

УДК 523.3

Исследования областей звездообразования на РТ-22 КраО и на других инструментах

И.И. Зинченко

Институт прикладной физики РАН, ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород 603950, Россия

Поступила в редакцию 15 сентября 2005 г.

Аннотация. Обзор работ по исследованию областей звездообразования на основе наблюдений на РТ-22 КраО (дополненных в дальнейшем наблюдениями на других инструментах) с 70-х годов прошлого века по настоящее время. Описываются программы наблюдений и суммируются основные результаты.

STUDIES OF STAR FORMATION REGIONS WITH RT-22 CrAO AND OTHER FACILITIES, *by Zinchenko I.I.* A review of studies of star formation regions based on observations with RT-22 CrAO (complemented further with observations with other instruments) since 1970 until the present time. Observing programs are described and main results are summarized.

Ключевые слова: радиоастрономия, межзвездная среда, звездообразование

1 Введение

В настоящее время установлено, что звезды образуются в сгущениях межзвездного вещества, называемых обычно молекулярными облаками, поскольку основной компонент межзвездной среды, водород, в этих объектах находится, в основном, в молекулярной форме, и, кроме того, они содержат большое количество разнообразных, иногда весьма сложных молекул. Точнее, процесс звездообразования протекает в плотных конденсациях или ядрах, образующихся по той или иной причине внутри молекулярных облаков. Физико-химическое состояние этих ядер определяет начальные условия звездообразования. С другой стороны, звездный ветер и области H II, создаваемые массивными звездами, влияют на структуру и эволюцию всего облака. Очень плотные ядра представляют собой промежуточное звено между молодыми звездами и молекулярными облаками, в которых эти звезды рождаются. Для понимания процесса формирования звезд и их влияния на окружающую среду необходимо изучение свойств плотных ядер.

Основным средством исследования плотных межзвездных облаков являются наблюдения спектральных линий молекул и излучения пыли в непрерывном спектре на миллиметровых и субмиллиметровых волнах. Это определяется физическими условиями в данных объектах, которые делают указанный диапазон наиболее информативным. Для проведения такого рода радиоастрономических наблюдений необходима антенна, оснащенная соответствующей приемной аппаратурой. Одна из наиболее подходящих для таких работ антенн в прежнем СССР (а теперь в СНГ) – это РТ-22 КраО. Однако штатной аппаратуры, пригодной для таких исследований,

на ней нет. Сотрудниками ИПФ РАН, а в дальнейшем также РИ НАН Украины проведена разработка аппаратного комплекса, способного решать указанные задачи и имеющего основные технические характеристики, близкие к тем, которые достигнуты за рубежом (см. обзор Зинченко и Шульги в этом же выпуске). Разработана методика наблюдений и подготовлен пакет программ для ее практической реализации. Хотя большая часть наблюдений, представленных в данной работе, проводилась на РТ-22 КраО при помощи упомянутого аппаратного комплекса, часть данных была получена на других инструментах, в том числе зарубежных (РТ-22 ФИ РАН, ПАТАН-600, 13,7-м радиотелескопе Хельсинкского технического университета, 15-м радиотелескопе SEST в Чили, 100-м радиотелескопе в Эффельсберге, 20-м радиотелескопе в Онсала).

2 Обзоры областей звездообразования в молекулярных линиях и в континууме

2.1 Поиск плотных ядер в темных туманностях

В темных холодных облаках образуются в основном звезды малой массы. Характеристики плотных ядер в этих объектах подробно исследовались, например, Майерсом с соавторами (см. обзор Майерс, 1985). Стоит отметить, что для селекции плотных конденсаций они использовали, в основном, оптические методы. Цели нашей работы – это поиск и исследование наиболее плотных, возможно, коллапсирующих ядер в темных туманностях. Для идентификации таких объектов оптические методы явно непригодны, поскольку при большом среднем поглощении в туманностях его вариации на масштабах $\sim 1'$ (характерный размер ядер) будут незаметны. Для поиска таких сгустков требуются наблюдения молекулярных линий, возбуждающихся при больших плотностях, а наиболее плотные и холодные ядра могут быть наиболее эффективно обнаружены по излучению пыли в непрерывном спектре.

