

УДК 523.947

Формирование звезды в активной области в Орионе – КЛ

В.А. Демичев, Л.И. Матвеевко

Институт Космических Исследований РАН, Россия, demichev@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 28 февраля 2006 г.

Аннотация. Исследована тонкая структура активной области H_2O -супермазерного излучения в туманности Ориона. В первом периоде активности 1979-1987 H_2O -супермазерное излучение определялось тонкой $\simeq 0.3$ а.е., вытянутой $\simeq 27$ а.е. структурой, с компактными, до $\simeq 0.05$ а.е. компонентами. Яркостные температуры компактных компонент достигают $T_b \simeq 10^{16}$ К. Их скорости меняются вдоль структуры с градиентом ~ 0.16 км/с/а.е. в центральной области. Структура соответствует аккреционному диску на стадии разделения на протопланетные кольца, наблюдаемому с ребра. Компактные компоненты соответствуют тангенциальным направлениям колец. Звездный ветер и радиация сублимируют гранулы льда в кольцах, формируя мазерные кольца – гало. Скорость их вращения $V \simeq \Omega R$ на расстояниях до ≤ 7 а.е., период обращения $T \simeq 180$ лет. Излучение колец сконцентрировано в азимутальной плоскости и имеет высокую направленность ($\leq 10^{-3}$). Структура окружена оболочкой, усиливающей мазерное излучение более чем на два порядка на скорости 7.6 км/с, в окне 0.5 км/с. Во эпоху молчания 1995 г. и второй период активности 1998-1999 гг обнаружен яркий ($T_b \simeq 10^{16}$ К), компактный ($\simeq 0.05$ AU) источник-эжектор, и высоко коллимированный биполярный поток на скорости $V = 7.6$ км/с. Излучение колец не обнаружено, что вероятно связано с прецессией диска. Таким образом тонкая структура – аккреционный диск, высококоллимированный биполярный поток и оболочка соответствует раннему этапу формирования звезды.

STAR FORMATION IN ACTIVE REGION IN ORION KL, by V.A. Demichev, L.I. Matveenko. The fine structure of an active region of H_2O supermaser emission is investigated in Orion KL. In first period of the high activity 1979-1987 the H_2O maser emission is determined by the fine $\simeq 0.3$ AU elongated $\simeq 27$ AU structure with compact $\simeq 0.05$ AU components. Brightness temperatures of the compact components reaches $T_b \simeq 10^{16}$ K. Its velocities are changed and gradient is equal to 0.16 km/s/AU. The structure corresponds to an accretion disk, separating into protoplanetary rings, observed edge-on. The compact components correspond to tangential directions of the rings. The stellar wind and radiation sublimate ice granules of the rings, accelerate H_2O molecules, and form maser halos. Rotation velocity $V \simeq \Omega R$ on the distances ≤ 7 AU, and rotation period $T \simeq 180$ yrs. The structure is surrounded by an envelope, which amplifies maser emission by more than two orders of magnitude at velocity 7.65 km/s. The bright ($T_b \simeq 10^{16}$ K), compact ($\simeq 0.05$ AU) source – an ejector, and high collimated bipolar outflow are observed at $V=7.65$ km/s in the second period of activity 1998-1999. An emission of the maser rings has high directivity ($\leq 10^{-3}$) and concentrated in the azimuth plane. A precession is changed orientation of the disk and rings emission do not visible in the second period of activity. Our results show that a fine

accretion disk, high-collimated bipolar outflow, and envelope – accompanied the earliest stage of the star formation.

