

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

523.85.621.378.3

## КОСМИЧЕСКИЕ МАЗЕРЫ \*)

Д. Дикинсон

*Некоторые туманности и звездные атмосферы испускают мощное радиоизлучение. Оно возникает в результате действия мазера, которое в радиодиапазоне похоже на действие лазера, излучающего видимый свет.*

Усовершенствование мазера, используемого, с одной стороны, как хронометр беспримерно высокой точности, а с другой — как прибор для усиления слабых радиосигналов, началось 24 года тому назад. Это было технологическое достижение первостепенного значения. Изобретение Чарльзом Таунсом мазера было связано с тем глубоким пониманием квантовомеханического поведения вещества, которое было достигнуто в предыдущую половину столетия. Интересно представить себе, как бы интерпретировали радиоастрономы необычный сигнал от облака молекул гидроксила (ОН) в Большой Туманности Ориона, который был зарегистрирован в 1965 г., если бы мазер не был изобретен. В действительности это чисто умозрительный вопрос, так как к тому времени мазеры были установлены на радиотелескопах в качестве усилителей. Тем не менее неожиданно сигнал оказался настолько сильным, что до тех пор, пока его природа не была понята, радиоастрономы, отчасти серьезно, отчасти в шутку, называли неизвестный излучающий газ «таинственным» («мистериумом»). В конце концов был сделан вывод о том, что газовые облака вблизи туманностей, содержащих молодые звезды, могут действовать как гигантские космические мазеры. Несколько лет спустя мазеры были обнаружены в пылевых атмосферах стареющих красных звезд.

Действие мазера состоит в подъеме большого числа атомов или молекул в газе в какое-то квантовое состояние с определенной энергией, а затем во внезапном и одновременном переходе в какое-нибудь состояние с более низкой энергией. Энергия, а следовательно, и частота каждого фотона, излучаемого в этом процессе, в точности равна энергии, которую теряет атом или молекула при переходе из верхнего в нижнее состояние. Слово мазер составлено из начальных букв английского названия процесса: микроволновое (радиоволновое) усиление, основанное на вынужденном испускании излучения. (Если излучение происходит в оптической области спектра, то слово «микроволновое» заменяется на «оптическое» (light). Отсюда получается слово лазер.)

\*) Dickinson D. F. Cosmic Masers.— Scientific American, June 1978, v. 238, № 6, pp. 68—70, 73—79.— Перевод С. В. Буланова.

Д. Дикинсон читает лекции по астрономии в Астрономическом центре Обсерватории Гарвардского колледжа и в Смитсоновской астрофизической обсерватории, США.

© Scientific American, Inc., 1978.

© Перевод на русский язык,  
Главная редакция физико-математической  
литературы издательства «Наука»,  
«Успехи физических наук», 1979.

О межзвездных и звездных мазерах стало известно многое за последние двенадцать лет. На сегодняшний день открыто приблизительно 300 источников, обладающих мазерным излучением молекул гидроксила. Кроме того, в скоплении, содержащем более 80 звезд, было найдено мазерное излучение молекул воды. Звезды, имеющие водяные мазеры, были

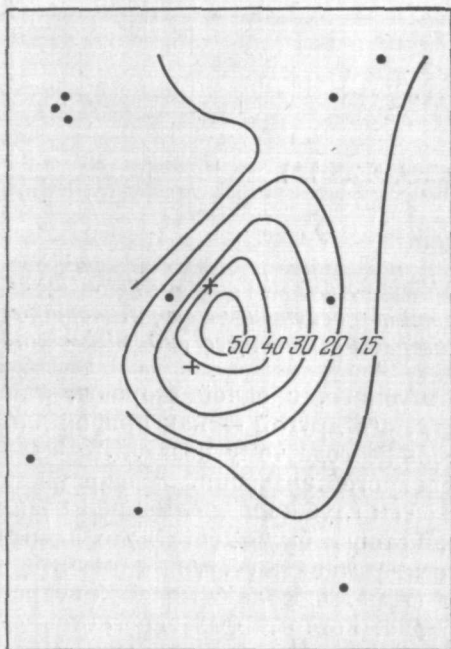


Рис. 1. Межзвездные водяные мазеры в Мессье 17 (Туманность Подкова или Туманность Омега) в созвездии Стрельца отмечены двумя крестами.

Эта область, по-видимому, представляет собой место активного образования звезд. Контурные линии показывают относительную яркость радиоволнового излучения молекулы монооксида углерода. Невидимый на фотографии объект лежит внутри самого внутреннего контура. Он может представлять собой звезду на стадии образования. Эти мазеры открыты в 1973 г. К. Джонстоном, Р. Слонейкером и Дж. Болонья из Военно-морской лаборатории. Их излучение наиболее сильно на частоте 22,235 МГц (длина волны 1,35 см). На сегодняшний день найдено несколько дюжин межзвездных водяных мазеров. Кроме того, более 80 водяных мазеров открыто в атмосферах гигантских и сверхгигантских красных переменных звезд. Во многих случаях по соседству с водяными мазерами находятся гидроксильные

подвергнуты изучению на предмет существования излучения молекул гидроксила. Оказалось, что около 80 процентов из них имеют также гидроксильные мазеры. Это было неожиданно, так как в обычных условиях  $\text{OH}$  быстро распадается, давая  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{O}_2$ . В оболочках переменных звезд совсем недавно были идентифицированы мазеры на монооксиде кремния ( $\text{SiO}$ ). Во многих из этих оболочек находятся также водяные и гидроксильные мазеры.

