АСТРОФИЗИКА

ТОМ 55 НОЯБРЬ, 2012 ВЫПУСК 4

HH 588: ГИГАНТСКИЙ БИПОЛЯРНЫЙ ПОТОК В ТЕМНОМ ОБЛАКЕ BRC 37

Т.А.МОВСЕСЯН[1], Т.Ю.МАГАКЯН[1], Д.М.САРГСЯН[1], К.ОГУРА[2]

Поступила 17 июля 2012
Принята к печати 12 сентября 2012

В данной работе приводятся результаты двумерной спектроскопии комплекса объектов Хербига-Аро HH 588 в темной глобуле BRC 37. С помощью многозрачкового спектрографа ВАГР были получены спектры четырех участков этого комплекса, включающих объекты NE2, NE1, center и SW2. Полученные кинематические характеристики компонентов комплекса подтверждают существование гигантского биполярного истечения из центрального инфракрасного источника IRAS 21388+5622. Спектральные исследования показали также, что центральный объект имеет очень низкое возбуждение и сильные эмиссии [OI] и [SII], характерные для джетов, истекающих из молодых звездных объектов. Прочие компоненты по физическим параметрам являются типичными объектами Хербига-Аро. С другой стороны, показано, что весь комплекс HH 588 является иррадиированным потоком Хербига-Аро. Об этом свидетельствует сравнительно высокое возбуждение объекта NE2, а также то, что весь поток HH 588 представляет собой дугу, ориентированную выпуклостью к центру области HII IC 1396.

Ключевые слова: *глобулы:потоки и объекты Хербига-Аро - объект HH 588*

1. *Введение*. Среди темных облаков и отдельных глобул в областях звездообразования в Галактике достаточно часто встречаются объекты, погруженные в HII-области или расположенные вблизи них. Такие облака, освещенные горячими звездами, имеют яркие края, называемые также римами. Излучение подсвечивающих их звезд не только рассеивается на пылевых частицах, но и частично ионизирует газ по краям облака. Поэтому римы имеют смешанную эмиссионно-отражательную природу. Подобные облачка и глобулы часто являются активными очагами звездообразования (см, например, обзор [1]). Триггером звездообразования предположительно служит давление ионизационных и ударных фронтов, распространяющихся от горячих звезд внутри областей HII, хотя в отдельных случаях возможен и свободный коллапс облаков.

Хорошо известно, что процесс звездообразования объектов средней и малой массы сопровождается возникновением направленных истечений из молодых звездных объектов. При взаимодействии с окружающей средой в облаках эти направленные истечения образуют потоки и объекты Хербига-Аро (HH-объекты, HH-потоки) [2]. При этом источниками потоков часто являются звезды, глубоко погруженные в облака и видимые только в

инфракрасном диапазоне [3]. Хотя эмиссионный спектр HH-объектов возбуждается ударами, те из них, которые располагаются в облаках вблизи горячих звезд, могут оказаться под воздействием их УФ-излучения. Подобные HH-объекты и потоки имеют промежуточное ударно-радиативное возбуждение и поэтому называются иррадиированными [4]. Возникновение иррадиированных HH-потоков особенно вероятно как раз в небольших очагах звездообразования, погруженных в области HII.

