейся звезды. В случае прямого вращения наблюдатель увидит при входе в затмение смещение абсорбционного спектра звезды в красную сторону, а при выходе из затмения - в синюю. В случае обратного вращения

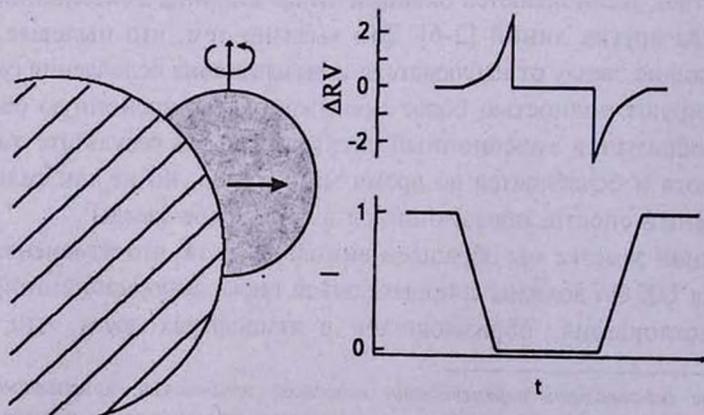


Рис.1. Схематическая картина Р-М эффекта.

облака последовательность событий будет противоположной описанной выше.

Основная особенность Р-М эффекта в условия звезд типа UX Oг1 состоит в том, что пылевые облака, экранирующие эти звезды, значительно превышают размеры звездного диска. К тому же они, по-видимому, не имеют резких границ и могут быть полупрозрачными. Поэтому амплитуда изменений лучевых скоростей звезд при затмениях должна быть значительно меньше, чем в описанном выше предельном случае.

Чтобы оценить ожидаемые масштабы этого явления, рассмотрим две простые ситуации.

2.1. *Модель с полупрозрачным экраном.* Предположим для простоты, что потемнение от центра диска к краю отсутствует, линии в спектре звезды расширены только ее вращением, которое предполагается твердотельным, ось вращения совпадает с картинной плоскостью. Ниже в расчетах скорость вращения и радиус звезды приняты за единицу. В этом случае профиль линии поглощения от всего диска звезды описывается простым соотношением: $I_0(x) = 1 - a(1 - x^2)^{1/2}$, где a - глубина линии (в дальнейшем полагаем $a = 1$), x - расстояние от центра линии, выраженное в единицах скорости вращения звезды.

Поскольку глубокие затмения звезд типа UX Oг1 наблюдаются довольно редко, рассмотрим сначала случай, когда луч зрения пересекает полупрозрачное пылевое облако. Такие ситуации наблюдаются довольно часто и приводят к небольшим по амплитуде флуктуациям излучения вблизи яркого состояния звезд. Предположим, что а) градиент плотности в облаке совпадает с направлением его движения и перпендикулярен оси вращения звезды (рис.2), б) экстинкция в облаке меняется так, что излучение от разных частей диска ослабляется по линейному закону: $\tau(x) = \tau_0(1 - x)$, в котором переменной величиной является безразмерное расстояние x произвольной точки на диске

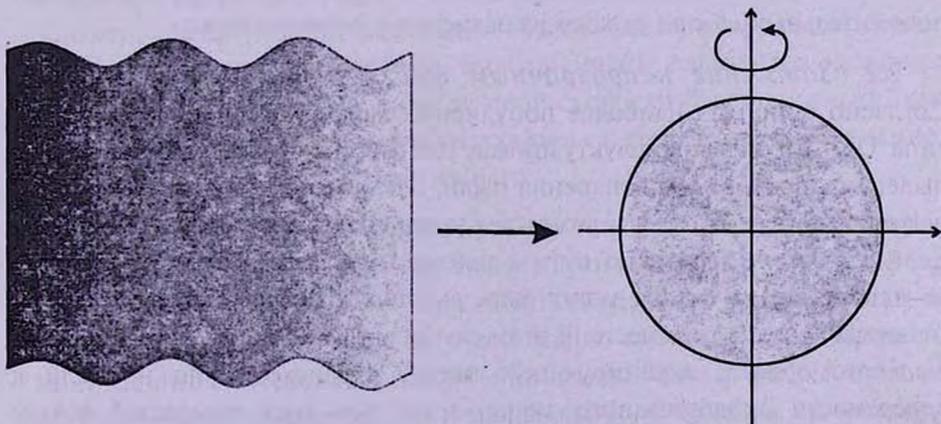


Рис.2. Схематическая картина затмения в модели с полупрозрачным пылевым облаком.