Для того чтобы мазер работал, какой-нибудь источник энергии должен «накачивать» молекулы на квазистабильный уровень, с которого они могут перейти на более нижний уровень в результате вынужденного процесса. В первое время предлагались различные механизмы накачки, включая столкновения молекул, ударные волны и химические реакции. В настоящее время кажется несомненным, что инфракрасное излучение является накачкой как для мазеров в оболочках переменных звезд, так, возможно, и для других космических мазерных систем.

## ПЕРВЫЙ ГИДРОКСИЛЬНЫЙ МАЗЕР

К 1963 г., т. е. за два года до открытия поставившего всех в тупик сигнала из Туманности Ориона, гидроксил был единственной молекулой, обнаруженной в межзвездном пространстве. Молекулы гидроксила в облаке холодного газа выдали себя по поглощению радиоизлучения Кассиопеи А — остатка взрыва Сверхновой. Они были причиной обнаружившего их «провала» (или линии поглощения) в радиодиапазоне на частоте  $1,667 \text{ Мгц}$ , которая соответствует длине волны  $18 \text{ см}$ . Это открытие вызвало широкий поиск линий поглощения гидроксила в других областях космического пространства. Об этих областях было известно, что они освещаются сзади мощными радиоисточниками. Также казалось возможным, что если молекулы гидроксила присутствуют в достаточном количестве, то они могут быть обнаружены по их слабому излучению на частоте  $1,667 \text{ Мгц}$ . Возможными кандидатами считались облака, про которые было известно, что они должны быть богаты атомарным водородом (H). Однако из областей, которые первоначально предполагались многообещающими, не было обнаружено никакого излучения молекул гидроксила.

Открытие линий излучения молекул гидроксила в космическом пространстве принадлежит радиоастрономам из Калифорнийского университета в Беркли. Они наблюдали Туманность Ориона, представляющую собой обширную область ионизованного водорода, удаленную от нас приблизительно на  $1500$  световых лет. В действительности они рассчитывали

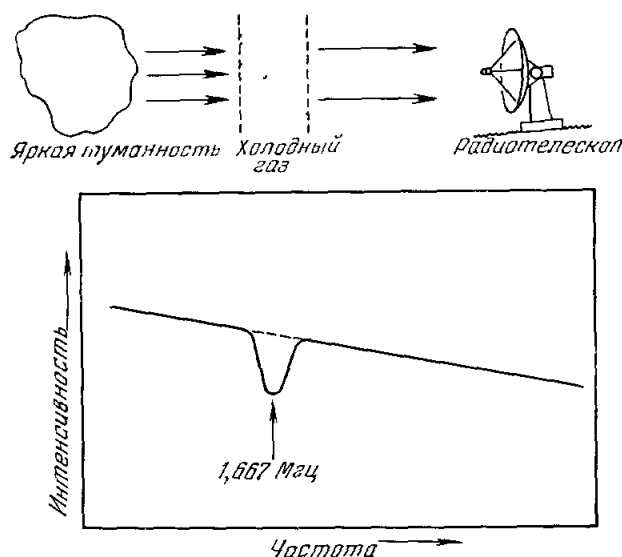


Рис. 2. Абсорбционные линии образуются в том случае, когда облако холодного газа поглощает некоторую долю излучения яркой туманности или какого-нибудь другого источника.

Поглощение происходит на характерной для данной молекулы частоте. В случае гидроксильных молекул линия поглощения лежит на частоте  $1,667 \text{ Мгц}$ . Ширина линии является мерой дисперсии скоростей молекул в газе.

найти линии поглощения гидроксила. Причиной их первого недоумения было то, что обнаруженная линия излучения оказалась не только намного сильнее всего, что ожидалось найти, но также имела непредвиденное значение частоты, равное  $1,665 \text{ Мгц}$ . Хотя эта линия и является одной из четырех линий излучения, характерных для основного состояния (состоя-

ния с наименьшей энергией) молекулы гидроксила, но обычно она в два раза слабее линии с частотой  $1,667 \text{ Мгц}$ . В радиоспектре Туманности Ориона линия  $1,667 \text{ Мгц}$  странным образом отсутствовала. Остальные две линии основного состояния молекулы гидроксила лежат на  $1,612$  и  $1,720 \text{ Мгц}$ . Так как в лабораторных условиях их интенсивность составляет одну девятую интенсивности линии с частотой  $1,667 \text{ Мгц}$ , то не ожидалось, что они будут обнаружены. Для того чтобы объяснить, почему молекула может излучать линию при  $1,665 \text{ Мгц}$  без генерации более яркой линии на  $1,667 \text{ Мгц}$ , астрономы прибегли к гипотезе мистериума.

В результате дальнейшего изучения линии излучения в Туманности Ориона и наблюдения аналогичных линий в спектрах других туманностей астрономы из Беркли были вынуждены сделать странный вывод о том, что они обнаружили первый природный мазер. Какие-либо сомнения, которые могли оставаться, были рассеяны после того, как астрономы

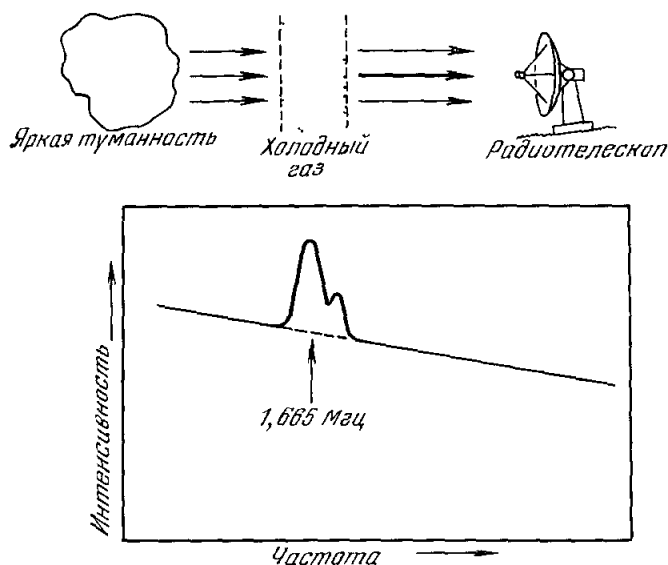


Рис. 3. Сильная эмиссионная линия наблюдается в случае, если газовое облако содержит мазерную систему.