Облако BRC 37 [1] представляет собой одну из многочисленных глобул с ярким римом в HII-области IC 1396, которая, по всей видимости, связана с ассоциацией Cep OB2 [5], расположенной на расстоянии 750-800 пк [6,7]. В этой глобуле был обнаружен протяженный комплекс объектов Хербига-Аро HH 588, который состоит из двух ярких HH-объектов (NE2 и SW2), а также центрального и ряда промежуточных сгустков, которые тянутся с северо-востока на юго-запад, общим размером 6 угловых мин (что соответствует 1.4 пк) [1]. Яркие HH-объекты расположены симметрично относительно центрального сгустка и имеют вид хорошо выраженных дугообразных фронтов. Впоследствии был обнаружен еще один слабый эмиссионный узел (NE3) [8]; тем самым протяженность данного потока еще увеличилась. Рядом с центральным HH-объектом находится ИК-источник IRAS 21388+5622 со светимостью 130 $L_\odot$ [9]. По-видимому, именно он является также центром молекулярного истечения, направленного с севера на юг [6]. Судя по всему, поток HH 588 образован биполярным истечением из IRAS 21388+5622, а его центральный объект, имеющий, несмотря на малые размеры, продолговатую форму, представляет собой HH-джет, выбрасываемый из IRAS 21388+5622. Общая морфология потока явно указывает, что его наиболее отдаленные компоненты уже вырвались из пылевого облака и продолжают движение внутри протяженной области HII.

Поток HH 588 заинтересовал нас как, во-первых, еще один явный случай очень протяженного биполярного HH-истечения; во-вторых, как хороший кандидат для поисков внешней иррадиации. Подробные исследования оптических сгустков потока HH 588 до настоящего времени не проводились. Для изучения их природы мы применили метод двумерной спектроскопии. В разделе 2 описано получение наблюдательных данных и методика их обработки, в разделе 3 детально рассмотрены результаты и их интерпретация, общие итоги настоящей работы подведены в разделе 4.

2. *Наблюдения и обработка данных*. Двумерная спектроскопия была проведена с 2002 по 2005гг. на 2.6-м телескопе Бюраканской обсерватории с помощью мультизрачкового спектрографа VAGR [10], работающего в первичном фокусе и ПЗС-приемника Loral 2048×2048 пк. Поле зрения спектрографа имеет круглую форму поперечником 40″ с масштабом 1″ на зрачок. Для исключения перекрытия спектров от отдельных зрачков исполь-

зовались интерференционные светофильтры. Наблюдения проводились в двух режимах. В первом использовалась гризма с дисперсией 2.1 Å/pix (G600) и фильтр с полосой пропускания 6400-6800 Å; во втором - гризма с дисперсией 0.6 Å/pix (VPHG1800) с фильтрами Hα ($\lambda_c = 6560$Å, $\Delta\lambda = 85$Å) и [SII] ($\lambda_c = 6730$Å, $\Delta\lambda = 75$Å).

На рис.1 приведено взятое из работы [1] прямое изображение области HH 588, полученное в фильтре [SII]. Кругами показаны поля, наблюдавшиеся с помощью мультизрачкового спектрографа. В табл.1 приведен журнал наблюдений, где указаны дата, использованная гризма и фильтр, а также время экспозиции для каждого поля.

Таблица 1

ЖУРНАЛ НАЛЮДЕНИЙ

Объект	Дата	Гризма	Диапазон	Экспозиция (с)
BRC37 NE2	29.10.2002	G600	6400A - 6800A	2400
BRC37 NE1	29.10.2002	G600	6400A - 6800A	3600
BRC37 SW2	15.11.2002	G600	6400A - 6800A	2400
BRC37 NE1	01.09.2003	G600	6400A - 6800A	4800
BRC37 NE2	01.09.2003	G600	6400A - 6800A	1200
BRC37 SW2	01.09.2003	G600	6400A - 6800A	1200
BRC37 NE1	17.12.2004	VPHG1800	6517A - 6602A	3600
BRC37 Center	03.07.2005	VPHG1800	6690A - 6765A	3600
BRC37 NE2	18.12.2004	VPHG1800	6517A - 6602A	3600
BRC37 SW2	18.12.2004	VPHG1800	6517A - 6602A	3600