Нами проведены наблюдения нескольких темных облаков в непрерывном спектре на волне $\lambda \sim 3$ мм при помощи РТ-22 КраО (Буров и др. 1982, 1985; Зинченко и Кисляков, 1979, 1985). Выбирались облака с наибольшим числом молекул СО на луче зрения по данным имевшихся обзоров в линиях СО (Дикман, 1978; Милман, 1975). Для большинства облаков получены верхние пределы интенсивности излучения в непрерывном спектре (Буров и др. 1982, 1985). Лишь в облаках L673 и L1551 было зарегистрировано заметное излучение (Зинченко и др., 1978; Буров и др., 1985). В дальнейшем туманность L673 наблюдалась в различных молекулярных линиях: СО (Кисляков и Гордон, 1983), HCN (Сандел и др., 1983), NH₃ (А.Г.Кисляков, неопубликовано), в том числе нами в линии HCN на РТ-22 КраО. Полученные данные подтвердили наличие плотного сгустка.

Первые наши молекулярные наблюдения в темных туманностях проводились с неохлажденным приемником и с недостаточным частотным разрешением (Буров и др., 1982). Отношение сигнал/шум в полученных спектрах мало, так что эти результаты здесь не обсуждаются. В дальнейшем 15 темных туманностей наблюдались с более чувствительной аппаратурой (Буров и др., 1985). Излучение HCN обнаружено в ρ Oph, B217, L1744 и L1551. Позднее линия HCN наблюдалась также в L673 и L183 с мазерным приемником. В этих последних наблюдениях отношение сигнал/шум было достаточно высоким для надежного определения относительных интенсивностей боковых компонент линии (R_{12} и R_{02}), а также для исследования распределения яркости по источникам.

2.2 Обзор областей Н II Шарплес в линии $J = 1 - 0$ HCN

Первый наш обзор областей образования массивных звезд с целью поиска и исследования плотных конденсаций был проведен на РТ-22 КраО в 1985-1987г.г. в линии $J = 1 - 0$ HCN. Характерная концентрация газа, необходимая для заметного возбуждения этого перехода, составляет $n \sim 3 \times 10^4$ см⁻³, что превышает среднюю концентрацию водорода в таких облаках, так что наблюдения этой линии позволяют выделить плотные сгустки в исследуемых объектах. Данная

линия имеет сверхтонкую структуру, которая разрешается в большинстве источников, и, как показано в ряде работ (см., например, Лапинов, 1989), наблюдаемые особенности этой структуры (отношения интенсивностей компонент) могут дать важную дополнительную информацию о физических условиях в облаках.

Основные признаки областей образования массивных звезд – это мощное ИК излучение, наличие молекулярных мазерных источников и зон H II. Для обзора в линии HCN мы выбрали молекулярные облака, связанные с областями H II из каталога Шарплес (1959). Ранее они наблюдались в линии $J = 1 - 0$ CO (Блиц и др., 1982). Нами были отобраны те из них, где яркостная температура в линии CO была не ниже 10 K, поскольку именно такие источники с наибольшей вероятностью могут относиться к исследуемому нами классу объектов. Всего таких источников со склонением $\delta > -35^\circ$ по данным работы Блиц и др. (1982) насчитывается 93; нам удалось провести наблюдения 83-х из них. Наблюдались и некоторые облака, не удовлетворяющие данному критерию. Несколько наиболее ярких источников HCN наблюдались также в линии изотопзамещенного аналога H^{13}CN .

Наблюдения проводились в направлении пиков излучения CO. Однако поскольку линия CO наблюдалась с гораздо более широкой диаграммой направленности, наблюдавшаяся позиция могла и не соответствовать истинному положению пика CO. Не исключено также, что максимум излучения HCN находится в стороне от этого пика. В дальнейшем, после опубликования результатов ИК наблюдений IRAS (Каталог ИРАС, 1985), мы повторили наблюдения многих облаков, выбирая теперь в качестве основных координаты сильных ИК источников по данным IRAS.