При этом излучение из туманности вынуждает гидроксильный мазер излучать на частоте  $1,665 \text{ Мгц}$ , а не в обычно более сильной линии у  $1,667 \text{ Мгц}$ .

сумели определить видимую температуру области, излучающей мазерным образом. Видимая температура — это та температура, до которой должна быть нагрета в тепловом равновесии совокупность молекул гидроксила для того, чтобы испускать наблюдаемое количество энергии в линии излучения. Приблизительная оценка температуры приводит к значению  $10^{13} \text{ }^\circ\text{K}$ . Так как молекулы разрушаются при намного более низких температурах, то нарисованная картина ясно указывает на то, что обычные правила термодинамики здесь неприменимы. Линии излучения в Туманности Ориона должны быть результатом нетепловых процессов. Единственным приемлемым объяснением был мазер.

#### КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА МАЗЕРОВ

Давайте рассмотрим несколько более подробно квантовые явления, которые лежат в основе мазеров, как сделанных человеческими руками, так и космических. Атомы и молекулы обладают энергией, которая может

проявляться в различных формах. В традиционной картине атома электроны движутся вокруг ядра по простым орбитам. В случае молекул иногда более правильно представлять себе электроны в виде электронных облаков. Так как «ядро» молекулы состоит из двух или более атомов, то движение атомов само по себе может вносить вклад в общую энергию молекулы. Атомы могут колебаться относительно друг друга. Они могут вращаться, кувыркаясь подобно маленьким гантелям. Они также могут взаимодействовать посредством электромагнитных взаимодействий. Все виды взаимодействия вносят вклад в энергию молекулы. Значение полной энергии может изменяться в зависимости от того, в каком возбужденном состоянии находится молекула. Квантовая механика учит, что энергия не может меняться непрерывно — доступны только дискретные энергетические уровни или ступени. Когда атом или молекула возбуждаются (получают энергию), например, в результате столкновения с другим атомом или молекулой или взаимодействия со световыми фотонами, они должны совершить скачок совершенно определенной величины на новую ступень энергетической лестницы. Наоборот, когда у атома или молекулы снимается возбуждение, они опускаются вниз на одну или более целых ступеней. Разность энергий или излучается наружу в виде кванта электромагнитной энергии, или передается непосредственно в процессе столкновения другому атому или молекуле.

Большинство энергетических переходов затрагивает электронные уровни энергии. Эти переходы обычно приводят к появлению фотонов ультрафиолетового или видимого излучения. Они происходят, например, в звездах и горячих газовых туманностях и изучаются специалистами в области оптической астрономии. В меньшей части энергетических переходов принимает участие вращение молекул. Эти кванты попадают в радиодиапазон спектра. Такое низкоэнергетичное излучение — сфера деятельности радиоастрономов. Оно происходит из более холодных областей космического пространства, таких, как межзвездные облака, или, в случае некоторых мазеров, из протяженных атмосфер холодных звезд определенных типов.

Мазеры избирательно усиливают некоторые переходы вследствие неравновесности распределения атомов или молекул на отдельном энергетическом уровне. Обычно при заданной температуре молекулы в данном объеме газа находятся в тепловом равновесии, подчиняясь плавному распределению по энергиям с максимальной величиной, характеризующей температуру. Если температура понижается, то средняя кинетическая энергия частиц в объеме уменьшается, средний уровень возбуждения падает и максимум излучения перемещается в область более низких энергий. Если температура увеличивается, средний возбужденный уровень поднимается и максимум излучения смещается к более высоким значениям энергии. В тепловом равновесии полное распределение атомарных или молекулярных энергетических уровней определяется кинетической энергией газа.

Мазерное излучение может иметь место, если равновесное состояние нарушается так, что перенаселяется некоторый энергетический уровень. При этом он содержит намного больше молекул, чем можно было бы ожидать на основании среднего значения кинетической энергии молекул газа. О возникновении перенаселенного состояния говорят также как об инверсной заселенности рассматриваемого энергетического уровня. Такие инверсные заселенности могут встречаться повсюду в межзвездных облаках низкой плотности, которые обычно содержат только от  $10^3$  до  $10^7$  молекул в кубическом сантиметре (по сравнению с приблизительно  $10^{19}$  см<sup>-3</sup> в воздухе, которым мы дышим). Из-за того, что столкновения между молекулами не часты, они не всегда являются преобладающим фактором в про-

цессах возбуждения газа как в случае более плотного газа. Могут возникнуть отклонения от равновесия: перенаселение или искажение некоторых энергетических уровней.