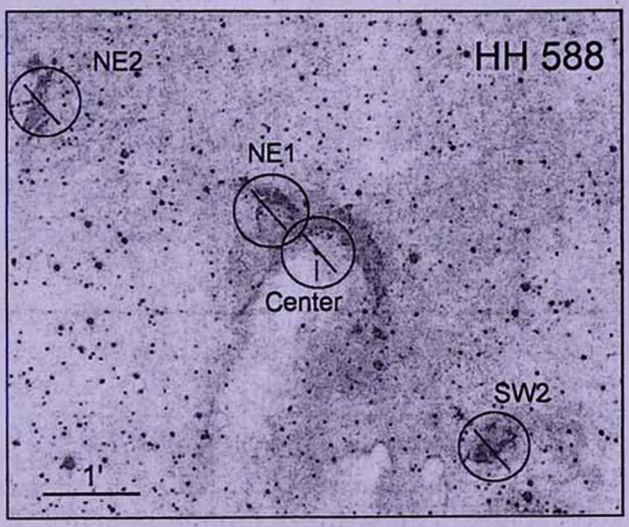

Рис.1. Изображение комплекса HH 588, полученное в эмиссионных линиях [SII] [1]. Отмечены основные составляющие комплекса. Круги указывают участки неба, охваченные двумерной спектроскопией, а прямые линии - положения псевдощелей, построенных на основе полученных кубов данных (см разд. 3.5).

Обработка данных была проведена с помощью программного пакета ADHOCw [11], а также отдельных программ, разработанных в среде IDL. Для восстановления изображений объектов в эмиссионных линиях были рассчитаны интенсивности линий в спектрах, полученных от каждого зрачка. Так как микро-линзы (зрачки) спектрографа имеют шестигранную форму, прямоугольные изображения были построены при помощи интерполяции. Аналогичным образом были построены поля лучевых скоростей и физических параметров в каждой области.

3. *Результаты*. Наблюдаемые размеры потока HH 588 значительно превосходят поле зрения спектрографа. По этой причине для получения двумерных спектров были выбраны четыре наиболее ярких и интересных области (NE1, NE2, SW2 и center) (см рис.1). Интегральные спектры каждого отдельного компонента были получены суммированием спектров от соответствующих зрачков спектрографа. На рис.2 приведены эти суммарные спектры для трех основных компонентов комплекса HH 588. Спектр центрального объекта не показан, поскольку он снимался с большим разрешением, и только в диапазоне дублета серы. Отсутствие континуума и наличие ярких эмиссий Hα, [SII] и [NII] характерно для HH-объектов и подтверждает природу данного комплекса.

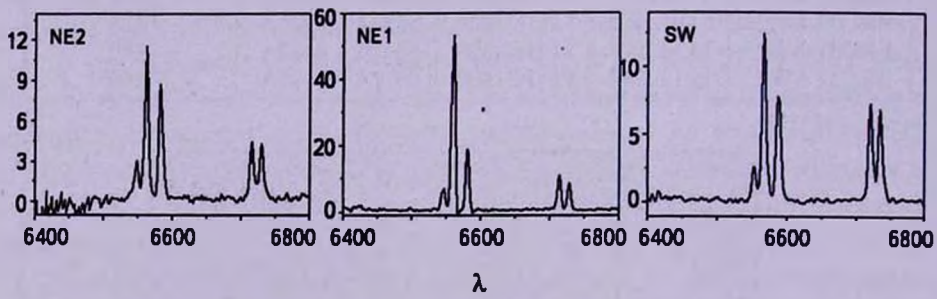

Рис.2. Интегральные спектры трех наиболее ярких компонентов в комплексе HH 588.

В табл.2 приведены усредненные отношения интенсивностей эмиссии Hα и суммарной эмиссии дублетов [SII] и [NII] в этих трех объектах, а также отношения интенсивностей линий [SII]6716/[SII]6731 дублета серы и рассчитанные по этим отношениям электронные плотности. Из трех сгустков

Таблица 2

РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРОФОТОМЕТРИИ HH 588

Объект	I(Hα)/ I([SII])	I(Hα)/ I([NII])	$I([SII]_{6716})/I([SII]_{6731})$	n_e	V_r
NE1	2.7	2.1	1.3	120	-80
NE2	1.3	1.0	1.0	395	-70
SW2	0.9	1.2	1.1	605	+125
Center	-	-	0.64	3100	-170

выделяется NE1 с сильной эмиссией Hα, что свидетельствует о более высокой степени возбуждения в центральной области комплекса HH 588. В этой области также наблюдается низкая по сравнению с NE2 и SW2 электронная плотность. В центральном объекте отношение интенсивностей линий серы свидетельствует о довольно большой электронной плотности (см табл.2).