звезды от оси. При твердотельном вращении это расстояние равно безразмерному расстоянию от центра профиля линии поглощения. В этой модели профиль абсорбционной линии после прохождения излучения сквозь слой пыли имеет вид:

$$I(x) = I_0(x)e^{-\tau(x)} \approx I_0(x)(1 - \tau(x)) = (1 - \sqrt{1-x^2})(1 - \tau_0(1-x)). \quad (1)$$

Здесь τ_0 - оптическая толщина пылевого слоя на линии $x=0$, (то есть, в проекции на ось вращения звезды); безразмерное расстояние x меняется в интервале от -1 до $+1$ при прохождении от одного края диска звезды к другому.

Чтобы найти кажущееся изменение лучевой скорости звезды, вызванное искажением профиля абсорбционной линии, необходимо вычислить эквивалентную ширину линии и определить положение бисектора x_0 , который делит ее на две зоны, равные по эквивалентной ширине. Уравнение бисектора имеет вид:

$$\int_{-1}^{x_0} f(x) dx = \int_{x_0}^1 f(x) dx, \quad (2)$$

где $f(x) = \sqrt{1-x^2}(1 - \tau_0(1-x))$. Выполняя здесь интегрирование и разлагая полученные выражения в ряд по степеням τ_0 , получаем с учетом первых ненулевых членов разложения: $x_0 \approx \tau_0/3$. Отсюда следует, что в рассматриваемой модели затмения изменение лучевой скорости звезды на 5% (в единицах скорости ее вращения) получается при оптической толщине $\tau_0 = 0.15$. Такое изменение может быть надежно измерено, особенно если учесть, что скорость вращения многих звезд типа UX Опі достигает 100 км/с и более [15]. Поскольку околосредные облака являются фрагментами протопланетных дисков и, следовательно, вращаются в том же направлении, что и сама звезда, то приращение ее лучевой скорости при входе в затмение будет положительным, а при выходе из затмения - отрицательным.

2.2. Затмение непрозрачным фрагментом пылевого диска.

Согласно одной из наиболее популярных моделей [16], затмения звезд типа UX Опі вызваны флуктуациями плотности на внутренней границе пылевого диска, в зоне испарения пыли. В этой зоне в результате прямого нагрева излучением звезды возникает утолщение (puffed-up inner rim) [17]. Если излучение звезды по пути к наблюдателю пересекает эту область, то изменения ее блеска могут быть вызваны флуктуациями локальной толщины диска в этом месте. В этом случае следует ожидать, что движение пылевого облака, экранирующего звезду, происходит по нормали к поверхности околосредного диска, а так как диск вращается вокруг звезды, то смещение облака по диску звезды будет происходить примерно так, как это схематически показано на рис.3. При этом, если перемещение

пылевого экрана по диску звезды, происходит в основном за счет вращения околозвездного диска, то асимметрия затмения, необходимая для создания Р-М эффекта, в этом случае обязательно должна присутствовать. Ее можно промоделировать, используя экран с резкой границей, наклоненной относительно линии экватора звезды на угол α .

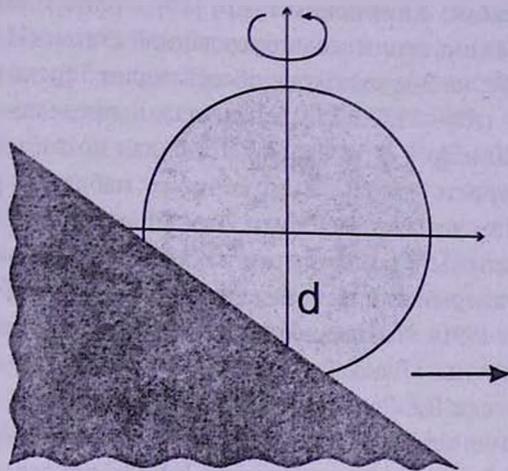


Рис.3. Иллюстрация к модели затмения непрозрачным фрагментом околозвездного диска.

Рассмотрим для простоты случай, когда $\alpha \ll 1$. При расчете Р-М эффекта в этой модели мы использовали аналогичный прием разложения интеграла (2) в ряд по малому параметру α . Оказалось, что максимальное смещение безразмерной лучевой скорости звезды в процессе затмения (оно достигается, когда граница экрана пересекает центр диска звезды и параметр d на рис.3 равен нулю) $x_0 \approx \alpha/2$, где угол α выражен в радианах. Таким образом, в этой модели изменение блеска звезды в процессе затмения может сопровождаться заметными вариациями RV , если угол α не слишком мал. При этом знак изменения лучевой скорости будет таким же, как и в предыдущей модели: положительным - при входе в затмение и отрицательным - при выходе из него.

