

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

523.8

ВЫБРОСЫ ЭНЕРГИИ ИЗ МОЛОДЫХ ЗВЕЗД*)**Ч. Дж. Лада**

Излучение, испускаемое молекулами окиси углерода в облаках газа и пыли, где образуются новые звезды, указывает на существование большого количества газа, движущегося наружу с большими скоростями в противоположных направлениях.

В нашей Галактике звезды рождаются в газовых облаках, настолько холодных, что они не изучают в диапазоне длин волн электромагнитного спектра, соответствующего видимому свету. Кроме того, космическая пыль, пронизывающая газовые облака, поглощает видимое излучение, испускаемое новыми звездами. Эти условия долго представляли из себя казавшийся непреодолимым барьер для астрономов, пытавшихся понять, как образуются звезды. Однако инфракрасное излучение и самое коротковолновое радиоизлучение могут проходить через такие облака, и благодаря развитию новых телескопов и оборудования для детектирования излучения в этом диапазоне длин волн астрономы сейчас могут исследовать темные и пылевые облака, где рождаются звезды.

Оказалось, что основным индикатором условий, существующих внутри звездообразующих облаков, является присутствие окиси углерода (CO) — газа, впервые открытого в космосе только двенадцать лет назад. В межзвездных молекулярных облаках молекулы окиси углерода излучают на длине волны 2,6 мм. Изучение такой радиации обнаружило недавно новые интригующие астрофизические явления, тесно связанные с рождением и ранней эволюцией звезд. Когда звезды находятся на самой ранней стадии своей жизни, развитие некоторых из них, по-видимому, сопровождается сильными выбросами масс. В ряде случаев обнаружен молекулярный газ, вытекающий из окрестностей вновь образованных звезд двумя сверхзвуковыми потоками, выбрасываемыми в противоположные стороны. Газ в этих биполярных потоках обычно имеет массу, в несколько раз большую солнечной, и соответственно несет громадную кинетическую энергию. Происхождение и природа этих энергетических выбросов являются загадкой. Ясно, однако, что они представляют собой важную стадию в эволюции молодых звезд.

Новые наблюдения о рождении и ранней эволюции звезд были проведены с помощью нескольких новых инструментов, специально спроектированных для детектирования излучения в близкой инфракрасной обла-

*) L a d a Ch. J. Energetic Outflows from Young Stars.— Scientific American, July 1982, v. 247, No. 1, pp. 74—83.— Перевод Я. Н. Истомина.

Чарльз Дж. Лада — профессор астрономии Аризонского университета, США.

© Scientific American, Inc., 1982.

© Перевод на русский язык, издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, «Успехи физических наук», 1983.

сти спектра (длины волн от 2 до 30 мкм), в далекой инфракрасной области (от 30 до 300 мкм) и в диапазоне самых коротких радиоволн (от долей миллиметра до нескольких миллиметров). Эти инструменты включают в себя трехметровый инфракрасный телескоп Проекта Возможностей на Мауна-Кеа на Гавайях и пятиметровый телескоп на горе Лоук в Техасе, работающий в миллиметровом диапазоне длин волн. Поверхность пятиметрового телескопа, покрытая золотом, является самым точно выполненным в мире

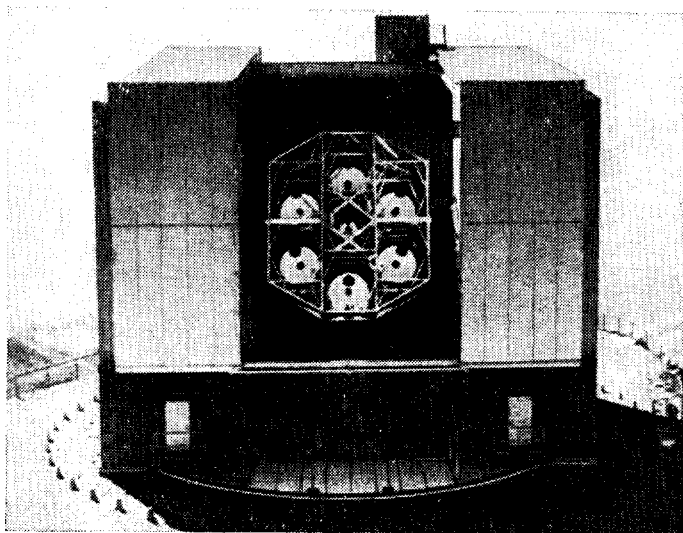


Рис. 1. Телескоп со многими зеркалами (ММТ), строительство которого недавно завершено на горе Хопкинс около Таксона в Аризоне, является первым из этого семейства.

При обычном способе работы излучение от шести 1,8-метровых зеркал, расположенных внутри окружности диаметром 7 м, собирается в общий фокус, что эквивалентно светосиле шести 1,8-метровых телескопов или одного 4,4-метрового телескопа. Однако, когда свет складывается некогерентно, разрешающая способность ММТ равна только разрешающей способности 1,8-метрового инструмента. Для того чтобы достичь полной разрешающей способности ММТ, его свет должен быть сложен когерентно, т. е. в фазе. Тогда ММТ становится эквивалентным телескопу 7 м в диаметре. Фазово-когерентная система в субмиллиметровом диапазоне длин волн использовалась впервые на ММТ Н. Эриксоном, П. Ф. Голдсмитом, Г. Р. Хьюджунином и Р. Л. Снеллом из Массачусетского университета в Амхерсте в сотрудничестве с Б. Л. Улихом из ММТ обсерватории и автором.

отражателем миллиметровых радиоволн. Три года назад этот инструмент впервые зарегистрировал биполярные высокоскоростные выбросы в молекулярном облаке.

Возможно, наиболее замечательным в новой семье инструментов является телескоп со многими зеркалами (ММТ) на горе Хопкинс около Таксона в Аризоне, используемый совместно университетом Аризоны и Смитсоновской астрофизической обсерваторией. Этот уникальный инструмент состоит из шести зеркал диаметром 1,8 м, смонтированных внутри окружности диаметром 7 м. Когда он работает так, что падающее на шесть зеркал излучение складывается когерентно, т. е. в фазе, он становится эквивалентным одному семиметровому отражателю. ММТ недавно работал в таком когерентном режиме. Основной задачей было принять излучение из молекулярных облаков в диапазоне длин волн, меньших миллиметра, области спектра, в которой ранее трудно было получить наблюдения высокого разрешения.

Изучение излучения в особых линиях в миллиметровом диапазоне длин волн электромагнитного спектра дает возможность астрономам исследовать физическую, химическую и динамическую природу темных обла-