В результате этого обзора заметное излучение HCN ($T_{\text{МВ}} > 0.5 - 1$ K) зарегистрировано примерно в половине наблюдавшихся объектов. Необходимо, однако, учитывать, что облака отбирались предварительно согласно описанным выше критериям. Большинство ($\sim 70\%$) излучающих в линии HCN облаков Шарплес содержат ИК источники IRAS. В 10-и облаках обнаружена линия $J = 1 - 0$ H^{13}CN . Оптическая толщина в этой линии, вероятно, мала, что позволяет получить достаточно надежные оценки числа молекул на луче зрения (N_{L}) по интегральной интенсивности линии. Найдена корреляция между яркостными температурами HCN и CO, особенно отчетливая для облаков, содержащих ИК источники. Заметим, что яркостная температура CO обычно близка к кинетической. Расчеты в приближении большого градиента скорости (БГС) показывают, что *средняя* концентрация газа в облаках должна быть $(1 - 7) \times 10^4 \text{ см}^{-3}$. Эта оценка получена для однородной модели. Она не означает, что облака не могут содержать более плотных сгустков или, наоборот, более разреженного газа. Для 11-и источников с наибольшим отношением сигнал/шум получены достаточно надежные оценки относительной интенсивности компонент сверхтонкой структуры линии $J = 1 - 0$ HCN, что позволило изучать так называемые аномалии этих отношений.

По данным этого обзора относительное число облаков с заметным излучением HCN ($T_{\text{МВ}} > 1$ K) убывает с увеличением галактоцентрического расстояния (R) – рис. 1 (здесь принято “старое” значение расстояния Солнца от центра Галактики $R_0 = 10$ кпк). Причинами такой зависимости могут быть уменьшение плотности газа в облаках с удалением от центра Галактики и уменьшение относительной концентрации молекул HCN. В направлении, перпендикулярном к галактической плоскости, доля облаков с заметным излучением HCN остается постоянной.

В дальнейшем результаты наблюдений на РТ-22 были дополнены аналогичными данными, полученными на 20-м радиотелескопе в Швеции (Пирогов, 1999), что позволило исследовать характеристики полной по определенным критериям выборки объектов. Были изучены статистические характеристики этой выборки и проведено детальное моделирование отдельных объектов.

2.3 Наблюдения линий $J = 1 - 0$ HCO^+ , H^{13}CO^+ и H^{13}CN

В 1987-88 гг. на РТ-22 КрАО нами были проведены наблюдения части облаков с сильным излучением HCN ($T_{\text{МВ}} > 1$ K) в линии $J = 1 - 0$ HCO^+ (Зинченко и др., 1990). Как и HCN, эта молекула имеет сравнительно большой дипольный момент и возбуждается в наиболее плотных частях молекулярных облаков. Она играет важную роль в химии межзвездных облаков. Наблюдения HCO^+ позволяют оценить, в частности, электронную концентрацию в облаках. Всего