Теперь перейдем к рассмотрению каждого компонента HH 588 по отдельности. Для наглядности на рис.3, 4 и 5 представлены восстановленные карты интенсивностей объектов NE2, NE1 и SW2 соответственно в эмиссионных линиях Hα, [NII] λ 6583 Å и [SII] λλ 6716 + 6730 Å. Непрерывный спектр от звезд поля вычтен.

3.1. *NE2*. По номенклатуре, принятой в работе [1], объект NE2 делится на несколько отдельных сгустков. Из них в поле спектрографа попал только сгусток *A* и некоторая часть сгустка *B*, видная в нижней части рисунка. Из рис.3 видно, что объект имеет вытянутую форму с довольно неоднородной структурой, наиболее ярко выраженной в эмиссиях серы и хорошо согласующейся с прямыми изображениями, приведенными в статье [1]. В частности, в эмиссии Hα сгусток *A* состоит из двух ярких уплотнений, обозначенных как *A1* и *A2*, однако в запрещенных линиях сгусток *A1* разделяется на более мелкие компоненты.

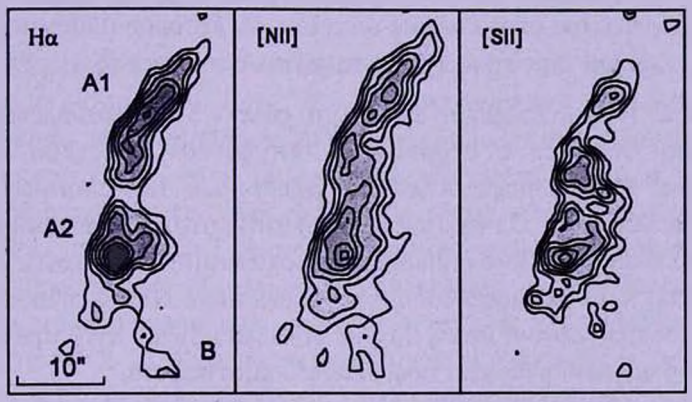

Рис.3. Восстановленные изображения объекта HH 588 NE2 в эмиссиях Hα, [NII] λ 6583 Å и [SII] λλ 6716 + 6730 Å.

Из этого следует, что отношение интенсивности эмиссии Hα к [SII] меняется в объекте NE2 от сгустка к сгустку и достигает минимума в центре объекта ($I(\lambda 6563)/I(\lambda\lambda 6716+6730)=1.2$). По плотности изолиний можно заметить, что градиент яркости выше в северо-восточном крае. Это явление характерно для так называемой рабочей поверхности джетов [12].

3.2. *NE1*. На рис.4 представлены карты интенсивностей объекта NE1, который примыкает к северо-западной стороне яркого рима в глобуле BRC 37. Восстановленное изображение объекта в линиях [SII] хорошо

соответствует прямому изображению в тех же линиях, представленному в работе [1]. На рис.4 мы отметили отдельные сгущения *A*, *B*, *C* и *D* в соответствии с принятыми в [1] обозначениями. Западная часть сгустка *C* является на деле частью вышеупомянутого яркого рима, который в основном выходит за пределы поля мультизрачкового спектрографа.

