АСТРОФИЗИКА

TOM 51

МАЙ, 2008

выпуск 2

ЗАПЫЛЕННЫЙ ДИСКОВЫЙ ВЕТЕР В МОЛОДЫХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМАХ, НАБЛЮДАЕМЫХ С ПОЛЮСА

Л.В.ТАМБОВЦЕВА Поступила 11 января 2008 Принята к печати 13 февраля 2008

Рассматривается модель молодой двойной системы с неравными по массе компаньонами, плоскость орбиты которой наклонена под большим углом к лучу зрения. Предполагается, что компоненты системы аккрецируют вещество из остатков протозвездного облака. Показано, что в таких системах могут наблюдаться затмения главного компонента дисковым ветром вторичного компонента даже в тех случаях, когда плоскость орбиты наклонена под большим углом к лучу зрения, или даже наблюдается с полюса.

Ключевые слова: звезды: двойные: пыль

1. Введение. Изучение молодых затменных систем (МЗС), которые еще продолжают аккрецировать вещество из остатков протозвездного облака, имеет важное значение для понимания физических процессов в окрестностях этих звезд. В отличие от классических затменных систем, в которых одна звезда экранирует от наблюдателя другую, затмения в МЗС могут осуществляться потоками вещества, которые периодически проникают во внутренние области системы из остатков протозвездного облака [1]. Продолжительность таких затмений может быть сравнима с орбитальным периодом. Реально они могут наблюдаться лишь в двойных системах, орбиты которых наклонены под небольшим углом к лучу зрения. Еще одна модель затмений МЗС, для реализации которой также необходим небольшой наклон общего диска, окружающего двойную систему (в дальнейшем мы будем называть его СВ-диском от английского "circumbinary"), предложена недавно Уинн и др. [2] и Чангом и Мэррэй-Клей [3] для объяснения необычных затмений, наблюдаемых в M3C КН 15D. В их модели периодические затмения компонентов системы осуществляются СВ-диском. Для этого необходимо выполнение следующих условий: система должна иметь большой эксцентриситет и должна быть некомпланарна СВ-диску, который к тому же должен быть выгнут и лишь слегка наклонен к лучу зрения. Ясно, что выполнение одновременно всех этих условий делает эту экзотическую модель затмений довольно редко встречающейся.

Наименьшие ограничения на угол наклона плоскости M3C к лучу зрения имеют место в модели затмений запыленным дисковым ветром, предложенной в работе [4]. Это связано с тем, что дисковый ветер, имеющий в первом приближении форму конуса, способен подниматься довольно высоко над плоскостью системы. В процессе ускорения происходит амбиполярная диффузия: ионизованная плазма передает часть импульса нейтральному газу, нагревая его до температуры порядка 10⁴ K [5]. При этом атомы газа увлекают за собой мелкие (размером не более 1 мм [5]) частицы пыли, которые не успевают сублимировать даже находясь в контакте с горячим газом ветра [6]. В результате пыль также может подниматься довольно высоко над плоскостью системы. Расчеты показали [4], что затмения могут иметь разнообразные формы и могут наблюдаться даже при углах наклона плоскости орбиты 30°.

В данной статье показано, что в двойных системах с эксцентрическими орбитами затмения дисковым ветром возможны даже в тех случаях, когда система наблюдается с полюса.

2. Дисковый ветер в молодой двойной системе. Предполагается, что дисковый ветер испускается аккреционным диском вторичного маломассивного компаньона в молодой двойной системе. Последний вращается по эксцентрической орбите вокруг главного компаньона и аккрецирует вещество из остатков протозвездного облака СВ-диска. Дисковый ветер состоит из слабо взаимодействующих между собой фрагментов, которые рассматриваются как независимые (пробные) частицы. Детальное описание модели и метода расчета дано в статье [4].