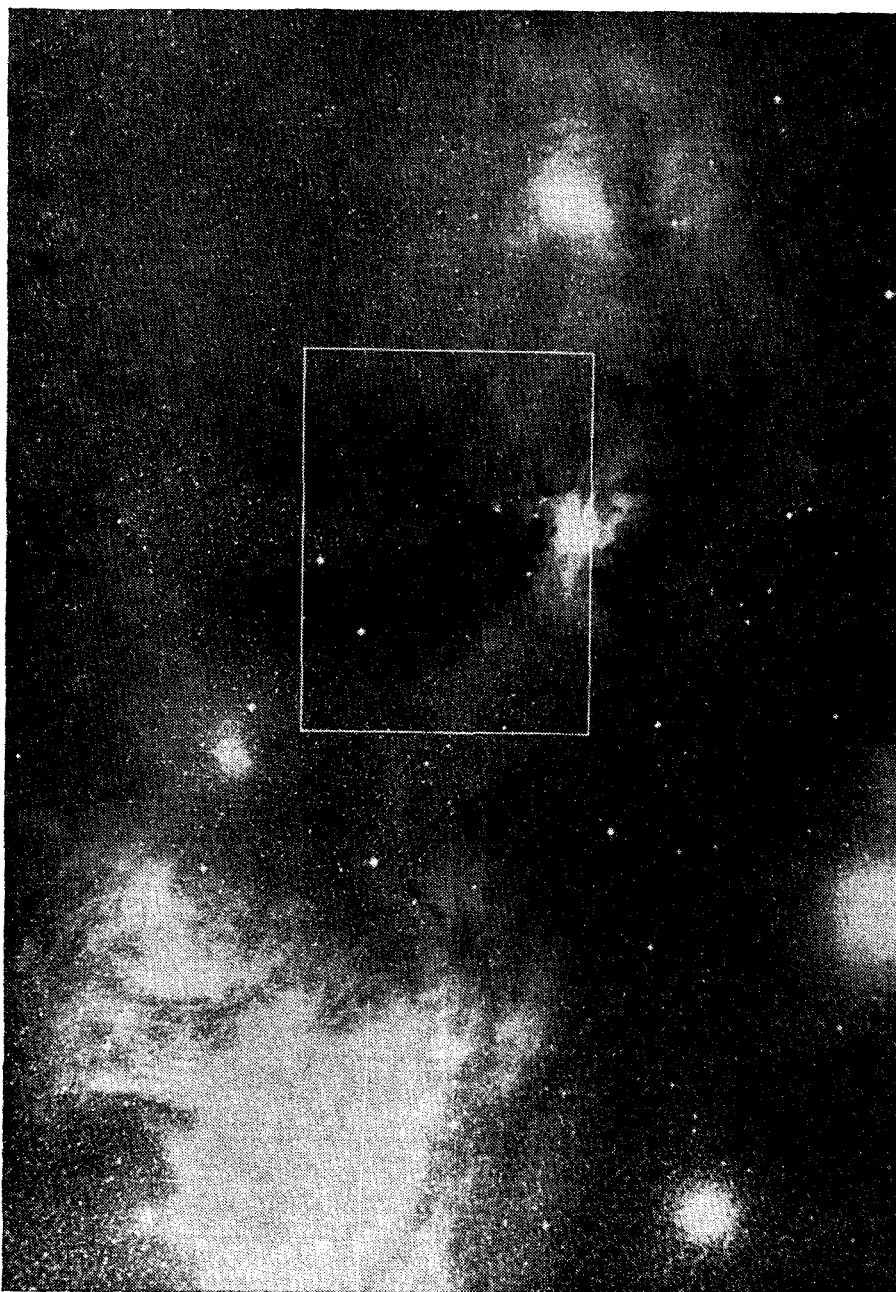


Рис. 2. Характерной областью, где рождаются звезды, является темное облако ρ Змееносца, названное так по яркой звезде, окруженной голубой туманностью и расположенной в верхней части фотографии.

Яркая звезда ниже слева есть Антарес в созвездии Скорпион. Справа от Антареса находится сферическое скопление М4. Темное облако между ρ Змееносца и Антаресом содержит газ молекулярного водорода, масса которого порядка 1000 солнечных масс. Большая концентрация пыли в молекулярном облаке поглощает более чем 99,99% видимого излучения, идущего от скопления двадцати новых звезд, недавно открытых в наблюдениях, сделанных в инфракрасном диапазоне длин волн Б. А. Вилкингом из Техасского университета и автором. Инфракрасное излучение в 10 раз легче проникает через пыль, чем видимый свет. Скопление новых звезд расположено почти в центре очерченной области. Фотография выделенной области, показывающая расположение инфракрасных объектов, представлена на рис. 3. Фотография сделана Д. Ф. Малиным из трех черно-белых снимков, экспонированных в различных диапазонах спектра на 1,2-метровом телескопе Шмидта, расположенном на горе Сайдинг Спринг в Австралии и эксплуатируемом Королевской обсерваторией в Эдинбурге.

ков, из которых должны формироваться новые звезды. Наблюдения в далеком инфракрасном диапазоне говорят нам о том физическом состоянии, в котором находится пыль, пронизывающая темные облака и окутывающая вновь образованные звезды. Наблюдение в близком инфракрасном диапазоне рассказывает о самых новорожденных звездах. Для примера, в темном облаке, названном ρ Змееносца, инфракрасные наблюдения обнаружили целое скопление двадцати совсем недавно образованных звезд,

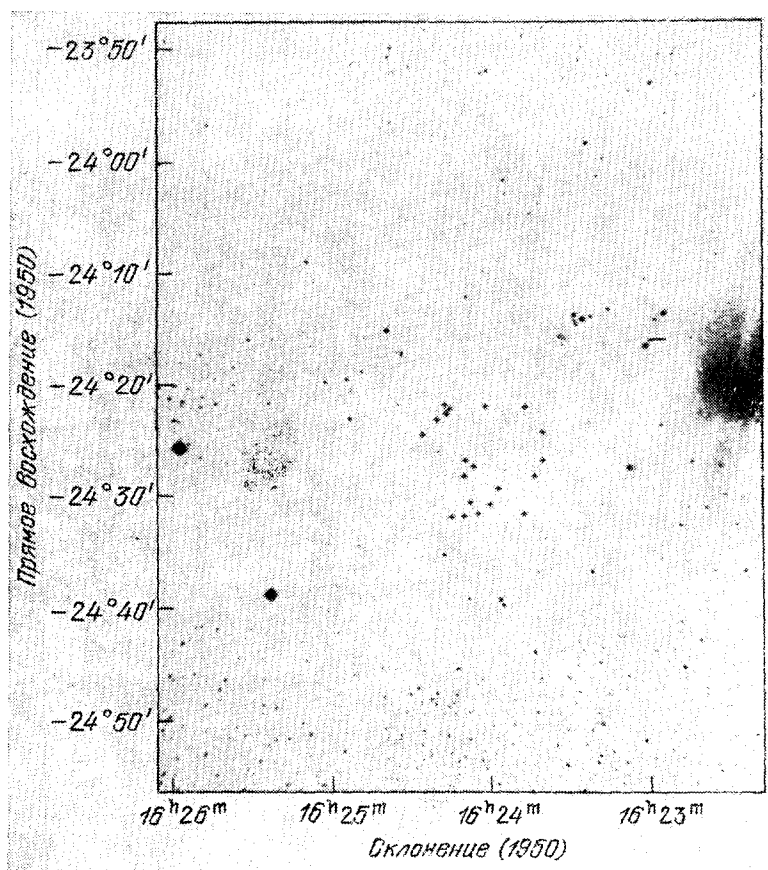


Рис. 3. Новые звезды в темном облаке ρ Змееносца показаны крестиками.

Видлинг и автор исследовали самые темные области облака на длине волны 2 мкм на 61-дюймовом инфракрасном телескопе университета Аризоны. Оценено, что эти 20 звезд образовались за последние миллион лет. Фотография, сделанная на 48-дюймовом телескопе Шмидта на горе Паломар, взята из Национального географического общества — с карты неба Паломарской обсерватории.

запрятанных так глубоко в газе и пыли, что они не могли быть обнаружены в видимом диапазоне длин волн. Синтез данных, полученных в этих различных невидимых диапазонах спектра, неизмеримо добавляет к знаниям о рождении и ранней эволюции звезд, что исключительно важно для общей теории образования звезд.

МЕСТО, ГДЕ РОЖДАЮТСЯ ЗВЕЗДЫ

Не так давно тема звездообразования и происхождения планетарных систем ограничивалась только теоретическими рассуждениями. Относящихся к делу наблюдательных данных просто не существовало. Около со-

рока лет назад ситуация резко изменилась в связи с развитием ядерной физики и звездной динамики. Стало ясным, что ядерный синтез обеспечивает звезды энергией. С признанием этого становится возможным предсказать, как долго могли бы жить звезды и какова была бы их окончательная смерть. Очевидно, что очень яркие звезды, обозначаемые как О и В, сжигают свой запас водородного ядерного горючего примерно в 10^4 — 10^5 раз быстрее Солнца и, следовательно, обрекают себя на истощение их топливных запасов за 10 млн. лет или того меньше. Такие звезды не совершат даже одного цикла нашей Галактики (100 млн. лет) и смогут прожить только в тысячи раз меньше, чем Солнце. О- и В-звезды так молоды, что они не могут уйти далеко от мест их рождения в облаках газа и пыли.