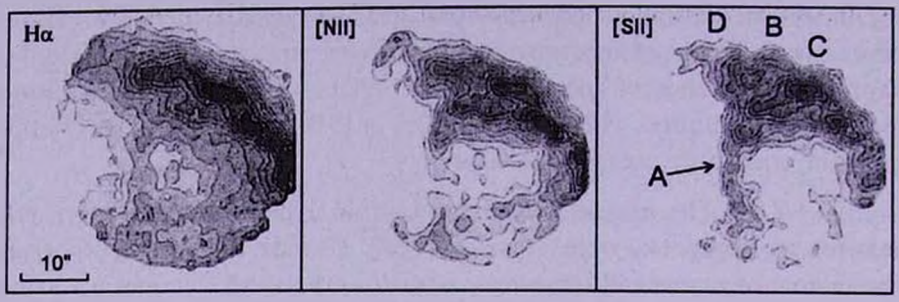

Рис.4. Восстановленные изображения объекта HH 588 NE1 и прилегающей туманности в эмиссионных линиях (см рис.3).

Как видно из рис.4, в эмиссии Hα объект занимает почти все поле спектрографа, но с северо-западного края выделяется яркая дугообразная структура, включающая сгустки *B*, *C* и *D*. От сгустка *B* на юг тянется слабое продолговатое образование (сгусток *A*), которое напоминает дугообразный ударный фронт и лучше заметно в линиях [SII].

3.3. *SW2*. На рис.5 хорошо видно, что объект SW2 в комплексе HH 588 имеет форму эллипса с отростком, тянущимся в северо-западном направлении. Морфология объекта в различных эмиссионных линиях заметно не изменяется. Однако нужно отметить, что наибольший градиент яркости наблюдается в юго-западном направлении. Тем самым ситуация выглядит зеркально-симметричной по отношению к NE2 и свидетельствует в пользу предположения, что в потоке HH 588 объект SW2 представляет собой терминальную рабочую поверхность контрджета.

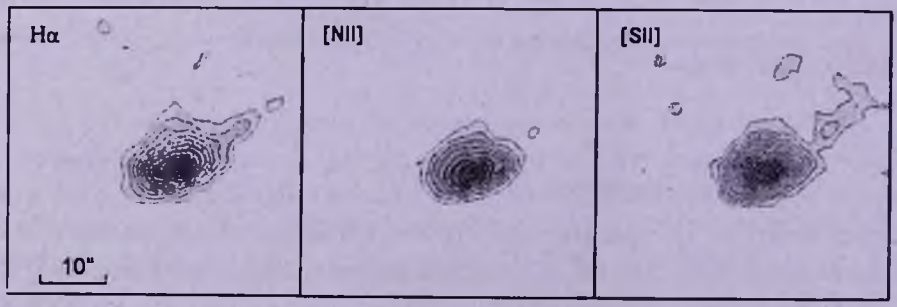

Рис.5. Восстановленные изображения объекта HH 588 SW2 в эмиссионных линиях (см рис.3).

3.4. *HH 588 Center*. Центральный объект представляет собой очень компактный, но все же не полностью звездообразный сгусток, наблюдающийся в основном в эмиссии [SII] (рис.6). Он расположен в голове глобулы, к югу от ее яркого края. Объект находится в эллипсе ошибок координат источника IRAS 21388+5622. Однако отсутствие каких-либо признаков непрерывного спектра указывает на его HH-природу.

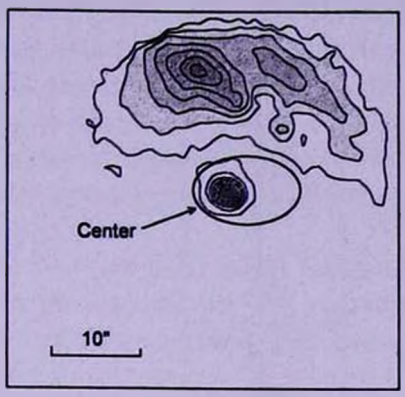

Рис.6. Восстановленное изображение центрального объекта в комплексе HH 588 в линиях [SII] λλ 6716 + 6730 Å . У верхнего края рисунка видна часть яркого рима. Эллипс показывает разброс координат IRAS 21388+5622.