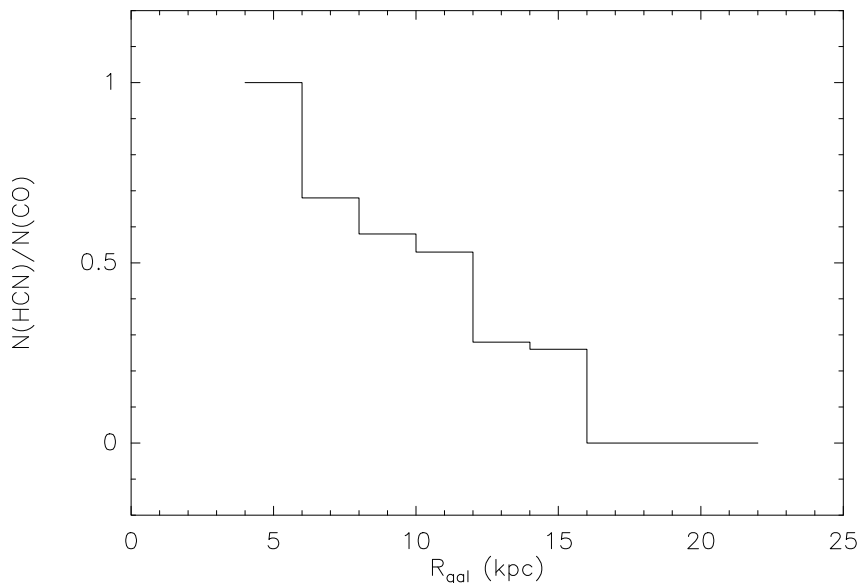


Рис. 1. Доля числа облаков с $T_{\text{MB}}(\text{HCN}) > 1$ К по отношению к полному числу наблюдавшихся облаков с $T_{\text{R}}(\text{CO}) > 10$ К в зависимости от галактоцентрического расстояния (принято $R_0 = 10$ кпк)

наблюдалось 38 объектов, и излучение HCO^+ было зарегистрировано в 24-х из них. В 1990-91 гг. были проведены дополнительные наблюдения некоторых источников в данной линии, а также в линиях H^{13}CO^+ , HCN и H^{13}CN (Пирогов и др., 1995). На рис. 2 приведены примеры измеренных спектров H^{13}CO^+ .

Хотя полных карт источников получено не было, проведенные наблюдения во многих случаях позволяют оценить размер области излучения, что дает, в частности, материал для исследования корреляций между некоторыми физическими параметрами источников. Кроме того, по данным этих наблюдений определена степень ионизации в плотных ядрах. Верхние пределы относительной электронной концентрации равны $X_e \lesssim 10^{-7} - 10^{-6}$.

2.4 Другие обзоры

Начатые на РТ-22 КрАО исследования были продолжены на других инструментах. Они включали в себя новые обзоры большого числа областей звездообразования в различных линиях и в континууме. Здесь у нас нет возможности изложить детали этих работ, поэтому мы ограничимся их перечислением и краткой сводкой основных результатов.

Во-первых, в середине 90-х годов был проведен обзор мазеров H_2O в линии $J = 2-1$ молекулы CS (Зинченко и др., 1995, 1998). Мазеры на молекулах водяного пара являются одним из индикаторов ранних стадий образования звезд большой массы. Наш обзор охватывал как северную, так и южную полусферы (наблюдения проводились на 20-м радиотелескопе в Онсала и на 15-м радиотелескопе SEST в Чили). В отличие от большинства других обзоров, которые ограничивались наблюдениями одной позиции, здесь были получены карты почти всех наблюдавшихся объектов. Кроме того, пики излучения CS наблюдались также в линии изотопа C^{34}S и в линии $J = 1-0$ молекулы CO . Это позволило сделать надежные оценки основных физических характеристик облаков (размера, массы, средней плотности, температуры и пр.). Достаточно большой размер выборки (около 100 источников) дал возможность исследовать статистические распределения этих параметров, а кроме того, удалось проанализировать их зависимость от галактоцентрического расстояния (Зинченко, 1995; Зинченко и др. 1998). Найдено, что средняя плотность сгустков, в которых образуются звезды, убывает с удалением от центра Галактики. Это согласуется с приведенными выше результатами обзора подобных областей в линии HCN .