Изучение распределения и движения О- и В-звезд показывает, что многие из них образуют группы, которые были названы ОВ-ассоциациями. Вместо того чтобы быть гравитационно связанными, подобно звездам в звездных скоплениях, члены ОВ-ассоциации движутся наружу, удаляясь один от другого. Скорость расширения указывает на то, что ассоциации существуют не более чем 10 млн. лет. Эти два независимых источника информации — высокая скорость потребления горючего О- и В-звездами и их скорость разлета — демонстрируют, что в настоящую эпоху истории нашей Галактики звезды все еще рождаются. Так как цикл жизни О- и В-звезд от рождения до смерти так краток, то их распределение и ориентация в малой области пространства могут считаться «ископаемой» записью распределения и ориентации протозвезд, которые были их предшественниками, и, возможно, газа и пыли, которые были до протозвезд.

Появление наблюдений в инфракрасной и миллиметровой областях спектра обнаружило, что ОВ-ассоциации образуются в гигантских молекулярных облаках около 300 световых лет в диаметре, содержащих, возможно, 10^5 солнечных масс материи в виде газа, более разреженного, чем лучший лабораторный вакуум. Такие газообразные скопления, возможно, являются наиболее массивными объектами в галактике. Двенадцать лет назад их существование было неизвестно². Сейчас признано, главным образом из результатов наблюдений в инфракрасном и миллиметровом диапазонах длин волн, что может быть несколько путей, по которым звезды могут реально образовываться из гигантских молекулярных облаков. Сколько механизмов точно существует? Как они связаны? Какой их относительный вклад в образование всех звезд? Эти вопросы, являющиеся центральными для большого числа проводимых в настоящее время астрономических исследований, не могли бы быть заданы десять лет назад.

ОБНАРУЖЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОГО ГАЗА

Облака, которые дают рождение звездам, по-видимому, состоят почти полностью из водорода в молекулярном виде (H_2). Из-за того, что облака холодные (температура лежит между 10 и 50 К, равными градусам Цельсия, выше абсолютного нуля), молекулы водорода не могут быть обнаружены прямо. Молекулы в космосе могут быть обнаружены только, если они излучают фотоны при переходах из более высокого энергетического состояния в более низкое. Переходы из одного состояния в другое приводят к спектральным линиям, которые в зависимости от потери энергии в процессе перехода могут попасть в любое место электромагнитного спектра. В молекулярных газах при низких температурах основными переходами являются переходы из одного состояния вращения молекулы в другое, при которых радиация излучается на радиочастотах. Согласно правилам квантовой механики для симметричных молекул, таких как

водород, переход между соседними вращательными уровнями запрещен. Поэтому первый переход на уровень выше основного (наинизшего), разрешенный для молекулы водорода, требует, чтобы молекула получила достаточно энергии, чтобы пройти два вращательных уровня. При температурах, имеющих в молекулярных облаках, столкновения между молекулами только изредка могут высвободить достаточно энергии для такого перехода.

К счастью, молекулярные облака содержат также несимметричные молекулы, такие как окись углерода, для которых переход между соседними вращательными уровнями разрешен. Даже в самых холодных облаках столкновения между молекулами легко переводят молекулы окиси

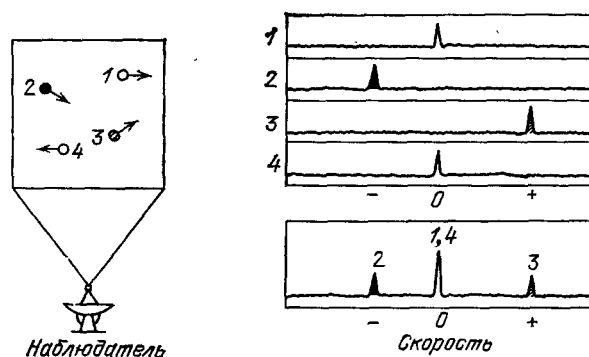


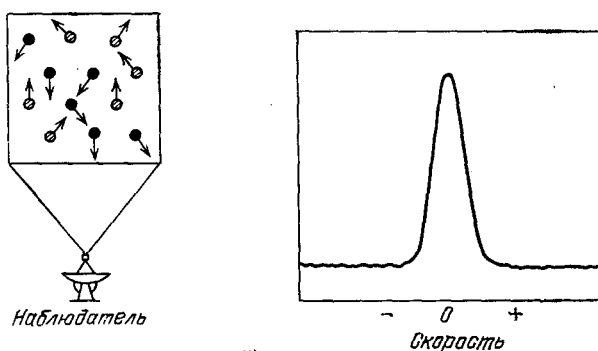
Рис. 4. Из-за эффекта Доплера относительное движение молекул в пространстве изменяет длину волны, на которой наблюдается их излучение.

Если молекула находится в покое или движется перпендикулярно (1, 4), ее профиль линии не меняется. Если молекула приближается к наблюдателю (2), то профиль ее линии будет сдвигаться к более синим, или коротким, длинам волн. Если молекула удаляется (3), ее профиль будет смещен к более красным длинам волн. Сдвиги показывают скорость. Интенсивность на отдельной доплеровской скорости пропорциональна числу молекул, излучающих на этой скорости.

углерода на их первый возбужденный вращательный уровень. Когда молекула переходит назад в свое основное состояние, она испускает фотон с длиной волны, равной 2,6 мм. Хотя окись углерода в своей наиболее распространенной изотопической форме (углерод-12, соединенный с кислородом-16) почти в 10^4 раз менее распространена, чем водород, она является одной из главных примесей в межзвездных облаках и, следовательно, служит превосходным заменителем при исследовании ненаблюдаемой молекулы водорода. 2,6-миллиметровая спектральная линия окиси углерода впервые была зарегистрирована в межзвездном пространстве в 1970 г. Р. В. Вилсоном, К. Б. Джеффертсом и А. А. Пензиасом из лаборатории Белла на 11-метровом радиотелескопе Национальной радиоастрономической обсерватории на Китт Пик в Аризоне. Спектральная линия окиси углерода с тех пор была наблюдаема повсюду в нашей Галактике, а также и в других галактиках.

По интенсивности молекулярной спектральной линии астрономы умеют определять температуру, плотность и молекулярный состав газа в звездообразующих облаках. Кроме того, благодаря эффекту Доплера (увеличение частоты излучения от источников, которые приближаются к наблюдателю, и уменьшение частоты от удаляющихся источников) астрономы могут определять движение молекулярных облаков по отношению к Солнечной системе. Говорят, что приближающиеся источники обладают синим смещением, удаляющиеся — красным. Доплер-эффект

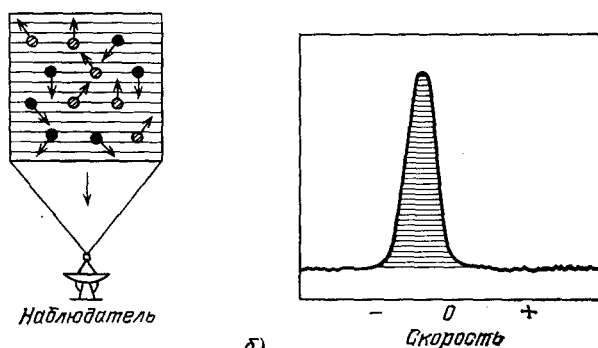
позволяет обнаружить также диапазон скоростей, с которыми молекулы движутся в облаке; чем большие скорости, тем шире спектральная линия.



а)

Рис. 5. Реальное наблюдение молекулярных облаков суммирует излучение от молекул, движущихся с разбросом скоростей.

Если облако не приближается и не удаляется (а), то распределение скоростей благодаря внутреннему движению дает широкий профиль линии, центр которой находится на покоящейся, или нормальной, длине волны. Если облако приближается (б), то профиль смещен в синюю сторону, что соответствует отрицательной скорости. Удаляющееся облако покажет профиль, смещенный в красную сторону, или положительную скорость.



б)

Наблюдение смещенных и уширенных профилей молекулярных линий привело к открытию необычных газовых течений в молекулярных облаках.

ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ГАЗ В ОРИОНЕ

Если бы тепловые движения были единственным источником доплеровского уширения линий, то межзвездные молекулярные облака испускали бы линии с ширинами, эквивалентными только скоростям в несколько сотен метров в секунду. Ширины линий обычно выражают в единицах скорости, а не длин волн, из-за того, что движения газовых облаков и их частей представляют для нас основной интерес. Линии окиси углерода из молекулярных облаков почти всегда намного шире линий, которые бы получились только при учете теплового движения.

В гигантских молекулярных облаках, связанных с ОВ-ассоциациями, ширины линий в диапазоне между 1 и 3 км/с наблюдаются в большей части облака. В областях, где образование звезд наиболее интенсивно, ширины линий возрастают до величин от 4 до 10 км/с. Источник таких движений является загадкой.

Наиболее яркий пример уширения молекулярной линии был открыт около пяти лет назад в крошечной области гигантского молекулярного облака, 200—300 световых лет в поперечнике, которая непосредственно ассоциируется с прекрасной туманностью Ориона. В области протяженностью меньше половины светового года излучение окиси углерода испытывает уширение, немного больше чем 100 км/с. Изучение этой малой

области в диапазоне многих длин волн продемонстрировало, что высокая скорость молекул окиси углерода является результатом энергичного выброса газа из области, окружающей молодой объект, возможно, протозвезду.

Существование такого энергичного и, возможно, бурного выброса газовой материи из окрестности молодого объекта не укладывалось в принятую картину образования и ранней эволюции звезд. Сначала думали, что выброс связан с очень редким и, видимо, единственным событием,

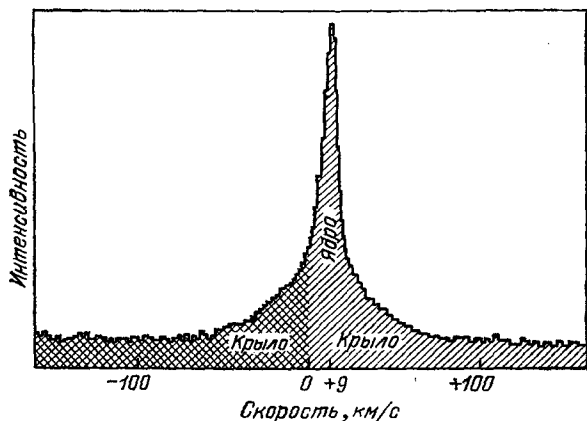


Рис. 6. Молекулярное облако в Орионе, укрывающее скопление новообразованных звезд, дало такой профиль излучения окиси углерода в момент, когда оно исследовалось автором и его коллегами на телескопе со многими зеркалами (ММТ).

Излучение, которое имеет основную длину волны 0,87 мм, испускается молекулами окиси углерода, когда они переходят с третьего возбужденного вращательного уровня на второй. В целом облако удаляется со скоростью 9 км/с. Широкие крылья на профиле показывают, однако, что многие молекулы внутри облака движутся со сверхзвуковыми скоростями больше 50 км/с, одни приближаясь, другие удаляясь. Высокоскоростное излучение, заключенное в области протяженно-

стью всего лишь в половину светового года, очевидно, представляет высокоэнергичный поток газа, вытекающего из глубоко запрятанной молодой звезды.

таким как взрыв сверхновой в молекулярном облаке Ориона около тысячи лет назад. С тех пор стало ясным из наблюдений других облаков в миллиметровом диапазоне длин волн, что такие энергичные выбросы газа обычны и, может быть, даже являются следствием рождения звезд.

ОБЛАКО ВОКРУГ AFGL 490

Ряд таких наблюдений был сделан два года назад П. М. Харвейем из университета Техаса в Остине и мной. Объектом нашего исследования было молекулярное облако, окружающее инфракрасный источник, подозреваемый как протозвездный объект в созвездии Жирафа. Он известен только своими инициалами в двух инфракрасных каталогах: или как U из A1 (объект № 1 в каталоге университета Аризоны), или как AFGL 490 (объект № 490 в каталоге геофизической лаборатории военно-воздушных сил).

Мы сделали наши первые наблюдения на пятиметровом рефлекторе с золотым покрытием Обсерватории Мак-Дональда Техасского университета в Остине на горе Лок. Когда мы нацелили телескоп прямо на инфракрасный источник, то были удивлены, обнаружив, что профиль окиси углерода имеет широкие «крылья». Вместо ожидаемой ширины линии в два или три километра в секунду излучение окиси углерода можно было зарегистрировать в диапазоне около 60 км/с. В других точках облака, отличных от местонахождения инфракрасного источника, широкие крылья исчезали и линии имели обычно ожидаемые узкие ширины.

Такая необычная находка заслуживала дальнейших исследований на большем и более чувствительном телескопе. Поэтому мы перенесли наше исследование на 11-метровый инструмент в Китт Пике, который имеет разрешение, в два раза лучшее, чем пятиметровый телескоп. Это улучшение в разрешении привело к другой неожиданной находке. Когда

мы сканировали телескоп в направлении север — юг, проходя через инфракрасный источник, форма профиля линии окиси углерода систематически изменялась. Немного севернее источника мы наблюдали крыло на профиле, смещенное только в красную сторону. Немного южнее мы наблюдали только синее смещение. Когда телескоп был направлен точно на

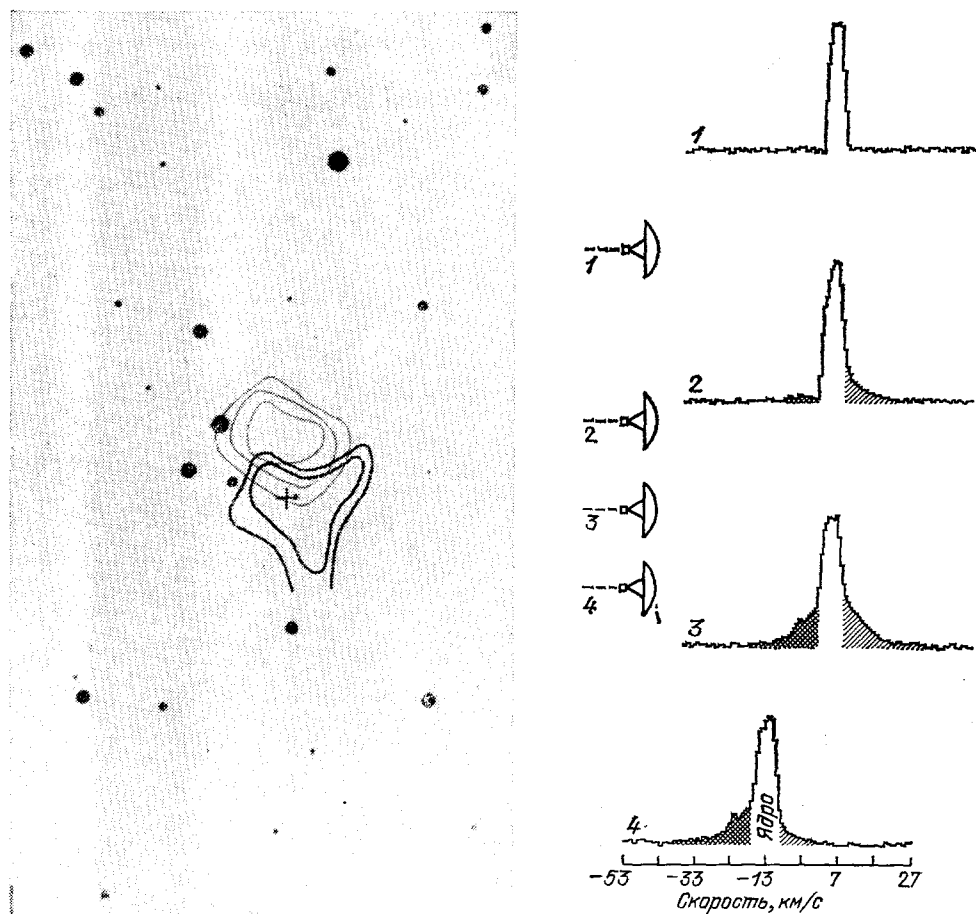


Рис. 7. Разделенное на две доли течение окиси углерода, наблюдаемое в окрестности инфракрасного источника AFGL 490, который расположен в гигантском молекулярном облаке, около 300 световых лет в поперечнике, в созвездии Жирафа.