3.5. *Кинематика комплекса*. Несмотря на вполне типичную морфологию комплекса HH 588, для окончательного доказательства существования здесь биполярного истечения были необходимы данные о лучевых скоростях. С этой целью, как уже описывалось в разд. 2, мы провели наблюдения с гризмой, дающей высокое спектральное разрешение. В последнем столбце табл.2 приведены средние значения гелиоцентрических лучевых скоростей для отдельных составляющих HH 588. Хорошо видно, что положительное значение лучевой скорости наблюдается только в компоненте SW2; во всех остальных объектах скорости отрицательные. Используя возможности, предоставляемые двумерной спектроскопией, мы построили диаграммы позиция-скорость в псевдощелях, вырезанных из кубов данных в ориентации NE-SW для каждого сгустка, т.е. в направлении предполагаемого истечения из IRAS 21388+5622. Эти диаграммы показаны на рис.7. Как видно, помимо общей биполярности, хорошо заметны градиенты лучевой скорости, а именно спад абсолютных значений лучевой скорости при удалении от центрального источника в объектах NE2 и SW2, а в NE1 - наоборот, ее увеличение.

4. *Обсуждение и заключение*. Полученные результаты двумерной спектроскопии однозначно подтверждают предположение о том, что комплекс HH 588 представляет собой оптический биполярный поток из

ИК-источника IRAS 21388+5622. Как уже отмечалось выше, центральный объект, имеющий наибольшее абсолютное значение лучевой скорости, по всей видимости, является исходящим из IRAS 21388+5622 и направленным к наблюдателю джетом, который подошел к краю глобулы. В пользу этого говорит его повышенная плотность при очень низком возбуждении и позиционная близость к ИК-источнику. Зеркально-симметричные сгустки NE2 и SW2 отождествляются с рабочими поверхностями коллимированного

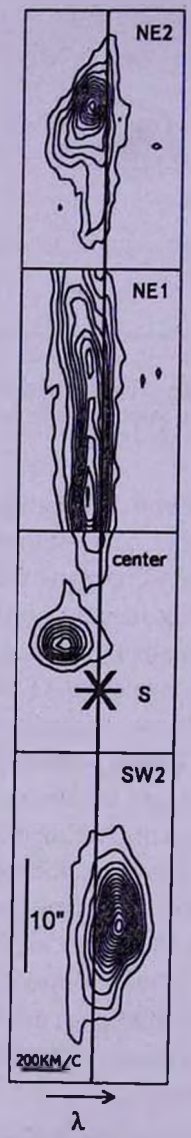

Рис.7. Диаграммы позиция-скорость для отдельных составляющих HH 588, построенные в направлении NE-SW (см также рис.1). Звездочкой отмечено положение предполагаемого источника IRAS 21388+5622.

истечения, которые уже после выхода из темного облака продолжают движение в более разреженном пространстве. Это заключение вполне согласуется с наличием градиентов скорости в обоих этих сгустках, по-видимому, обусловленных торможением потока в окружающей среде. Уровень возбуждения сгустка SW2 заметно ниже, чем у NE2, что может объясняться его движением в более разреженной среде.

Объект NE1 заслуживает отдельного упоминания. Несмотря на некоторую ограниченность данных, имеющихся в нашем распоряжении, можно сделать вполне определенный вывод о том, что NE1 явно имеет более высокий уровень возбуждения по сравнению с NE2 и SW2, поскольку к ударному возбуждению здесь, вероятно, добавляется радиативное. Фактически, только высокая отрицательная лучевая скорость позволяет выделить NE1 на фоне яркого края облака BRC 37.

Другим аргументом в пользу частичной иррадиированности комплекса HH 588 является то обстоятельство, что составляющие этого (весьма протяженного) потока не ложатся на прямую линию, а описывают плавную дугу, ориентированную выпуклостью к центру IC 1396. Согласно [4], подобная морфология присуща иррадиированным потокам и вызывается световым давлением от горячих звезд в центре HII-областей.