Ключевые слова: H₂O-мазеры, области звездообразования, аккреционные диски, биполярные потоки

1 Введение

Гравитационная неустойчивость в газопылевых комплексах приводит к формированию активных зон, содержащих протозвезды в стадии гравитационного сжатия. Процессы формирования протозвезд сопровождаются мощным мазерным излучением в линиях водяного пара, достигающим десятков кЯн. В отдельных чрезвычайно редких случаях наблюдаются мощные H₂O-мазерные вспышки до миллионов янских, природа которых до конца не ясна. (Берк и др., 1972; Матвеевко и др., 1980). В туманности Ориона компактные мазерные источники сосредоточены в 8 активных зонах, размеры которых $\simeq 1000$ а. е. (рис. 1) (Гензел и др., 1978). Скорости мазерных источников лежат в пределах нескольких десятков км/с. Наблюдалось два периода высокой активности детали на скорости $\simeq 8$ км/с – в 1979–1987 гг. и 1998–1999 гг. Плотности потоков радиоизлучения H₂O-мазерных вспышек достигали 8 мЯн, ширины профилей спектральных линий были $\Delta V \simeq 0.5$ км/с. Координаты активной области равны RA = $5^h 35^m 14^s.121$ и DEC = $05^\circ 22' 36''.27$ (2000.0). Мы исследовали сверхтонкую структуру области супермазерного H₂O-излучения в Орионе KL с помощью радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами на международной сети VLBI и VLBA. Угловое разрешение достигает $\simeq 0.1$ мсек. дуги. На расстоянии до Ориона, равном 450 пк, это соответствует $\simeq 0.045$ а.е.

2 Первый период активности

Период высокой активности 1979–1987 гг. сопровождался мощными вспышками H₂O-мазерного излучения. Плотности потоков мазерного излучения вспышек достигали $F = 1\text{--}8$ мЯн, длительность отдельных из них не превышала нескольких дней, в среднем повышенная активность продолжалась в течение нескольких месяцев (Абрахам и др., 1986; Гарей и др., 1989). Профиль линии супермазерного излучения имел вид гауссоиды с высокоскоростным либо низкоскоростным “хвостом” на скорости $\simeq 8$ км/с. Ширина профиля линии по уровню 0.5 равна $\Delta V \simeq 0.5$ км/с (рис. 1). Наиболее полные измерения на глобальной сети VLBI были проведены в октябре 1985 г. Структура активной области состоит из цепочки ярких компактных компонент, распределенных вдоль тонкой $\simeq 0.3$ а. е. протяженной S-образной структуры длиной $\simeq 27$ а. е. Яркостная температура протяженной составляющей $T_b \simeq 10^{11}$ К, а яркость компактных компонент в центральной части $V \simeq 7.6$ км/с достигает $T_b \simeq 10^{16}$ К. (рис. 2). (Демичев, Матвеевко, 2004).

Внешняя часть структуры искривлена подобно полям шляпы. Установлено, что скорости компонент, расположенных в центральной части диаметром 15 а. е., пропорциональны их относительному положению $V \simeq \Omega R$. (рис. 2 справа).

3 Период молчания и активность 1998-1999 гг.

Наблюдения активной области в период низкой активности эпохи 1995.6 показали, что мазерное излучение в линии H₂O в диапазоне скоростей 8 км/с не превышает 1 кЯн. Исследования со сверхвысоким угловым разрешением на VLBA обнаружили в предполагаемой области высококоллимированный биполярный поток с ярким компактным центральным источником, но цепочка компонент 1985 г. отсутствовала, либо ее излучение было ниже обнаружимого (рис. 3, Матвеевко и др., 1998). Биполярный поток ориентирован в направлении RA = 33° , его яркостная температура

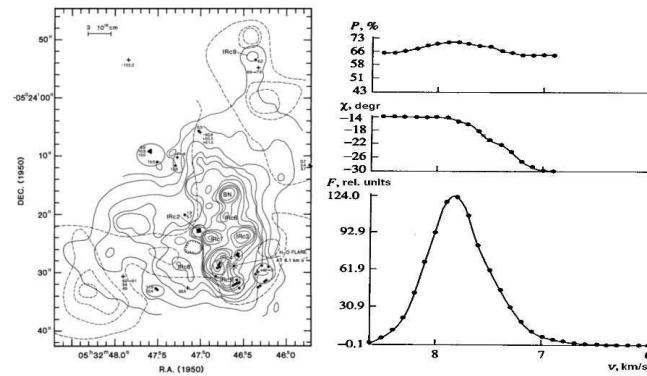


Рис. 1. Активные зоны в туманности Ориона (слева). Профиль вспышки супермазерного излучения (справа)