Кратко изложим суть модели. В двойной системе маломассивный компаньон является главным аккретором [7]. С поверхности его аккреционного диска внутри конуса с определенными внешним и внутренним углами выбрасываются частицы ветра, состоящие из газа и пыли в "стандартной" пропорции 1:100. Истечение вещества происходит одинаково в обе стороны от аккреционного диска, т.е. выполняется условие зеркальной симметрии. В системе координат главного компонента ветер становится асимметричным изза векторного сложения скоростей самого ветра и орбитального движения вторичного компонента вычислялись в баллистическом приближении; имитировался квазинепрерывный процесс, т.е. частицы выбрасывались через равные и очень малые по сравнению с орбитальным периодом, промежутки времени. Счет прекращался, когда частицы достигали предельного расстояния от барицентра системы R_{mer}

При расчетах масса главного компонента принята равной $1 M_{\odot}$. Параметрами задачи являются: эксцентриситет орбиты *е*, угол наклона плоскости орбиты к лучу зрения θ , угол α , под которым выбрасываются частицы ветра (значение $\alpha = 0$ соответствует направлению, ортогональному плоскости системы), $R_{out} = 500$ а.е. Большая полуось орбиты принята равной 3 а.е. Кроме того, параметрами задачи являются радиальная V и тангенциальная U компоненты скорости ветра¹, выраженные в единицах кеплеровской скорости вторичного компонента в периастре орбиты. Величина этой скорости зависит от эксцентриситета *е* и лежит в интервале ~25-40 км/с. Параметры моделей приведены в табл.1.

Таблица 1

Модель	α	V	U	е
Α	60	2	0	0.5
В	60	2	0	0.3
С	60	2	0	0.7
D	60	1	1	0.5
E	60	2	1	0.5
F	40-60	2	0	0.5

ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛЕЙ

3. Результаты. На рис.1 в качестве примера показано распределение вещества в общей оболочке, образованной дисковым ветром



Рис.1. Модель А: распределение вещества в общей оболочке молодой двойной системы, образованной дисковым ветром вторичного компонента. Плоскость орбиты системы показана штриховой линией. Вторичный компонент находится в точке с координатами X = 1, Y = 0. Координаты главного компонента в плоскости XY равны (0,0). Все координаты выражены в единицах большой полуоси орбиты вторичного компонента.

¹ Заметим, что эдесь рассматривается, так называемая, медленная компонента дискового ветра, поскольку, согласно современным представлениям (см. например, [8]), именно в ней происходит основная потеря массы и углового момента.

Л.В.ТАМБОВЦЕВА

вторичного компонента в модели А. В это время второй компаньон сделал 10 оборотов по орбите и находится в периастре. Его координаты, выраженные в единицах большой полуоси: X = 1, Y = 0. Главный компонент находился в точке X = 0, Y = 0. Как видно из рис.1, при эксцентрической орбите распределение вещества в общей оболочке асимметрично относительно вертикальной оси.

Чтобы определить фотометрический эффект, создаваемый общей оболочкой на больших широтах, мы рассчитали колонковые плотности на луче зрения, проходящего под углами 70, 80, 85 и 90 градусов (вид



Рис.2. Кривые блеска, рассчитанные для модели А при различных углах наклона плоскости диска к лучу зрения (они отмечены справа). Кривые различаются положением наблюдателя относительно двойной системы: а) в периастре, с) в апоастре и в двух промежуточных положениях между ними b) и d) (детали в тексте). Кривые блеска рассчитаны на длине волны, соответствующей полосе V.



Рис.3. Зависимость кривых блеска от эксцентриситета орбиты (вид с полюса): модель а) В (e = 0.3), b) А (e = 0.5) и с) С (e = 0.7). Темп потери массы равен $10^{-7} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$.

270

с полюса) к центральной плоскости СВ-диска и соответствующие им кривые блеска (рис.2-5).

При расчетах оптических характеристик пылевой компоненты дискового ветра принято такое же соотношение пыли к газу, как в межзвездной среде (1:100). Для простоты рассматривается графито-силикатная смесь пылевых частиц, аналогичная по химическому составу межзвездной пыли (MRN-смесь, [9]). Распределение частиц по размерам тоже соответствует MRN-смеси.

В двойных системах с эллиптическими орбитами концентрация частиц на луче зрения в направлении на главный компонент (в дальнейшем мы будем называть эту величину колонковой плотностью пробных частиц N) зависит не только от фазы орбитального периода ϕ и наклона плоскости орбиты к лучу зрения θ , но также и от ориентации орбиты относительно наблюдателя [10]. Мы рассмотрели четыре варианта ориентации орбиты вторичного компонента относительно наблюдателя (см. ниже), для каждого из которых были рассчитаны колонковые плотности пробных частиц N, как функции ϕ , и соответствующие оптические толщины τ . Переход от N к колонковой плотности реальных частиц N_d описан в работах [4] и [10]. Поперечное сечение колонки в данных расчетах σ принималось равным 0.2*a* x 0.2*a*, где *a* большая полуось орбиты вторичного компонента.