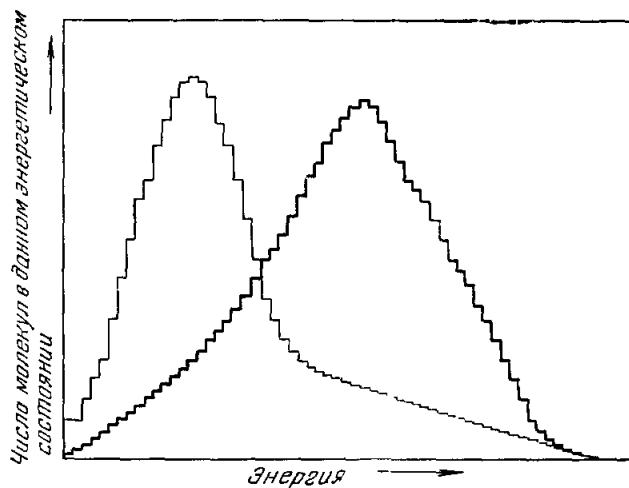


Рис. 4. Тепловое равновесие в гипотетической популяции газовых молекул описывается гладким распределением энергетических состояний вокруг некоторого среднего значения.

При низких температурах большая часть молекул концентрируется на уровне с малой энергией. По мере роста температуры распределение сдвигается в направлении более высоких энергий. Излучение молекул с такими распределениями является тепловым.

Такие инверсные заселенности могут возникать двумя способами: из-за столкновений или из-за взаимодействия с излучением. В любом случае газ поглощает энергию весьма избирательным образом. Для того

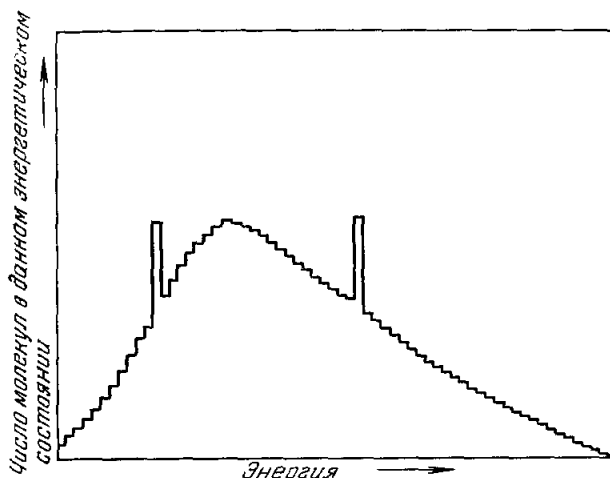


Рис. 5. Нетепловое равновесие осуществляется тогда, когда некоторые энергетические состояния (здесь два состояния) приобретают необычно большую населенность за счет других.

Такие «инверсные» уровни являются источниками нетеплового излучения искусственных или природных лазеров.

чтобы осуществить наиболее эффективный ввод энергии, необходимо выполнить ряд условий. Например, в идеализированном случае, если вводить

энергию в виде излучения, то фотоны должны иметь преимущественно одну частоту. Для столкновительных процессов пучок электронов должен состоять из частиц с одной и той же энергией.

В настоящее время полагают, что большинство космических мазеров накачивается радиационными процессами. Трехуровневый мазер представляет собой типичный пример такого процесса накачки. Находясь на наиболее высоколежащем из трех уровней, уровне 3, молекула имеет большую вероятность спонтанно потерять энергию. Состояние 3 распадается часто каскадом через промежуточные уровни. Молекула переходит в состояние 2. Достигнув уровня 2, молекула, однако, обладает относительно небольшой вероятностью самопроизвольно перейти на уровень 1. Если присутствует излучение с частотой, соответствующей переходу с уровня 1 на уровень 3, то газ может быть возбужден на уровень 3. Множество молекул будет поглощать энергию, забрасываться на уровень 3 и быстро излучать наружу некоторую часть вновь приобретенной энергии в процессе перехода через промежуточные состояния на уровень 2. В результате уровень 2 обладает инверсной заселенностью. Это делает его готовым к мазерному действию.

Молекула на уровне 2 особенно восприимчива к взаимодействию с квантом, имеющим энергию, равную разности энергий между уровнями 1 и 2. Как для камня на краю обрыва достаточно маленького толчка, чтобы он скатился вниз, так и здесь достаточно небольшого возмущения, чтобы молекула перешла на уровень 1 и излучила квант с энергией, равной энергии кванта, вызвавшего этот процесс. Эти два кванта порождают четыре; четыре — восемь и так далее. Исходная порция энергии усиливается в миллионы раз в процессе распространения волны излучения через газовое облако, черпая энергию от приготовленных заранее молекул на уровне 2. Такой мазерный процесс сосредоточивает большую часть энергии облака в виде высоконаправленного луча, обладающего большой интенсивностью, кванты которого имеют одну и ту же частоту.

#### ЗВЕЗДЫ С МОЛЕКУЛЯРНЫМИ МАЗЕРАМИ

Так как космические мазеры открыты сравнительно недавно, то несомненно, что еще много интересного предстоит узнать в процессе их дальнейшего изучения. Наиболее хорошо исследованные к настоящему времени мазеры ассоциируются со специальным классом старых, умирающих звезд, известных как переменные красные. Первый звездный мазер был обнаружен в 1968 г., когда У. Уилсон и А. Баррит из Массачусетского технологического института зарегистрировали мощное излучение гидроксила от нескольких красных переменных звезд. Красные переменные израсхо-

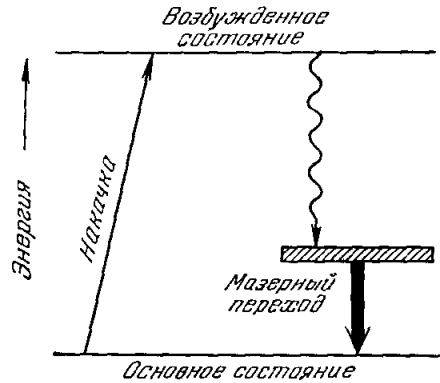


Рис. 6. Трехуровневая система иллюстрирует принцип работы мазера.