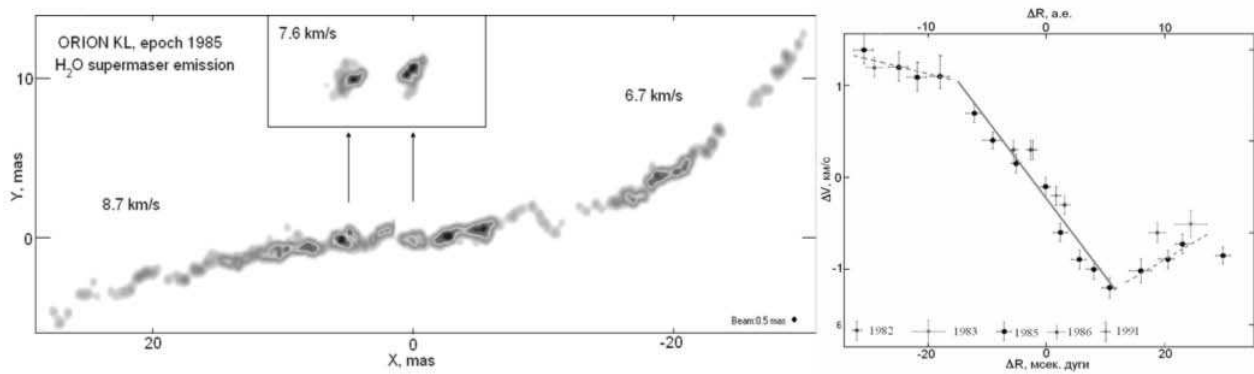


Рис. 2. Структура активной области – 1985 г. (слева). Распределение скоростей компактных компонент в различные эпохи (справа)

$T_b \approx 10^{12}$ К. Компактный яркий источник в центральной части биполярного потока – сопло. Инжектируемый поток на выходе сопла ориентирован под углом $RA = 44^\circ$, яркостная температура достигает $T_b \approx 10^{13}$ К. Скорость инжектора равна $V_{LSR} = 7.63$ км/с. В пределах активной области наблюдаются кометообразные выбросы – пули. Юго-восточная пуля удалена от инжектора на 18.5 а. е. в направлении $RA = 132^\circ$. Она имеет кометоподобный вид; голова-хвост, ее радиальная скорость равна $V_{||} = 0.32$ км/с (рис. 3). Но голова “кометы” находится сзади хвоста. Скорость “кометы” невелика и радиационное давление и звездный ветер сдувают хвост вперед. Северо-западная пуля удалена на 32.5 а. е. в направлении $RA = 54^\circ$. Ее относительная скорость равна $V_{||} = 0.18$ км/с. Яркостные температуры пуль равны $T_b \approx 10^{12}$ К.

В феврале 1998 г. мазерное излучение структуры начало экспоненциально расти и достигло максимального значения $F = 4.3$ мЯн в августе-октябре. В ноябре начался экспоненциальный спад и в мае 1999 г. излучение достигло первоначального уровня (Матвеевко и др. 2004). Структура активной области осталась практически такой же, как и в эпоху 1995.6. (см. рис. 3) Профиль линии имел гауссовый вид, ее скорость сохранилась прежней $V = 7.65$ км/с, а ширина равна ≈ 0.5 км/с. Сохранение скорости и ширины линии свидетельствует об усилении излучения структуры во внешней среде – оболочке более чем на три порядка. Как и раньше наблюдаются кометообразные пули, но голова кометы впереди хвоста. Биполярный поток высоко коллимирован, его размер 2.5×0.2 а. е. (рис. 3 справа). Повышение H₂O-мазерного излучения вызвано увеличением