Основная часть удаляющегося газа, дающего красное смещение (светлый профиль), кажется отрезанной от приближающегося газа, дающего синее смещение (сплошной профиль). Это означает, что газ выбрасывается двумя противоположно направленными потоками из окрестности AFGL 490, указанного крестиком на фотографии, сделанной на 48-дюймовом Паломарском телескопе Шмидта. Область излучения окиси углерода, имеющая двойную структуру, имеет в поперечнике размер порядка одного светового года. Четыре профиля справа показывают излучение окиси углерода в четырех местах, расположенных в самом биполярном молекулярном потоке и около него. Самые высокие скорости газа находятся в месте № 3, около расположения самого объекта AFGL 490. Наблюдения были проведены П. М. Харвеем из Техасского университета в Остине и автором на 11-метровом радиотелескопе Национальной радиоастрономической обсерватории в Китт-Пике в Аризоне.

инфракрасный источник, спектр окиси углерода обнаруживал высокоскоростные компоненты, сдвинутые как в синюю, так и в красную стороны, что едва ли можно было бы ожидать от газового облака, гравитационно коллапсирующего и образующего новую звезду. Течение газа имело протяженность только около одного светового года, или 0,3 пс, в обоих направлениях, так что это должно было быть очень молодое дина-

мическое событие (один парсек равен 3,26 светового года). Быстро движущемуся газу этого потока потребовалось бы только 10^4 лет для того, чтобы пройти расстояние в один световой год. Время жизни самих молекулярных облаков оценивается от 10 до 100 млн. лет. Наблюдая излучение от редкой изотопической формы окиси углерода (в которой вместо углерода-12 содержится углерод-13), мы имели возможность определить, что масса водорода в потоке равна примерно 30 солнечным массам. Простое вычисление (произведение половины массы на квадрат скорости) показывает, что газ несет около $2 \cdot 10^{47}$ эрг кинетической энергии, что эквивалентно полной лучистой энергии Солнца за 1,6 млн. лет. Вероятно, в окрестности AFGL 490 недавно произошло событие с очень большим выделением энергии. Как можно объяснить наблюдаемую активность?

Ясно, что потоки, смещенные в синюю и красную стороны, могли бы представлять из себя приближающийся и удаляющийся край вращающегося газового диска, видимого с ребра. Однако для того, чтобы быть устойчивым против центростремительного разрушения, диск должен был бы содержать по крайней мере $2 \cdot 10^4$ солнечных масс материи внутри высокоскоростного излучателя, 0,6 пс в диаметре. Наши наблюдения указывают, что внутри этой области полная масса материи (включая как газ в высокоскоростном потоке, так и окружающий, медленно движущийся газ) имеет верхний предел около 100 солнечных масс. Кроме того, инфракрасные наблюдения самого центрального объекта, т. е. AFGL 490, говорят о том, что его масса не превышает 15 солнечных масс. Наиболее вероятное объяснение для высокоскоростных потоков, смещенных в синюю и красную стороны, заключается в том, что они не гравитационно связаны. Вместо этого они каким-то образом выталкиваются из центрального объекта двумя струями, одна струя направлена, грубо говоря, в нашем направлении, другая — от нас. Такой биполярный выброс не требовал бы большой концентрации массы в центральном объекте или вокруг него.

Явление течения газа большой энергии, наблюдаемое в молекулярном облаке Ориона и в AFGL 490, с тех пор обнаруживалось повсюду. В этой статье описаны 24 других примера. Из них около половины нанесены на карту и почти все имеют биполярную структуру.

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ СТРУИ В L 1551

Возможно, наиболее замечательный пример биполярного молекулярного выброса связан с инфракрасным источником в темном молекулярном облаке L1551 в созвездии Тельца. Ранние наблюдения предполагали некоторую особенность в профиле линии окиси углерода в окрестности источника. С помощью пятиметрового телескопа на горе Лок Р. Л. Снелл из Массачусетского университета в Амхерсте, Р. Б. Лорен из Техасского университета в Остине и Р. Л. Плэмбек из Калифорнийского университета в Беркли исследовали источник более тщательно. Они первыми открыли молекулярный газ, вытекающий из молодой звезды и имеющий биполярную структуру.

Картина, которую они наблюдали, необычна в двух отношениях. Во-первых, это единственная потоковая система в молекулярном облаке, настолько протяженная, что полностью разрешима при наблюдениях. Протяженность струй высокоскоростного газа в три раза превышает их ширину, указывая на то, что потоки узкие и подобны струям. Во-вторых, струя, которая показывает синее смещение, совпадает с тремя видимыми пятнами излучения туманности, которые, полагают, являются объектами Хербиг-Харо. Такие объекты (названные по именам их открывателей, Г. Х. Хербига из Калифорнийского университета в Санта-Крузе и Г. Харо

из Национального института астрофизики, оптики и электроники в Мехико), по-видимому, образованы ударными волнами, которые возникают, когда сильные выбросы звездного ветра взаимодействуют с окружающим облаком молекулярного газа.

Оптические наблюдения эмиссионных линий из объектов Хербиг-Харо в L 1551, проведенные С. Е. Стромом и К. М. Стром из Национальной обсерватории в Китт Пике и Г. Л. Грасдаленом из университета Вайоминг, показали, что линии испытывают синее смещение, согласованное с синим смещением в молекулярной струе, в которую эти объекты, по-видимому,

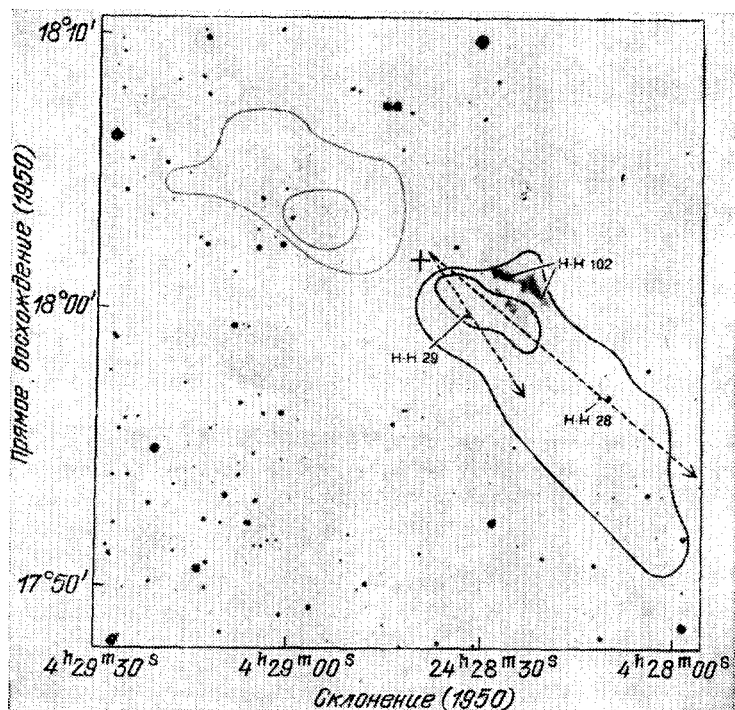


Рис. 8. Противоположно направленные струи газа отчетливо отделены один от другого в окрестности расположения инфракрасного источника L1551 в созвездии Тельца, отмеченного крестиком вблизи центра этой фотографии, полученной на 48-дюймовом Паломарском телескопе Шмидта.