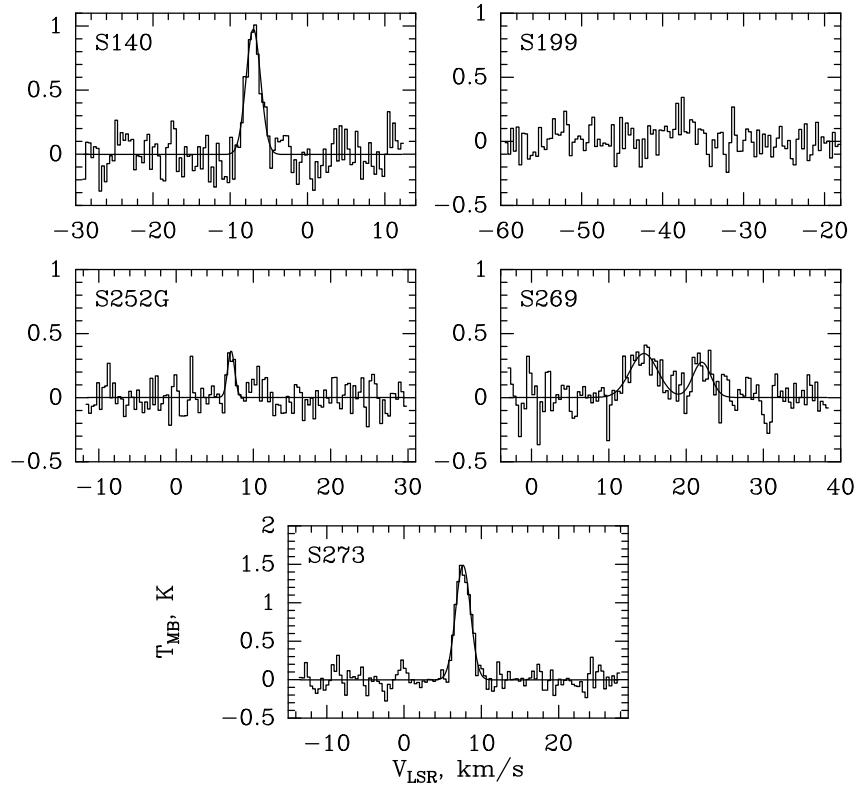


Рис. 2. Примеры измеренных на РТ-22 КрАО спектров H^{13}CO^+

В дальнейшем эта выборка исследовалась в линиях аммиака (Зинченко и др., 1997), HNCO (Зинченко и др., 2000), N_2H^+ (Пирогов и др. 2003) и др. Получены дополнительные данные о физических характеристиках, химическом составе и внутренней структуре областей образования массивных звезд. Часть этих результатов суммируется в обзоре Зинченко и др. (2005).

3 Детальные исследования отдельных объектов

Наши работы на РТ-22 КрАО и на других инструментах включали в себя детальные исследования отдельных областей звездообразования в различных линиях и в континууме с целью более подробного изучения особенностей строения таких областей в сопоставлении с различными моделями образования звезд. Среди таких объектов можно отметить уже упоминавшуюся туманность L673, известное молекулярное облако в Тельце TMC-1 (Шульга и др., 1996) области образования массивных звезд S76E (Зинченко и др., 1993), IRAS 12326-6245 (Хеннинг и др., 2000) и ряд других (например, Лапинов и др., 1998).

4 Заключение

Многолетние исследования областей звездообразования на РТ-22 КрАО дали ряд важных астрофизических результатов и создали хорошую основу для продолжения и развития этих работ на других инструментах. В частности, выполнен цикл систематических исследований представительной выборки областей образования массивных звезд. Определены основные физические характеристики этих объектов и построены их статистические распределения. Выявлена зависимость некоторых параметров от галактоцентрического расстояния.

Автор благодарен всем сотрудникам ИПФ РАН, КрАО, РИ НАНУ, ИРЭ РАН, НПО “Сатурн”, НПО “Сибкриотехника” и других организаций, обеспечивших проведение наблюдений на РТ-22, а также руководству КрАО на предоставленные возможности наблюдений. В получение, обработку и анализ представленных результатов очень большой вклад внесли А.В. Лапинов и Л.Е. Пирогов. Работы поддерживались серией грантов РФФИ и ИНТАС.