Размеры данного потока довольно велики. Действительно, если учесть недавно обнаруженный компонент NE3 [8], то общая наблюдаемая длина потока оказывается порядка 2 пк даже в проекции. Между тем наклон потока HH 588 к плоскости неба должен быть существенным, на что указывают весьма заметные абсолютные значения лучевых скоростей обеих его ветвей, а значит, его истинные размеры могут быть еще больше. Поэтому HH 588 следует отнести к категории гигантских HH-потоков [12,13].

Данная работа была поддержана грантом ANSEF PS-astroex-2761.

[1] Бюраканская обсерватория им. В.А.Амбарцумяна, Армения, e-mail: tigmov@web.am
[2] Университет Кокугакуин, Токио, Япония

HH 588: A GIANT BIPOLAR OUTFLOW IN THE BRC 37 DARK CLOUD

T.A.MOVSESSIAN[1], T.Yu.MAGAKIAN[1], D.M.SARGSYAN[1], K.OGURA[2]

We present the results of a 2D spectroscopy of the HH 588 Herbig-Haro objects complex in the BRC 37 dark globule. The spectra of four parts of this

complex, including the NE2, NE1, center and SW2 objects, were obtained with the VAGR multi-pupil spectrograph. The kinematical characteristics of the complex components confirm the existence of a giant bipolar outflow from the central infrared source IRAS 21388+5622. The spectral studies also show that the central object has very low excitation and strong [OI] and [SII] emissions, characteristic for the jets from young stellar objects. Other components represent the typical Herbig-Haro objects. It is shown also that the whole HH 588 complex is the irradiated Herbig-Haro flow. This is evident from the relatively high excitation of the NE2 object and from the shape of the whole HH 588 outflow, which represents itself an arc oriented by its convexity to the center of the IC 1396 HII region.

Key words: *globules: Herbig-Haro objects and flows - individual:HH 588*

ЛИТЕРАТУРА

1. *K.Ogura*, *K.Sugitani*, *A.Pickles*, Astron. J., **123**, 2597, 2002.
2. *J.Bally*, *B.Reipurth*, *C.J.Davis*, Protostars & Planets V, 2007, p.215.
3. *R.J.White*, *T.P.Greene*, *G.W.Doppmann*, *K.R.Covey*, *L.A.Hillenbrand*, Protostars & Planets V, 2007, p.117.
4. *J.Bally*, *B.Reipurth*, Astrophys. J., **546**, 299, 2001.
5. *M.Kun*, *Z.T.Kiss*, *Z.Balog*, in "Handbook of Star-Forming Regions, V.I", ASP Monograph Publications, Vol. 4. ed. B.Reipurth, p.136.
6. *G.Duvert*, *J.Chernicharo*, *R.Bachiller*, *J.Gomez-Gonzalez*, Astron. Astrophys., **233**, 190, 1990.
7. *H.E.Matthews*, Astron. Astrophys., **75**, 345, 1979.
8. *D.Froebrich*, *A.Scholz*, *J.Eislöffel*, *G.C.Murphy*, Astron. Astrophys., **432**, 575, 2005.
9. *K.Sugitani*, *H.Matsuo*, *M.Nakano*, *M.Tamura*, *K.Ogura*, Astron. J., **119**, 323, 2000.
10. *T.Movsessian*, *J.-L.Gach*, *J.Boulesteix*, *F.Zhamkotsian*, Baltic Astronomy, **9**, 51, 2000.
11. ADHOCw, http://www.oamp.fr/adhoc/adhocw.htm
12. *B.Reipurth*, *J.Bally*, Ann. Rev. Astron. Astrophys., **39**, 403, 2001.
13. *B.Reipurth*, *J.Bally*, *D.Devine*, Astron. J., **114**, 2708, 1997.