Как и в AFGL 490, потоки, вероятно истекают из инфракрасного объекта, который предположительно является молодой звездой. Поток, дающий синее смещение, по-видимому, включает в себя три туманных пятна видимого излучения, обозначенных как объекты Хербиг-Харо: H-H28, H-H29 и H-H102. Первые два движутся так быстро (150 км/с), что их положение на фотографиях, снятых только с промежутком в несколько лет, меняется. Направления их движения показаны стрелками. Экстраполируя движение назад, мы найдем, что объекты были выброшены из области, близкой к L 1551, всего лишь 3 тыс. лет назад. Карта излучения окиси углерода была сделана Снеллом, Р. В. Лореном из Техасского университета в Остине и Р. Л. Пэмбеком из Калифорнийского университета в Беркли.

заклучены. Фактически обнаружено, что объекты Хербиг-Харо приближаются вдоль линии наблюдения со скоростью на 50 км/с больше скорости движения газа в молекулярной струе. Отдельно, В. Дж. Лютен из университета Миннесоты, наблюдая два объекта Хербиг-Харо, H-H 28 и H-H 29, обнаружил, что они движутся в направлении, перпендикулярном линии наблюдения, настолько быстро, что занимают различное положение на фотографических пластинах, снятых всего лишь через несколько лет. Когда К. М. Кадворт из Йеркес обсерватории Чикагского университета и Г. Х. Хербиг исследовали фотографии области L 1551, выпол-

ненные в течение 30 лет, они нашли, что Н-Н 28 и Н-Н 29 имеют поперечные скорости около 150 км/с. Они также показали, что если движение этих объектов экстраполировать назад во времени, то их пути пересекались бы всего лишь 3 тыс. лет назад в точке около основания биполярного выброса молекулярного газа.

Вероятно, причина, по которой объекты Хербиг-Харо связаны со струей, испытывающей синее, а не красное смещение, состоит в том, что движущийся в нашем направлении газ находится ближе к поверхности молекулярного облака, генерирующего ударную волну, которая приводит к образованию светящихся туманностей Хербиг-Харо, когда газ начинает протыкать поверхность облака. Поток с красным смещением направлен от нас и расположен значительно глубже в облаке, так что любые объекты Хербиг-Харо, которые могли бы образоваться в выбросе, полностью скрыты молекулярным газом и пылью, мешающими наблюдениям.

Вероятно, наиболее замечательным аспектом сильной активности, наблюдаемой в L 1551, является природа объекта, предположительно ответственного за наблюдаемые явления. Инфракрасный источник, расположенный вблизи центра выбрасываемого газа, был первоначально открыт в 1975 г. С. Стормом и К. Сторм, работавшими в содружестве с Ф. Дж. Врба из обсерватории Лоуэлл в Флагстаффе, Аризона. Он заметно отличается, однако, от инфракрасных источников, ранее открытых в молекулярном облаке Ориона и в AFGL 490. Источники, дающие газовые выбросы в этих двух местах, по-видимому, являются молодыми звездами или протозвездами, вероятно, звездами спектрального типа «В», которые по крайней мере в 15 раз массивнее Солнца и в тысячу раз более яркие. Ввиду их яркости и массивности, возможно, не удивительно, что энергетическая активность наблюдается в их окрестности.

Наоборот, наблюдения источника в L 1551 в далекой и близкой инфракрасной области спектра, проведенные с земли Ч. Байхманом из Калифорнийского технологического института и с телескопа, поднятого на воздушном шаре, группой европейских астрономов (возглавляемых К. В. Фридландом из Стокгольмской обсерватории), показали, что источник не более чем в 25 раз ярче Солнца. Центральный источник похож на звезду типа Т Тельца — молодой звездный объект, который не может более чем в два раза быть массивнее Солнца. Из этого следует заключить, что не только необычно массивные и яркие звезды способны давать сильные биполярные выбросы газа на ранней стадии их эволюции. Звезды, не больше чем Солнце, способны вызывать те же самые явления в ранние моменты их жизни. Из 26 известных сейчас высокоскоростных молекулярных выбросов четыре, по-видимому, связаны со звездами относительно малой массы.

ЧАСТОТА ПОЯВЛЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СТРУЙ

Энергетическая активность, примером которой являются молекулярное облако Ориона, AFGL 490 и L 1551, представляет из себя новое и необычное явление, отмеченное тремя, а чаще четырьмя отличительными свойствами. Первая черта — это высокоскоростной выброс молекулярного газа. Вторая — динамическая активность имеет короткое время эволюции: от 10^3 до 10^4 лет. Третья — она сопровождается большим количеством кинетической энергии: от 10^{45} до 10^{48} эрг. И четвертая — в большинстве случаев истекающий газ проявляет биполярную структуру, центр которой занимает инфракрасный источник, являющийся молодой звездой.

В радиусе один килопарсек (3260 световых лет) вокруг Солнца сейчас имеется 10 хорошо изученных примеров этого явления. Очевидно, объекты

возникают с довольно высокой скоростью: по крайней мере 10 из них должны образовываться каждые 10^4 лет только в окрестности Солнечной системы. Фактически скорость образования таких молекулярных струй со звездой, расположенной в центре, по-видимому, примерно равна скорости образования всех звезд с массами, большими чем три солнечных массы. Из-за того, что систематический поиск молекулярных струй еще не был проделан, приведенная оценка скорости их образования является, вероятно, нижним пределом. Вывод, который можно сделать из наблюдений, заключается в том, что все звезды, в несколько раз более массивные чем Солнце, проходят через такую стадию их ранней эволюции, при которой они вызывают энергичные и массивные выбросы газа. Проходят или нет через ту же стадию менее массивные звезды, еще не известно. Возможное существование такой эволюционной стадии для звезд, подобных Солнцу, может пролить свет на все еще плохо понимаемый процесс образования планет. Планеты Солнечной системы группы Юпитера (Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун) сохранили свою первоначальную атмосферу, а планеты Земной группы (Меркурий, Венера, Земля и Марс) — не сохранили. Атмосферы Венеры, Земли и Марса (у Меркурия нет атмосферы) в их настоящем виде были образованы главным образом из вулканических выбросов в ранние моменты планетарной истории. Первоначальные атмосферы в основном состояли из водорода и гелия с малыми примесями метана, аммиака и неона; в настоящее время атмосферы совсем другие. (Единственная в своем роде земная атмосфера обогатилась кислородом за счет метаболизма живых организмов.)

Что стало с первоначальными атмосферами планет Земной группы? Господствующая гипотеза состоит в том, что первичные атмосферы были сметены сильным ветром вещества, вытекающим из Солнца. Природа ветра, очистившего внутреннюю область Солнечной системы, никогда ясно не понималась. Кажется возможным предположить, что планеты Земной группы подверглись воздействию того же рода сильного выброса газа, который наблюдается в молекулярном облаке Ориона, AFGL 490 и L 1551.

Выбросы энергии могут также помочь в объяснении загадки долговечности гигантских молекулярных облаков. Когда впервые были наблюдаены ширины спектральных линий в диапазоне от 1 до 10 км/с в большей части молекулярных облаков, думали, что эти скорости, слишком большие для теплого движения, могут быть объяснены сжатием облаков под влиянием гравитации, которое казалось возможным, потому что облака, определенно, являлись активными центрами звездообразования. Затруднение, связанное с этой идеей, состоит в том, что облака полностью бы коллапсировали за время порядка одного миллиона лет, хотя были сильные основания верить, что время жизни облаков составляет от 10 до 100 млн. лет. Более того, если бы все молекулярные облака были в стадии коллапса, то скорость звездообразования в галактике была бы значительно выше реально наблюдаемой. Что-то должно было предотвращать молекулярные облака от коллапса и передавать достаточно механической энергии в газ, чтобы поддерживать ширину линий в несколько километров в секунду по всему облаку.

С открытием высокоскоростных молекулярных выбросов вокруг молодых звезд в темных облаках загадка может быть решена. Если каждая В-звезда в процессе своей ранней эволюции приведет к образованию молекулярных струй, подобных замеченным в молекулярном облаке Ориона и в AFGL 490, то наблюдаемая скорость образования В-звезд в подгруппах ОБ-ассоциаций может быть достаточной, чтобы обеспечить механической энергией молекулярный газ массой 10^5 солнечных масс, движущийся со средней скоростью в 2 км/с, в течение 10 млн. лет.