3. *Обсуждение и заключение.* Сделанные выше оценочные расчеты показывают, что, несмотря на небольшую амплитуду, Р-М эффект в излучении звезд типа UX Ori, может быть обнаружен. Важно сочетать при этом спектральные наблюдения с достаточно плотным фотометрическим мониторингом. Необходимо знать не только блеск звезды в момент спектральных наблюдений, но и направление, в котором он меняется.

3.1. *RZ Psc - перспективный объект для наблюдений Р-М эффекта.* Измерения лучевых скоростей звезд типа UX Ori в таком режиме до сих

пор не проводились. Анализируя опубликованные в литературе данные об измерениях лучевых скоростей звезд этого типа, которые выполнялись хотя бы несколько раз, мы нашли довольно интересный эпизод в поведении лучевой скорости RZ Psc - одной из звезд этого семейства. Измерения лучевой скорости этой звезды выполнялись в разное время Шевченко и др. [18] - 8 измерений, Каминским и др. [19] - одно измерение, и одно измерение было сделано одним из авторов данной статьи (И.П.) по спектру, полученному в 2009г. на 2-м телескопе обсерватории Терскол [20]. Результат наших измерений ($RV = -1.5 \pm 2$ км/с) совпал в пределах их точности с данными Шевченко и др. (-2.5 ± 2 км/с), тогда как по данным Каминского и др. лучевая скорость звезды в момент их наблюдений была равна -11.75 ± 1.1 км/с. Нам удалось выяснить, что наблюдения RZ Psc в работах [18,19] были выполнены в одном и том же 1991г. В первой из этих работ лучевая скорость измерялась с помощью астроспидометра Токовинина с 21 января по 3 февраля 1991г. Наблюдения, опубликованные в статье Каминского и др., были выполнены 17 декабря 1991г.³ К сожалению нам не удалось найти данные о блеске RZ Psc в ту ночь. Поэтому не ясно, что послужило причиной изменения лучевой скорости этой звезды. Можно, однако, определенно сказать, что из всех звезд типа UX Oг1 эта звезда должна быть более всего подвержена действию Р-М эффекта, поскольку наблюдаемые у нее ослабления блеска происходят очень быстро и продолжаются, как правило, не более двух дней [21]. Это указывает на компактную структуру пылевых облаков, затмевающих звезду, что как раз оптимально для наблюдений Р-М эффекта. Если движение облаков по их орбитам происходит в том же направлении, что и вращение звезды (что представляется наиболее вероятным), то, как отмечалось выше, при падении блеска звезды наблюдатель будет наблюдать смещение ее лучевой скорости в направлении положительных значений (соответствующих движению от наблюдателя). При увеличении блеска картина должна быть обратной.

Наблюдения Р-М эффекта в излучении звезд типа UX Oг1 представляют большой интерес по двум причинам. Во-первых, знание истинной лучевой скорости (свободной от флуктуаций, вызванных Р-М эффектом) необходимо при поиске маломассивных компаньонов по наблюдениям колебаний RV , вызванных их орбитальным движением. Существование таких компаньонов в ближайших окрестностях звезд типа UX Oг1 заподозрено в ряде работ на основании наблюдений фотометрических циклов и их численного моделирования (см. [22,23] и цитированную там литературу). Во-вторых, наблюдения этого эффекта позволят использовать звездный диск в качестве

³ Авторы благодарны А.А.Токовину и Б.М.Каминскому за информацию о датах наблюдений, на основе которых в [18,19] были выполнены измерения лучевой скорости RZ Psc.

естественного масштаба для определения градиента плотности в облаках, вызывающих затмения. В частности, таким путем можно попытаться обнаружить прохождения по диску звезды формирующихся планет и окружающих их газопылевых оболочек, размеры которых могут быть меньше диаметра звездного диска. Из-за небольших размеров такие объекты не могут вызвать сильный фотометрический эффект, но зато могут породить заметные искажения фотосферных линий из-за большого градиента экстинкции по диску звезды. Поскольку основной вклад в околозвездную экстинкцию дают мелкие пылинки, в результате чего она увеличивается с уменьшением длины волны, то обнаружить Р-М эффект в излучении звезд типа UX Ori будет проще в синей области спектра.

Возвращаясь к RZ Psc, следует подчеркнуть, что по данным [20] это самая старая звезда из семейства звезд типа UX Ori: ее возраст порядка 30-40 млн лет, что в несколько раз превышает характерное время диссипации протопланетных дисков (около 10^7 лет). По этой причине ни одна из двух обсуждаемых сейчас моделей фотометрической активности звезд типа UX Ori (в результате поглощения излучения на внутренней границе аккреционного диска, в зоне сублимации пыли [16], или в запыленном дисковом ветре [24,25]), в данном случае неприменима из-за отсутствия у звезды аккреционного диска. Поэтому дополнительные сведения о структуре плотных сгустков пыли, экранирующих RZ Psc, которые могут быть получены при изучении Р-М эффекта, могут пролить свет на их происхождение.