3.1. Амплитуды и формы кривых блеска. Как и в статьях [4] и [10], при вычислении ослаблений блеска двойной системы, вызванных изменениями экстинкции на луче зрения, принято, что основным источником излучения является главный компонент, который при расчетах рассматривался как точечный источник. Поток излучения от него ослабляется при прохождении сквозь пылевую компоненту дискового ветра в $e^{-\tau}$ раз. При $\tau >> 1$, когда прямое излучение главного компонента сильно ослаблено, поток излучения определяется рассеянным излучением околозвездной пыли, которое включает также рассеянное излучение общей оболочки. Рассеянный свет дает лишь небольшую, (зависящую в общем случае от фазы орбитального периода [10]) добавку к прямому излучению молодой звезды и его основная функция состоит в том, что он ограничивает амплитуду минимумов в тех случаях, когда прямое излучение звезды сильно ослаблено поглощением в околозвездной среде. Такие ограничительные функции рассеянного излучения околозвездных дисков молодых звезд хорошо известны в случае звезд типа UX Огі, блеск которых испытывает сильные ослабления, обусловленные переменной околозвездной экстинкцией [11]. Ниже при расчетах кривых блеска поток рассеянного излучения принят для простоты постоянным и равным 0.1 потока излучения звезды. С учетом этого

л.в.тамбовцева

$$F_{obs} = \frac{L_s}{4\pi D^2} e^{-\tau} + F_{sc} , \qquad (1)$$

где D - расстояние до наблюдателя.

На рис.2-5 показано семейство кривых блеска, рассчитанных для ряда моделей двойной системы. Для простоты принято, что поток рассеян-



Рис.4. Зависимость кривых блеска от кинематики встра (вид с полюса): модели D (а) и E (b). Кривые блеска показаны штриховой линией. Для сравнения сплошной линией показана кривая блеска для модели А. Темп потери массы равен 10⁻⁷ M_e год⁻¹.



Рис.5. Кривые блеска для модели F (система видна с полюса). Сплошная линия: $\dot{M}_{w} = 10^{-7} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$, штриховая линия: $\dot{M}_{w} = 10^{-8} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$.

ного излучения не зависит от фазы орбитального периода и равен 0.1*F*. Расчеты выполнены для длины волны 5500, соответствующей максимуму полосы пропускания *V*. Коэффициент поглощения, рассчитанный на грамм вещества, равен 250 см²/г.

Рис.2 представляет теоретические фотометрические минимумы блеска для модели А. При малых углах наклона орбиты формы кривых блеска и их амплитуды сильно различаются между собой (см., например,

272

[10]). Как видно из рис.2, с увеличением наклона орбиты продолжительность затмений увеличивается, а различия между кривыми блеска, рассчитанными при разных ориентациях системы (а - со стороны периастра, b - с позиции, где фаза равна 0.25, с - со стороны апоастра или d - с позиции, где фаза = 0.75) постепенно исчезает, что вполне естественно. Поэтому для остальных моделей мы представляем только кривые блеска, рассчитанные в случаях, когда двойная система видна с полюса. Видно, что при достаточно мошном дисковом ветре (в расчетах использовано значение темпа потери массы: $M_w = 10^{-7} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$) фотометрические мимнимумы достаточно глубоки даже в этих случаях. На рис.3 показаны кривые блеска для моделей А, В и С. Модели различаются только одним параметром - эксцентриситетом орбиты *е*. Видно, что чем больше эксцентриситет, тем уже и глубже минимум. Таким образом, форма кривых блеска может хотя бы приближенно характеризовать параметры двойной системы.

Форма и амплитуда кривых блеска зависят также и от начальных скоростей ветра. Модели D и E отличаются от модели A только тем, что в них тангенциальная компонента скорости ветра не равна нулю и принимается равной кеплеровской скорости в периастре. Между собой модели различаются лишь значением радиальной скорости. На рис.4 кривые блеска для обеих моделей (штриховая линия) сравниваются с кривыми блеска в модели A (сплошная линия). Темп потери массы одинаков для всех моделей. Из рисунка видно, что скорость вращения ветра влияет на глубину затмения (уменьшая ее по сравнению с чисто радиальным ветром), но не меняет принципиально формы минимума. Из этого же рисунка можно сделать вывод, что форма затмения слабо зависит от кинематических параметров ветра.