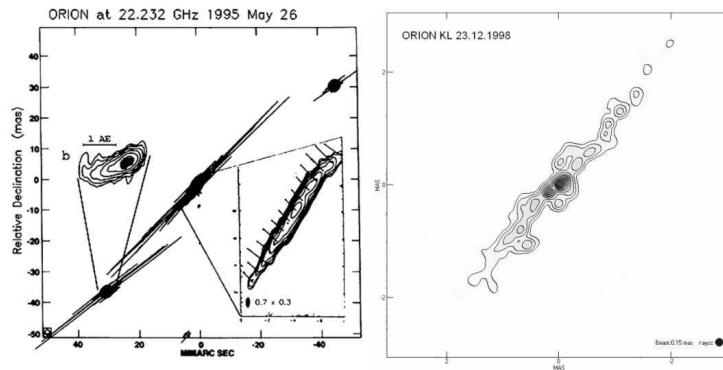


Рис. 3. Структура в период молчания (слева) и в активный период (справа)

яркости структуры более чем на три порядка. Яркостная температура биполярного потока возросла до $T_b \simeq 10^{15}$ К, а инжектора до $T_b \simeq 5 \times 10^{16}$ К. Анализ параметров структуры за весь период активности показал, что относительные радиальные скорости потоков равны $V_{NW||} = 0.3$ км/с и $V_{SE||} = 0.3$ км/с. В картинной плоскости скорости потоков в период, предшествующий повышенной активности, $V_{NW} = 10$ км/с и $V_{SE} = 8$ км/с, достигают $V_{NW} = 6.8$ км/с и $V_{SE} = 5.0$ км/с в максимуме излучения, а затем снижаются до $V_{NW} = 4.0$ км/с и $V_{SE} = 3.5$ км/с в период спада активности. Таким образом, большая скорость предшествует высокой активности и низкая – спаду излучения. Наблюдаемая корреляция супермазерного излучения со скоростью потока предполагает столкновительную накачку – взаимодействие потока с окружающей средой. Биполярный поток имеет спиральную структуру, которая определяется прецессией оси вращения инжектора, период прецессии равен $T \simeq 10$ лет, а угол прецессии около $\simeq 16^\circ$ (Матвеев и др., 2004). В конце рассматриваемого периода высокой активности в центральной части вокруг инжектора проявляется тороидальная структура, наблюдаемая с ребра. Диаметр тора равен 1.2 а. е., а его яркостная температура достигает $T_b \simeq 10^{13}$.

4 Интерпретация результатов

Наблюдаемая высокоорганизованная структура – цепочка ярких компактных компонент, распределенных вдоль вытянутой S-образной структуры, соответствует аккреционному диску, разделенному на протопланетные кольца, наблюдаемые с ребра (рис. 4). Диаметр диска равен 27 а. е., толщина 0.3 а. е. Разделение вещества аккреционного диска на кольца предполагает дифференциальную скорость вращения колец – кеплеровское движение. Однако наблюдаемое распределение скоростей компонентов–колец соответствует твердотельному вращению $V_{rot} = \Omega R$. Период вращения колец равен 170 лет. Видимая скорость вращения колец в зависимости от расстояния соответствует $V_{rot} = 0.2 - 1.2$ км/с. Высокая степень линейной поляризации, до 70%, вероятно связана с направленностью накачки (рис. 2 справа) (Матвеев и др., 2005) Молекулы водяного пара сдуваются радиационным давлением и звездным ветром, образуя гало вокруг колец. Мазерное излучение сконцентрировано в азимутальной плоскости колец, его направленность достигает 10^{-3} , что определяет малую вероятность их видимости. Биполярный поток частиц образуется в результате передачи кинетической энергии вращения диска потоку. Скорость биполярного потока равна $V = 4 - 10$ км/с. Размер сечения инжектируемого потока не превышает 0.05 а. е. Структура окружена средой-оболочкой, усиливающей излучение на скорости 7.6 км/с в полосе 0.5 км/с более чем на два порядка, что обеспечивает сохранение скорости излучаемой линии.