РОЛЬ ДИСКОВ, ОКРУЖАЮЩИХ ЗВЕЗДЫ

Хотя открытие высокоскоростных выбросов в молекулярных облаках, по-видимому, решает некоторые старые проблемы, оно создает новые, совсем загадочные. Необычная энергия выбросов и их высокая частота появления нелегко согласуются с настоящей точкой зрения на формирование и раннюю эволюцию звезд. Новое свидетельство того, что мощные физические процессы сопровождают образование звезд, более массивных чем Солнце (и, возможно, к тому же звезд, не более массивных чем Солнце), не предсказывается и не объясняется существующими теориями. Какой механизм мог бы быть ответственным за высокоскоростные выбросы вокруг молодых звезд?

Любое толкование должно быть способным объяснить две важные черты: громадная энергия, заключенная в выбросах, и в нескольких важных случаях сжатие или фокусировка течений в биполярные струи. Нет необходимости считать, что основная масса движущегося вещества выбрасывается из центрального источника. По всей вероятности, этого не происходит. Более вероятно, что основная масса выброса состоит из газа молекулярного облака, сгребаемого небольшим количеством вещества, выбрасываемого из молодой звезды.

Биполярное, или разделенное на две доли, распределение течения может быть объяснено легче, чем источник энергии. Если, например, выброс первоначально сферически симметричен, то он может быть собран в биполярный поток, если центральный объект поместить в газовый диск. Выбрасываемый газ испытал бы значительно меньшее сопротивление, проходя через полюсы диска, чем он испытал бы, проходя через экватор, и в результате поток сжался бы в двух противоположных направлениях.

Существуют ли какие-либо свидетельства в пользу предположения, что такие диски могли бы образоваться вокруг молодых звезд и протозвезд? Фактически важное косвенное доказательство есть. Наше собственное Солнце есть пример этого. Согласно существующей точке зрения планеты и Солнце образовались вместе из одного коллапсирующего протозвездного облака. Очевидно, сжимающееся облако приняло форму тонкого диска, так что, когда планеты окончательно конденсировались, все они оказались более или менее в одной плоскости, очень близкой к экваториальной плоскости Солнца, где остаются на орбитах и сегодня. На несравненно больших масштабах коллапсирующее облако, которое образовало галактику, само приняло форму тонкого диска (узость Млечного Пути, видимого ясной темной ночью, показывает это). Действительно, теоретические вычисления показывают, что когда вращающийся газ, имеющий сферическую форму, сжимается, он неизбежно образует вращающийся диск.

Недавно было сообщено о наблюдении, говорящем в пользу существования диска, окружающего звезду, которая обладает особым инфракрасным спектром, звезду MWC 349 в созвездии Лебеда. Р. И. Томпсон и П. А. Стриттматтер из университета Аризоны и Э. Ф. Эрикссон, Ф. К. Виттеборн и Д. В. Стекер из исследовательского центра Эймса НАСА предположили, что спектр звезды, наиболее вероятно, образуется диском, окружающим звезду. Всестороннее изучение спектральных линий в инфракрасном диапазоне для скрытых молодых звезд, ассоциированных с какими-нибудь молекулярными струями, еще должно быть сделано, но имеющиеся в распоряжении данные о двух инфракрасных источниках AFGL 490 и похожем AFGL 961 допускают существование диска вокруг центрального объекта. На этой стадии результаты далеки от убедительности, но растет уверенность, что большинство вновь образованных звезд опоясано дисками газа и пыли.

ПРИРОДА ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ

Вопрос об источнике энергии, достаточной, чтобы поддерживать высокоскоростные выбросы, наиболее запутан. В случае AFGL 490 30 солнечных масс вытекающего молекулярного газа каким-то образом приводятся в движение центральным объектом массой, не большей чем 15 солнечных. Другими словами, каким бы ни был процесс, выделяющий энергию, он обладает достаточной мощностью, чтобы сгresti и ускорить до высоких скоростей массу вещества, примерно равную удвоенной центральной массе. На основе наблюдений в далекой инфракрасной области, сделанных с высоты 40 000 футов (12 км) летающей обсерваторией НАСА (Хорвей), М. Ф. Кэмпбелл и У. Ф. Хоффманн из университета Аризоны вычислили, что полная светимость AFGL 490 в 1400 раз превышает солнечную. Следовательно, потребовалось бы 10^3 лет для AFGL 490, чтобы излучить лучистой энергии, сравнимой с механической энергией, которая заключена в вытекающем молекулярном газе. Если, как было оценено, выброс продолжается 10^4 лет, то 10% испущенной центральным объектом энергии превратилось в механическую. Либо это действительно так, либо механическая энергия поставляется другим источником энергии, который действует вместе с источником лучистой энергии.

Другие возможные источники энергии попадают в два следующих класса: процесс, который включает в себя один или более взрывных выбросов газа из центрального объекта, или процесс, который обеспечивает постоянный поток газообразного вещества из центрального объекта. Если бы единственное событие взрывного характера привело к струям, то первоначальная энергия взрыва должна была бы быть много больше кинетической энергии, наблюдаемой сейчас в высокоскоростном молекулярном газе. Причина этого в том, что большинство первоначальной энергии взрыва унеслось бы ударными волнами, возбуждаемыми выбрасываемым веществом. Только часть энергии могла бы быть непосредственно вложена в виде механической энергии. Тем не менее взрыв сверхновой, спрятанной в молекулярном облаке, мог бы легко обеспечить достаточным количеством энергии, чтобы объяснить выброс. Слабость этой гипотезы состоит в том, что частота рождения сверхновых в окрестности Солнечной системы в 20 раз ниже, чем скорость появления биполярных молекулярных выбросов. Наблюдательные данные дают более прямой аргумент против гипотезы одного взрыва. На 11-метровом радиотелескопе на Китт-Пике мною были проделаны чувствительные наблюдения вытекающих струй в AFGL 490. Найдено, что газ самых высоких скоростей занимает только малую часть общего объема движущегося газа. Очевидно, высокоскоростной поток сильно замедляется при своем движении от источника. Следовало бы также ожидать замедления вещества, выбрасываемого при одном взрыве, при его столкновении с окружающим облаком; в этом случае не наблюдалось бы изменения скоростей поперек струи из-за того, что все вещество, сгребаемое одним взрывом, замедлялось бы с одной и той же скоростью и имело бы в настоящее время одинаковую скорость. Другое возражение против гипотезы одного взрыва состоит в том, что большой выброс энергии мог бы разрушить диск, окружающий звезду, который необходим для того, чтобы сохранить биполярность потока.

НЕПРЕРЫВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

По указанным выше причинам постоянный выброс или серии взрывов лучше объясняют наблюдения. Хотя последовательность малых взрывов не может быть исключена, постоянный выброс кажется более вероятным.