Литература

- Блиц (Blitz L., Fich M., Stark A.A.) // *Astrophys. J. Suppl.* 1982. V. 49. P. 183.
- Буров А.Б., Воронов В.Н., Зинченко И.И., Красильников А.А., Кукина Э.П. // *Астрон. журн.* 1982. Т. 59. С. 267.
- Буров А.Б., Воронов В.Н., Зинченко И.И. и др. // *Астрон. циркуляр* 1985. № 1404. С. 1.
- Дикман (Dickman R.L.) // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1978. V. 37. P. 407.
- Зинченко И.И., Кисляков А.Г., Красильников А.А., Кукина Э.П. // *Письма в Астрон. журн.* 1978. Т. 4. С. 10.
- Зинченко И.И., Кисляков А.Г. // В кн. *Спектральные исследования космического и атмосферного излучения* (ред. А.Г.Кисляков). Горький. ИПФ АН СССР. 1979. С. 33.
- Зинченко и Кисляков (Zinchenko I.I., Kisyakov A.G.) // In: *Nearby Molecular Clouds* (ed. G.Serra). *Lecture Notes in Physics.* V. 237. Springer-Verlag. 1985. P. 72.
- Зинченко И.И., Красильников А.А., Кукина Э.П., Лапинов А.В., Пирогов Л.Е. // *Астрон. журн.* 1990. Т. 67. С. 908.
- Зинченко и др. (Zinchenko I., Forsstrom V., Mattila K.) // *Astron. Astrophys.* 1993. V. 275. P. L9.
- Зинченко (Zinchenko I.) // *Astron. Astrophys.* 1995. V. 303. P. 554.
- Зинченко и др. (Zinchenko I., Mattila K., Toriseva M.) // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1995. V. 111. P. 95.
- Зинченко и др. (Zinchenko I., Henning Th., Schreyer K.) // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1997. V. 124. P. 385.
- Зинченко и др. (Zinchenko I., Pirogov L., Toriseva M.) // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1998. V. 133. P. 337.
- Зинченко и др. (Zinchenko I., Henkel C., Mao R. Q.) // *Astron. Astrophys.* 2000. V. 361. P. 1079.
- Зинченко и др. (Zinchenko I., Pirogov L., Caselli P. Johansson L. E. B., Malafeev S., Turner B. // In: *Massive star birth: A crossroads of Astrophysics.* IAU Symposium 227 Proceedings, eds. Cesaroni R., Felli M., Churchwell E., Walmsley M. Cambridge. Cambridge University Press. 2005. P. 92.
- Каталог ИРАС // (IRAS point source catalog) (eds. C.A.Beichman, G.Neugebauer, H.J.Habing, P.E.Clegg, T.J.Chester). 1985.
- Кисляков и Гордон (Kisyakov A.G., Gordon M.A.) // *Astrophys. J.* 1983. V. 265. P. 766.
- Лапинов А.В. // *Астрон. журн.* 1989. Т. 66. С. 264.
- Лапинов и др. (Lapinov A. V., Schilke P., Juvella M., Zinchenko I. I.) // *Astron. Astrophys.* 1998. V. 336. P. 1007.
- Майерс (Myers P.C.) // In: *Protostars and Planets II* (eds. D.C.Black, M.S.Matthewes). Univ. Arizona Press. 1985.
- Милман и др. (Milman A.S., Knapp G.R., Knapp S.L., Wilson W.J.) // *Astron. J.* 1975. V. 80. P. 101.
- Пирогов и др. (Pirogov L.E., Zinchenko I.I., Lapinov A.V., Myshenko V.V., Shul'ga V.M.) // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1995. V. 109. P. 333.
- Пирогов Л.Е. (Pirogov L.E.) // *Astron. Astrophys.* 1999. V. 348. P. 600.
- Пирогов и др. (Pirogov, L.; Zinchenko, I.; Caselli, P.; Johansson, L. E. B.; Myers, P. C.) // *Astron. Astrophys.* 2003. V. 405. P. 639.
- Сандел и др. (Sandell G., Höglund B., Kisyakov A.G.) // *Astron. Astrophys.* 1983. V. 118. P. 306.
- Хеннинг и др. (Henning, Th.; Lapinov, A.; Schreyer, K.; Stecklum, B.; Zinchenko, I.) // *Astron. Astrophys.* 2000. V. 364. P. 613.
- Шарплес (Sharpless S.) // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1959. V. 4. P. 257.

Шульга В.М., Мышенко В.В., Назаров Е.А., Антюфеев А.В., Л.Б.Князьков Л.Б., Литвиненко Л.Н., Зинченко И.И., Лапинов А.В., Пирогов Л.Е. // Радиопизика и радиоастрономия. 1996. Т. 1. С. 54.