Авторы благодарны А.Ф.Холтыгину за обсуждение статьи и полезные замечания. Работа выполнена по программе Президиума РАН П 21 "Нестационарные явления в объектах Вселенной", при поддержке гранта ФЦП "КАДРЫ" N 1.2.1 и гранта ведущей научной школы НШ-1625.2012.2.

¹ Главная (Пулковская) Астрономическая обсерватория РАН, С.-Петербург, Россия, e-mail: vgsrao@mail.ru

² Астрономический институт им. В.В.Соболева, С. Петербургский государственный университет, Петровворец, С.-Петербург, Россия

ROSSITER-MCLAUGHLIN EFFECT IN THE RADIATION OF UX Ori STARS

V.P.GRININ^{1,2}, I.S.POTRAVNOV^{1,2}

The possibility to detect changes in the radial velocity of UX Ori type stars during eclipses by circumstellar dust clumps is discussed. Estimations show that,

despite the large size of the clumps, this effect can be measured, and feasibly observed already during the spectroscopic investigations of UXOR's. Monitoring of such events can provide important information about matter kinematic in the vicinity of young stars.

Key words: *stars:of type UX Ori:radial velocity*

ЛИТЕРАТУРА

1. *V.P.Grinin, N.N.Kiselev, G.P.Chernova, N.Kh.Minikulov, N.V.Voshchinnikov*, *Astrophys. Sp. Sci*, **186**, 283, 1991.
2. *Е.А.Калотилов*, *Астрофизика*, **13**, 33, 1980.
3. *V.P.Grinin, P.S.T/he, D. de Winter et al.*, *Astron. Astrophys.*, **292**, 165, 1994.
4. *О.В.Козлова, В.П.Григин, А.Н.Ростопчина, Д.Н.Шаховской*, *Астрон. ж.*, **77**, 42, 2000.
5. *B.Rodgers, D.Wooden, V.Grinin et al.*, *Astrophys. J.*, **564**, 405, 2002.
6. *V.P.Grinin, O.V.Kozlova, A.Natta et al.*, *Astron. Astrophys.*, **379**, 482, 2001.
7. *A.Mora, A.Natta, C.Eiroa et al.*, *Astron. Astrophys.*, **393**, 259, 2002.
8. *I.Mendiguiti'a, C.Eiroa, B.Montesinos et al.*, *Astron. Astrophys.*, **529**, 34, 2011.
9. *R.Choudhury, H.C.Bhatt, G.Pandey*, *Astron. Astrophys.*, **526**, 97, 2011.
10. *R.A.Rossiter*, *Astrophys. J.*, **60**, 15, 1924.
11. *D.B.McLaughlin*, *Astrophys. J.*, **60**, 22, 1924.
12. *D.Queloz, A.Eggenberger, M.Mayor et al.*, *Astron. Astrophys.*, **359**, L13, 2000.
13. *J.Winn, A.W.Howard, J.A.Johnson et al.*, *Astrophys. J.*, **703**, 2091, 2009.
14. *F.Pont, M.Endl, W.D.Cochran*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **402**, 1, 2010.
15. *B.Montesinos, C.Eiroa, A.Mora, B.Merín*, *Astron. Astrophys.*, **495**, 901, 2009.
16. *C.P.Dullemond, M.E. van den Ancker, B.Acke, R. van Boekel*, *Astrophys. J.*, **594**, L47, 2003.
17. *A.Natta, T.Prusti, R.Neri et al.*, *Astron. Astrophys.*, **371**, 186, 2001.
18. *В.С.Шевченко, Е.А.Витриченко, К.Н.Гранкин и др.*, *Письма в Астрон. ж.*, **19**, 334, 1993.
19. *Б.М.Каминский, Г.У.Ковальчук, А.Ф.Пугач*, *Астрон. ж.*, **77**, 689, 2000.
20. *V.P.Grinin, I.S.Potravnov, F.A.Musaev*, *Astron. Astrophys.*, **524**, A8, 2010.
21. *Г.В.Зайцева*, *Переменные звезды*, **22**, 181, 1985.
22. *Т.В.Демидова, В.П.Григин, Н.Я.Сотникова*, *Письма в Астрон. ж.*, **36**, 498, 2010.
23. *В.П.Григин, А.Н.Ростопчина, О.Ю.Барсунова, Т.В.Демидова*, *Астрофизика*, **53**, 407, 2010.
24. *D.Vinković, T.Jurkić*, *Astrophys. J.*, **658**, 462, 2007.
25. *Л.В.Тамбовцева, В.П.Григин*, *Письма в Астрон. ж.*, **34**, 259, 2008.