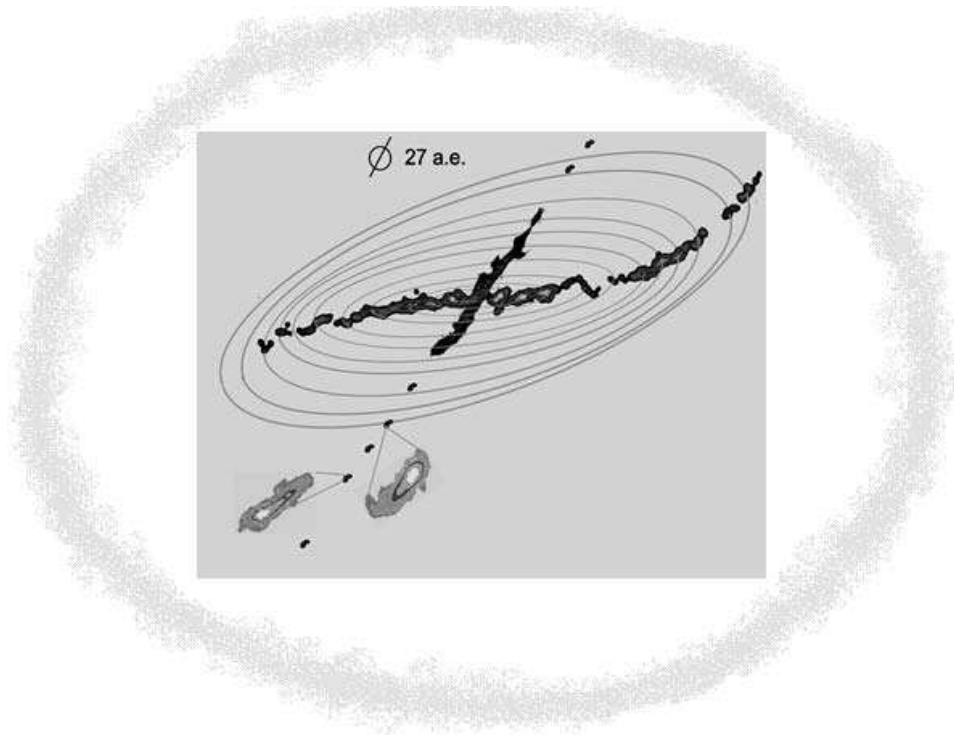


Рис. 4. Модель мазерной области

5 Заключение

Формированию звезды сопутствует структура: диск, разделенный на кольца, биполярный поток и оболочка. Наблюдаемая скорость мазерных колец $V_{rot} \simeq \Omega R$, $\Omega \simeq 0.16$ км/с/а.е., что предполагает твердотельный характер вращения с периодом ~ 170 лет. Вероятно это связано с передачей энергии диска биполярному потоку. Скорость биполярного потока $\simeq 10$ км/с. Мазерное излучение колец имеет высокую направленность $\simeq 10^{-3}$ и сосредоточено в плоскости колец. Окружающая среда–оболочка усиливает мазерное излучение на два порядка на скорости $V = 7.6$ км/с в полосе 0.5 км/с. Высокая степень линейной поляризации вызвана анизотропией накачки.

Литература

- Абрахам и др. (Z. Abraham, N.L. Cohen, R. Opher, et al.) // *Astron. Astrophys.* 100. L10. 1981.
 Берк Б.Ф., Джонстон К.Д., Ефанов В.А. и др. // *Астрон. журн.* 49. 465. 1970.
 Гарей и др. (G. Garay, J.M. Moran, and A.D. Hashick) // *Astrophys. J.* 338. 244. 1989.
 Гензел и др. (R. Genzel, D. Downs, J.M. Moran, et al.) // *Astron. Astrophys.* 66. 13. 1978.
 Матвееенко Л.И., Коган Л.Р., Костенко В.И. // *Письма в Астрон. журн.* 6. 505. 1980.
 Демичев В.А., Матвееенко Л.И. // *Астрон. журн.* 48. 979. 2004.
 Матвееенко Л.И., Даймонд Ф.Д., Грэм Д.А. // *Письма в Астрон. журн.* 24. 723. 1998.
 Матвееенко Л.И., Захарин К.М., Даймонд Ф.Д., Грэм Д.А. // *Письма в Астрон. журн.* 30. 121. 2004.
 Матвееенко Л.И., В.А. Демичев, С.С. Сиваконь, К.М., Даймонд Ф.Д., Грэм Д.А. // *Письма в АЖ.* 2005 г. Т. 31 N. 12 С. 913-921.