Молекула в основном состоянии 1 поглощает энергию из-за столкновений или излучения и «накачивается» на более высокий уровень 3 (возбужденное состояние). Молекула самопроизвольно теряет часть энергии и «спускается вниз», возможно, через промежуточные уровни в квазистабильное состояние 2. Энергетический уровень 2 тем самым перенаселен. Если теперь молекула взаимодействует с фотоном, чья энергия в точности равна разности энергий между уровнями 2 и 1, то молекула «упадет» на уровень 1, испуская квант света с энергией такой же, как у исходного фотона. При этом из одного фотона получается два, из двух — четыре и так далее. Это приводит к экспоненциальному росту числа моноэнергетических фотонов.

довали большую часть своего водородного горючего и покинули «главную последовательность» устойчивых звезд. По мере того как иссякают запасы водорода звезды, падает внутреннее давление, которое необходимо для уравнивания гравитационного притяжения ее собственной массы. Периодические ударные волны выбрасывают вещество в окружающее межзвездное пространство. Таким образом звезды становятся попеременно то ярче, то темнее.

Такие звезды распадаются, грубо говоря, на два класса. Переменные типа Мира Кита (названные так по имени прототипа класса, чья переменность была впервые описана в 1957 г.) — это «гиганты», долгопериодические переменные звезды, чьи циклы вполне предсказуемы и имеют продолжительность от 200 до 500 дней. Второй класс состоит из более массивных и имеющих большую светимость «сверхгигантов». Их периоды менее регулярны и заключены в интервале от 500 до 1000 дней.

Красные переменные ведут наиболее бурную жизнь среди всех звезд, за исключением новых и сверхновых. Во время каждой пульсации газ и пыль извергаются в протяженную атмосферу, окружающую звезду. Размеры этой атмосферы сравнимы с размерами Солнечной системы. (Радиус старой звезды может значительно превышать расстояние от Солнца до Земли.) Здесь в этих околосветных облаках и возникает мазерное излучение.

Одна из главных особенностей переменных звезд с мазерным излучением — их цвет. Солнце, где поверхностная температура приблизительно равна 6000 градусов Кельвина, наиболее интенсивно излучает на длинах волн около 0,5 мкм, в желто-зеленой области видимого спектра. Долгопериодические звезды — более холодные, их температура порядка 2000° К. Основная доля их излучения приходится на невидимую инфракрасную область спектра с максимумом интенсивности, расположенным на длинах волн в 1,5 мкм. Современный уровень развития инфракрасной техники позволил астрономам изучать эту ранее недоступную спектральную область. Одно из главных открытий состоит в том, что все переменные красные гиганты и сверхгиганты характеризуются сильным «инфракрасным избытком». Иными словами, они излучают больше инфракрасного излучения, чем можно было предсказать, исходя из их видимых спектров. Источником инфракрасного избытка является окружающая звезду атмосфера из пыли и газа. Эта атмосфера выброшена из звезды и, следовательно, более холодная, чем звезда сама по себе. Типичная температура оболочки порядка нескольких сотен градусов Кельвина, ненамного выше точки кипения воды. Ее излучение наиболее велико на длинах волн в диапазоне от 10 до 20 мкм.

Как мы видели, молекула гидроксильная в ее основном состоянии обычно излучает интенсивнее всего на 1,667 МГц, приблизительно в два раза слабее на 1,665 МГц и намного слабее на 1,612 и 1,720 МГц. Почти все звездные гидроксильные мазеры излучают сильнее всего на частоте, равной 1,612 МГц. Излучение в этой линии полностью преобладает над линиями 1,667 и 1,665 МГц. Линия 1,720 МГц никогда не была видна вообще.

Второй разновидностью молекул, которая была найдена в мазерах, ассоциируемых с оболочками звезд, были молекулы воды. Для них было найдено, что частота их излучения равна 22,235 МГц, а длина волны 1,35 см соответственно. В 1969 г. мощный водяной мазер был замечен в звезде, обозначаемой как VY в созвездии Большого Пса в южном небе. С тех пор было открыто более 80 звезд, обладающих мазерным излучением молекул воды.

Третий тип молекулярных мазеров, замеченных в переменных звездах, излучает в линиях монооксида кремния (SiO). Излучение происходит



в основном на частотах 43,122 *Мгц* (6,95 *мм*) и 86,243 *Мгц* (3,47 *мм*). Открытие сильного излучения на этих частотах было сенсационным событием, так как моноокись кремния одна из наименее распространенных молекул среди обнаруженных в космосе. В действительности открытие было делом удачи и результатом тонкой и упорной исследовательской работы Л. Снайдера и Д. Буля из NASA. Одна из линий монооксида кремния попала в полосу частот «окна» их инструмента во время поисков других молекул в Туманности Ориона. Быстрое определение частоты показало, что сигнал находится на краю полосы пропускания их инструмента. Сигнал находился в диапазоне частот, в котором их приемник был чувствителен, но который был полностью вне интересующей их области.

Тщательное определение положения и размеров излучающей области показало, что источник излучения точечный, как можно было бы ожидать для мазера. Линия монооксида кремния имела сложную составную структуру, которая затрудняла оценку частоты излучения. Тщательное и трудоемкое сравнение с мазерным излучением молекул воды в Туманности Ориона, однако, дало в руки нить, которая в конечном счете привела к частоте, согласующейся с известным вращательным переходом молекулы монооксида кремния. Удивительным было то, что обнаружили не переход на основной уровень, а вращательный переход, когда молекула находится в высоковозбужденном состоянии. Для существования заметной населенности в этом состоянии требуется температура выше 1000 °K.