В астрофизике существуют прецеденты такого явления. Известно, что большинство звезд, включая Солнце, теряют массу в виде звездного ветра. Для Солнца в настоящее время скорость потерь очень мала, около 10^{-14} солнечных масс за год. Импульс и энергия такого спокойного ветра настолько малы, что не могут вызвать выбросов, наблюдаемых в молекулярных струях. Кажется вероятным, однако, что когда Солнце было молодым, скорость потери массы была много выше, возможно, 10^{-7} солнечных масс

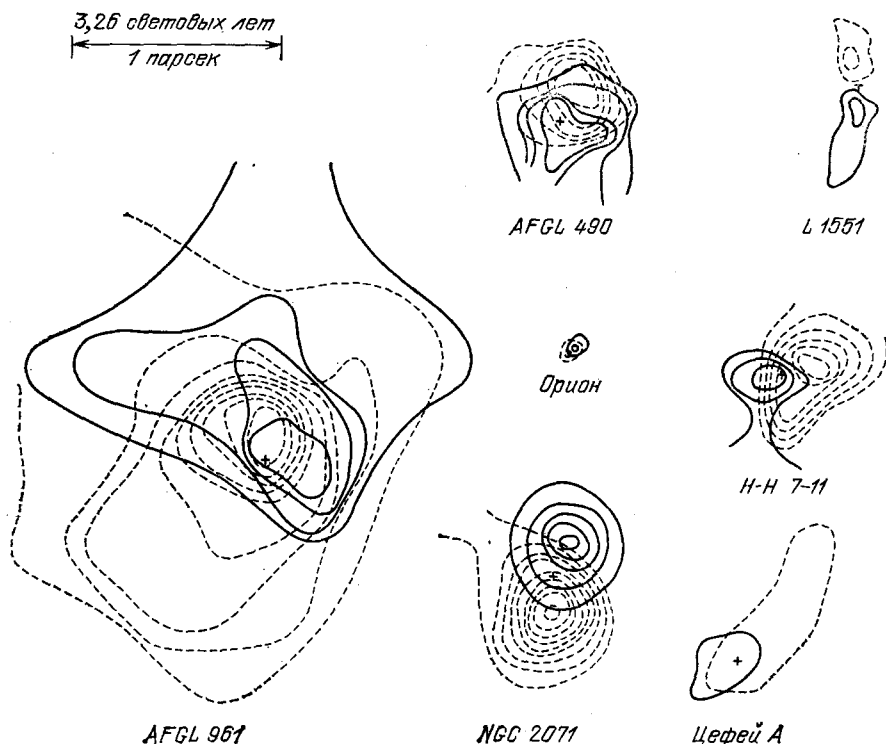


Рис. 9. Семь систем высокоскоростных струй, расположенных вблизи семи молодых звездных объектов, нанесены на карту в одном масштабе.

Штриховые контуры показывают излучение окиси углерода, смещенное в красную сторону, сплошные контуры — в синюю. Излучение окиси углерода от каждого источника образует как бы две доли, между которыми расположен инфракрасный объект (крестик). Карта Ориона была выполнена Эриксоном, Голдсмитом, Хьюджунином, Снеллом, Улихом и автором на ММТ. Карты AFGL 490 и AFGL 961 сделаны Хорвейем, Т. Н. Гаульером из университета Аризоны и автором. Карта NGC 2071 сделана Д. Волли из «Велл лабораториз», карта H-N 7-11 — Снеллом и С. Эдвард из Смит Колледжа, карта Цефея А — Л. Родригесом из Мексиканского института астрономии, Т. П. Хо из Беркли и Д. М. Мораном из Центра астрофизики обсерватории Гарвардского колледжа и Смитсоновской астрофизической обсерватории. Сотрудники, выполнившие карту L 1551, перечислены в подписи к рис. 8.

в год. Потери массы у звезд типа Т Тельца, объектов, про которые думают, что они являются предками звезд, подобных Солнцу, сейчас наблюдаются того же порядка величины. Даже если это так, то импульс, передаваемый таким ветром окружающему молекулярному газу, был бы в 10 раз меньше импульса, необходимого, чтобы объяснить выброс вокруг L 1551, и в 10^4 раз меньше для AFGL 490 и молекулярного облака Ориона.

Остается рассмотреть последний источник энергии: наружное давление самой звездной радиации. Мы уже видели, что полная кинетическая энергия, переносимая молекулярными струями, равна не более чем 10% лучистой энергии, излучаемой центральной звездой в течение динамиче-

ского периода существования потока. А может ли радиация быть движущей силой выбросов?

Для того чтобы оценить эффективность радиации как движущей силы, мы должны вычислить давление в радиационном поле: количество импульса, переносимого фотонами. При столкновении между фотоном и частицей газа или пыли импульс передается от фотона к частице. Согласно специальной теории относительности импульс p , переносимый фотоном, связан с его энергией E соотношением $p = E/c$, где c — скорость света. Полная яркость звезды L равна количеству энергии, уносимой фотонами за одну секунду.

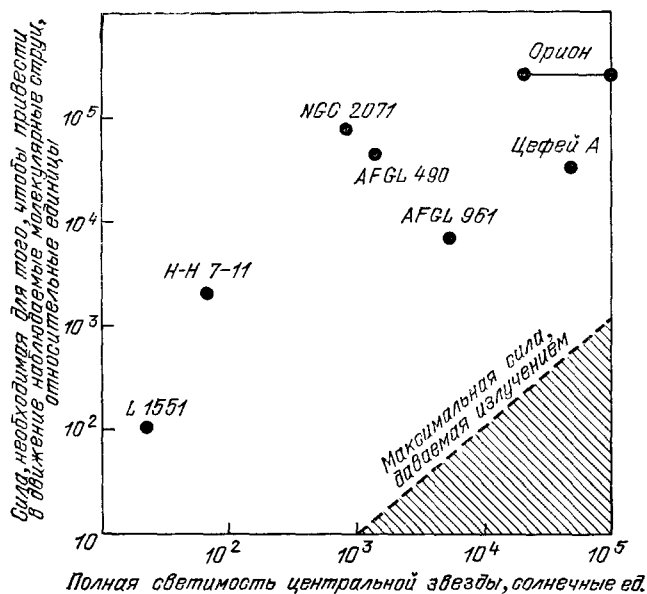


Рис. 10. На этой диаграмме видно, что радиационное давление не способно ускорить молекулярные струи в семи системах, нанесенных на карту на рис. 9.

Масса молекулярного газа в биполярном потоке часто может превышать 10 солнечных масс. Сила, необходимая для того, чтобы ускорить такую большую массу до наблюдаемых высоких скоростей в молекулярных струях, огромна. Наклонная линия показывает максимальную силу, которая может дать радиационное давление от молодых звездных объектов, расположенных в центре потока. Даже для звезд, которые излучают радиацию в 10^4 раз больше, чем Солнце, или $4 \cdot 10^{37}$ эрг/с, не хватает многих порядков в величине радиационного давления, чтобы обеспечить нужную силу.

Диаграмма основана на данных, собранных Бейли и автором.

Следовательно, если каждый фотон по крайней мере где-то поглощается, то полный импульс, который звезда может передать окружающему газу или пыли за одну секунду, равен как раз L/c . Например, в случае горячих, гигантских О-звезд импульс, который может быть передан фотонами, превышает импульс, переносимый частицами звездного ветра. Будет ли такое сильное радиационное давление достаточным, чтобы объяснить молекулярные струи?

Д. Бейли из «Белл лабораториз» и я недавно исследовали эту возможность, сравнивая силу радиационного давления с силой, необходимой, чтобы привести в движение поток в хорошо изученных молекулярных струях. В каждом случае мы нашли, что импульс вытекающего газа примерно в 10^2 — 10^3 раз больше импульса, получаемого из радиационного давления, в предположении, что все фотоны поглощаются. Следовательно, радиационное давление, по-видимому, не способно дать наблюдаемые выбросы молекулярного газа.

Если ни освобождаемая взрывом энергия, ни радиационное давление не могут объяснить молекулярные струи, наблюдаемые вокруг молодых звезд, то какой же механизм тогда работает? Этот стержневой вопрос в течение некоторого времени будет занимать астрофизиков-теоретиков. Каков бы ни был ответ, он может пролить свет не только на наше понимание образования и ранней эволюции звезд, но, возможно, также на понимание процессов, которые приводят к загадочным струям, найденным около квазаров и радиогалактик³. Наблюдения в инфракрасном и миллиметровом диапазонах длин волн нашли место для еще одного маленького кусочка в картине-загадке (головоломке, в которой нужно сложить мелкие кусочки, чтобы получить полную картину) образования и эволюции звезд. Какие другие кусочки осталось найти? Сколько нужно найти еще кусочков, прежде чем загадка окончательно разрешится? Эти волнующие проблемы настоящего и будущего будут противостоять непрерывному прогрессу как в наблюдательном, так и в теоретическом фронтах астрофизики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bok B. J. Scientific American.— March 1981, v. 244, p. 70.
2. Blitz L. — Ibid., April 1982, v. 246, p. 72.
3. Blandford R. D., Begelman M. C., Rees M. I.— Ibid., May 1982, v. 246, p. 84.