В моделях А - Е угол α , под которым частицы ветра выбрасываются из аккреционного диска вторичного компонента, принят равным 45°. Для сравнения в модели F частицы ветра выбрасываются случайным образом под разными углами к оси симметрии в интервале $\alpha = 40 - 60^{\circ}$. Эта модель является более реалистичной с точки зрения геометрии дискового ветра. Кривые блеска для нее представлены на рис.5. Они рассчитаны для двух значений темпа потери массы: $M_w = 10^{-8}$ и $10^{-7} M_{\odot}$ год⁻¹. Из рисунка можно видеть, что заметные по амплитуде затмения могут наблюдаться лишь при $M_w \ge 10^{-7} M_{\odot}$ год⁻¹. Такие значения темпа аккреции и потери массы в виде дискового ветра вполне приемлемы для молодых звезд типа T Тельца.

Представленные выше теоретические кривые блеска напоминают по своей форме и продолжительности кривые блеска, полученные во время общирных затмений некоторых молодых объектов, в частности, молодой

Л.В.ТАМБОВЦЕВА

звезды типа Т Тельца Н 187 в скоплении IC 348 ([12,13]). Вопрос о применимости рассмотренной модели к таким объектам зависит от ряда факторов, таких, как изменение лучевой скорости главного компонента в разных фазах затмений, уровень аккреционной активности компонентов системы и др., и требует отдельного рассмотрения.

4. Заключение. Таким образом, как показывают расчеты, затмения в молодой двойной системе, находящейся на ранних стадиях эволюции, могут иметь место даже в тех случаях, когда такая система наклонена под большим углом к лучу зрения или даже наблюдается с полюса. Для этого необходимо выполнение двух условий: двойная система должна иметь заметный эксцентриситет орбиты и достаточно высокий темп истечения вещества из аккреционного диска вторичного компонента ($M_w \ge 10^{-7} M_{\odot}$). При этом роль затмевающего "тела" выполняет пылевая компонента дискового ветра. Главной отличительной особенностью таких затменных двойных звезд являются заметный эксцентриситет орбиты и малая (в пределе – нулевая) амплитуда изменений лучевой скорости ее компонентов.

Работа выполнена по программе Президиума РАН "Происхождение и эволюция звезд.

Главная астрономическая обсерватория РАН Пулково, С.-Петербург, Россия, e-mail: tamb@gao.spb.ru

DUSTY DISK WIND IN YOUNG BINARIES SEEN POLE-ON

L.V.TAMBOVTSEVA

The model of the young binary system with non equal masses, whose orbital plane is inclined under the large angle to the line of sight (LOS) is considered. It is supposed that the system components accrete the matter from the remnant of the protostellar cloud. We showed that in such systems one could see obscuration of the primary by the disk wind from the secondary companion even when the orbital plane was inclined under the large angle to the LOS or when such systems were observed pole-on.

Key words: stars: binaries: dust

274

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Н.Я.Сотникова, В.П.Гринин, Письма в Астрон. ж., 33, 667, 2007.
- 2. J.N.Winn, M.J.Holman, J.A Johnson et al., Astrophys. J., 603, L45, 2004.
- 3. E.I. Chiang, R.A. Murray-Clay, Astrophys. J., 607, 913, 2004.
- 4. В.П.Гринин, Л.В.Тамбовцева, Письма в Астрон. ж., 28, 667, 2002.
- 5. P.Safier, Astrophys. J., 408, 115, 1993.
- 6. Л.В. Тамбовцева, В.П.Гринин, Письма в Астрон. ж., 2008 (в печати).
- 7. P.Artymowicz, S.Lubow, Astrophys. J., 467, L77, 1996.
- 8. A.P. Goodson, K.-H.Böhm, R.M. Winglee, Astrophys. J., 524, 142, 1999.
- 9. J.M. Mathis, W.Rumpl, K.H. Nordsieck, Astrophys. J., 217, 425, 1977.
- 10. В.П.Гринин, Л.В.Тамбовцева, Н.Я.Сотникова, Письма в Астрон. ж., 30, 764, 2004.
- 11. В.П.Гринин, Письма в Астрон. ж., 14, 27, 1988.
- 12. R.E. Cohen, W. Herbst, E.C. Williams, Astrophys. J., 596, L243, 2003.
- 13. В.П.Гринин, О.Ю.Барсунова, С.Г.Сергеев, Н.Я.Сотникова, Т.В.Демидова, Письма в Астрон. ж., 32, 918, 2006.