Сочетание молекулы редкого вида и ненормального высоковозбужденного состояния вызывало большие сомнения. Один астрофизик провозгласил, что источник может быть мазером, но не может быть моноокисью кремния. Другой утверждал, что, возможно, это моноокись кремния, но что источник не может быть мазером! Ясность в этом вопросе была достигнута после того, как Дж. Дейвис и П. Таддеус, работающие в Наблюдательной станции миллиметровых волн Техасского университета, обнаружили две близко расположенные вращательные линии монооксида кремния на 43,122 и 129,363 *Мгц*. Это открытие не оставило никаких сомнений в том, что первоначальная идентификация Снайдера и Буля была правильной.

#### МАЗЕРЫ С ДОППЛЕРОВСКИМ СДВИГОМ

Свойства звезд, обладающих молекулярными мазерами, изучались в течение нескольких лет. Одной из их наиболее поразительных характеристик является изменение оптического, инфракрасного и мазерного излучения гидроксила. Вариации видимого излучения звезды периодические. Рост и падение интенсивности происходит плавно каждые несколько сотен дней. Изучение инфракрасного потока показало, что он повторяет изменения в видимой области. Поведение интенсивности излучения OH мазеров прослежено для многих звезд. Оно также меняется в фазе с оптическим излучением. Что касается излучения водяных мазеров, то здесь положение не такое определенное. Было подробно изучено только несколько звезд. У двух изменения хорошо синхронизованы с излучением в видимом диапазоне. Для одной звезды положение неясное. В четвертой звезде излучение молекул воды и оптическое излучение полностью некоррелированы.

Различные спектральные линии, ассоциируемые с мазерными звездами, обычно сдвинуты в сторону больших или меньших частот соответственно скорости источника излучения. Это дает важную информацию о структуре звезды и окружающей ее атмосфере. Если облако, излучающее

мазерным образом, движется в нашем направлении, то частота увеличивается. Если облако движется от нас, то частота уменьшается. Астрономы всегда принимают во внимание возможность таких доплеровских сдвигов по частоте. В рассматриваемых случаях скорости могут простираются от относительно небольших значений в несколько километров в секунду до сравнительно больших, равных нескольким десяткам километров в секунду.

Линии излучения молекул гидроксила почти всегда разделяются на две группы, соответствующие различным скоростям. Очевидно, вывод состоит в том, что мы видим два мазера. Один расположен на переднем фронте окружающей звезду атмосферы, другой на задней стороне. При этом атмосфера раздувается в направлении от звезды. Хотя несомненно то, что мазеры распределены сферически симметрично в звездной атмосфере, мазерное излучение обладает высокой направленностью. Звездные мазеры испускают два луча: направленный вперед и назад, сдвинутый на 180 градусов. Ориентация оси луча, по-видимому, задается потоком излучения от центральной звезды, которое приводит к вынужденным переходам. Те мазеры, которые мы видим, лежат приблизительно на луче зрения, проведенном в направлении наблюдаемой звезды. Остальные мазеры в оболочке этой звезды проецируют свои лучи радиально в других направлениях. Там, где водяные мазеры и мазеры монооксида кремния сосуществуют с гидроксильными мазерами, их доплеровские скорости оказываются внутри интервала скоростей молекул гидроксила. Иногда они сами по себе имеют структуру с двумя максимумами.

При восстановлении свойств всей совокупности излучающих молекул и атомов в звезде необходимо принимать во внимание хорошо известные линии излучения и поглощения звезды, которые регистрируются обычной оптической техникой. Оптические линии обладают некоторыми особенностями. Например, линии излучения обычно имеют больший сдвиг по скорости в направлении наблюдателя, чем линии поглощения. Это указывает на то, что излучение образуется в веществе расширяющейся оболочки звезды.

Я говорил о том, что линии излучения гидроксильного мазера обычно имеют два максимума по скорости. Если рассматривать зависимость величины разности скоростей максимумов от периода пульсаций центральной звезды, то можно найти, что они связаны удивительно простым образом. Более длинному периоду соответствуют большие разности скоростей. Гидроксильные мазеры, связанные с короткопериодическими переменными типа Мира Кита, имеют разность скоростей порядка  $5 \cdot 10$  км/сек. Гидроксильные мазеры, ассоциируемые с долгопериодическими сверхгигантами, имеют разность скоростей более 40 км/сек. Эта замечательная зависимость между двумя, казалось бы, несвязанными величинами наводит на мысль о степени упорядоченности, свойственной искусственным системам.

Давайте теперь рассмотрим то, что мы знаем о мазерных звездах, и попытаемся собрать отдельные куски в последовательную картину.

#### МЕХАНИЗМ НАКАЧКИ МАЗЕРОВ

Мы попытаемся ответить на два вопроса. Во-первых, что представляет собой источник накачки мазера? Во-вторых, имея источник накачки, можем ли мы восстановить картину звездной системы, содержащей в себе мазер? По всей видимости, два механизма накачки суть столкновения и излучение. Интенсивность гидроксильного мазера изменяется соответственно изменению светимости звезды. Мазерный цикл отстает от оптического цикла самое большее на 30 дней. Это, несомненно, означает, что мазер возбуж-

дается излучением просто потому, что столкновения не могут распространяться достаточно быстро сквозь окружающее звезду облако, чтобы быть причиной наблюдаемого временного изменения интенсивности мазера. Например, скорости, характерные для звезды и окружающего ее газа, порядка  $10 \text{ км/сек}$  или меньше. Даже если бы радиус атмосферы звезды был маленьким, например  $10^9 \text{ км}$ , что несколько больше, чем расстояние от Солнца до орбиты Юпитера, то характерное время столкновительных процессов для этих расстояний было порядка  $10^8 \text{ сек}$  (т. е. около трех лет). Таким образом, мы должны сделать вывод о том, что излучение является накачкой для звездного мазера.

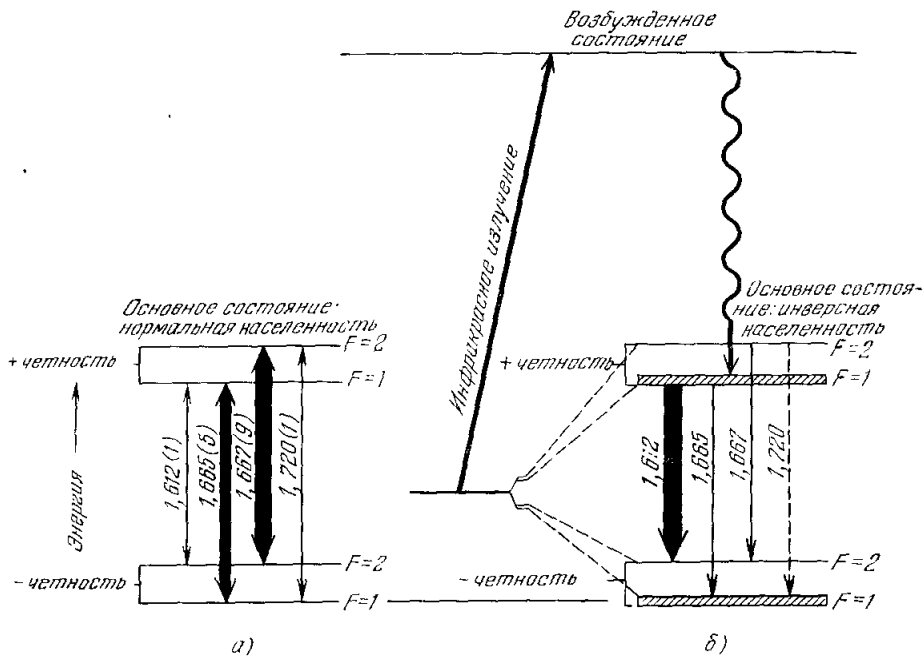


Рис. 7. Космические гидроксильные мазеры излучают при переходах между уровнями основного состояния молекулы  $\text{OH}$ , которые представляют собой четыре близко расположенных уровня (лямбда-дублет).

В случае нормальной населенности уровней молекула излучает на частотах  $1,612$ ;  $1,665$ ;  $1,667$  и  $1,720 \text{ МГц}$ . Относительная сила линий указана в скобках. В звездных гидроксильных мазерах (б) источники энергии накачки (по-видимому, инфракрасное излучение) изменяют населенность основного состояния так, что наиболее сильное излучение происходит на частоте  $1,612 \text{ МГц}$  вместо  $1,667 \text{ МГц}$ . Хотя слабые линии с частотами  $1,667$  и  $1,665 \text{ МГц}$  иногда заметны, линия  $1,720 \text{ МГц}$  всегда отсутствует.

Следующий вопрос таков: к какому типу принадлежит это излучение Оптическому, ультрафиолетовому, инфракрасному или радиоволновому? Ключ к разгадке может быть найден в особенностях гидроксильного излучения. Для того чтобы осуществить переход в яркой мазерной линии на  $1,612 \text{ МГц}$ , необходимо поменять порядок населенностей в каждой половине дублета основного состояния. Такая инверсия одновременно подавляет излучение на частоте, равной  $1,720 \text{ МГц}$ . Симметричная инверсия этих двух пар состояний дает мазер такого типа, какой обычно наблюдается в атмосферах красных переменных звезд: мазер с сильным излучением на частоте  $1,612 \text{ МГц}$  и без излучения на частоте  $1,720 \text{ МГц}$ . При небольших изменениях в населенности верхней пары состояний могут быть видны более слабые линии излучения на  $1,667$  и  $1,665 \text{ МГц}$ , которые также наблюдаются в некоторых случаях.

Анализ возможных схем радиационной накачки проявляет уникальную особенность инфракрасного излучения. Квантовомеханическое правило отбора по четности, деталей которого нам нет необходимости здесь касаться, утверждает, что, когда инфракрасное излучение возбуждает молекулу гидроксила, инверсия верхней и нижней пар уровней основного состояния должна происходить симметрично. Именно это необходимо для

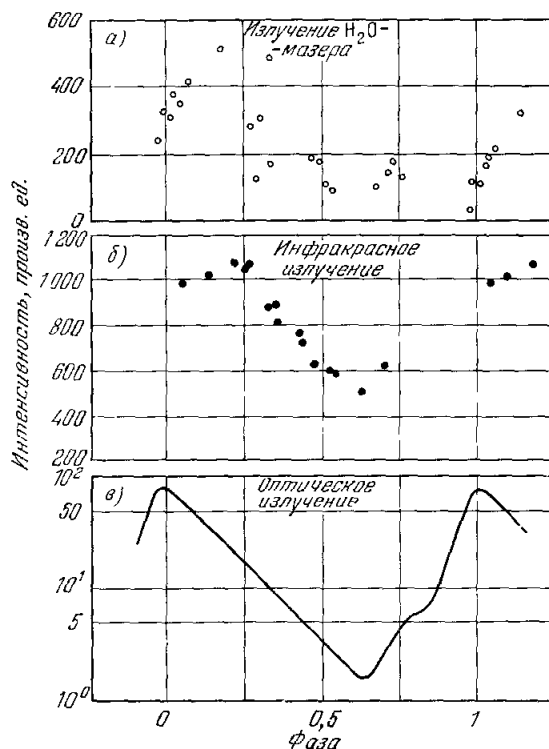


Рис. 8. Вариации интенсивности излучения водяных мазеров (а) в атмосфере красного гиганта звезды U Геркулеса повторяют вариации инфракрасного излучения с длиной волны 2,2 мкм (б) и в видимом свете (в).

Отложенная здесь в логарифмическом масштабе интенсивность света изменяется более чем в 40 раз, или почти на четыре звездные величины, в течение каждого полуцикла. Соответствующие изменения интенсивности инфракрасного излучения и излучения водяного мазера намного меньше (изображены в линейном масштабе). Синхронное поведение излучения в этих трех спектральных диапазонах от звезды U Геркулеса и ей подобных звезд является решительным доказательством того, что накачка звездных мазеров имеет радиационную природу. Вероятно, за это ответственно инфракрасное излучение, а не столкновения. Радиоспектры получены Ф. Шварцом из Военно-морской лаборатории, П. Харви из университета Аризоны и А. Берритом из Массачусетского технологического института.

возникновения наблюдаемых линий излучения. Другие радиационные накачки не приводят к столь сильным ограничениям. Это делает фактически однозначным вывод о том, что инфракрасное излучение является источником накачки звездных мазеров. Мазерные механизмы излучения для молекул воды и монооксида кремния не изучены так основательно, как действие гидроксильного мазера. Однако эти молекулы также имеют инфракрасные переходы в состояния, которые приводят к таким инверсным заселенностям, какие необходимы для появления наблюдаемых линий излучения воды и монооксида кремния. Когда такое теоретическое рассмотрение сочетается с фактом существования наблюдаемого инфракрасного избытка в красных переменных звездах, доводы в пользу инфракрасной накачки становятся неотразимыми.

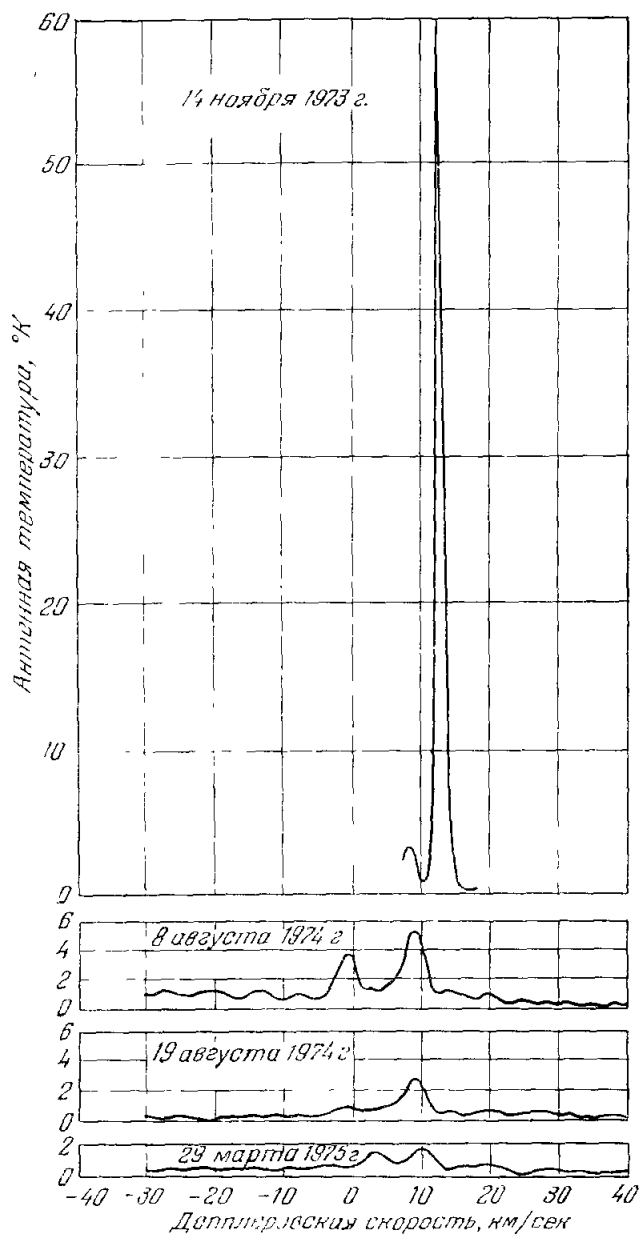


Рис. 9. Интенсивность водяного мазера в яркой туманности Мессье 17 резко меняется в течение 16-месячного периода.

В одном случае только 11 дней в вещество имели место большие изменения. Отдельные максимумы и общий разброс указывают на дисперсию скоростей в облаках с мазерными системами. Мазер излучает на одной частоте: 22,235 МГц (1,35 см). Спектры были получены С. Ладой, С. Готтлибом, Э. Райтом и автором.

## СКОРОСТИ МАЗЕРНЫХ ЗВЕЗД

Оболочка вокруг переменной звезды является физическим окружением мазера. Для того чтобы скорости, найденные из сдвигов линий лазерного излучения, определяемых на Земле, имели смысл, необходимо рассматривать скорость центральной звезды в той же самой системе отсчета. Этот момент обсуждался в течение половины столетия. Трудность состоит в том, что линии оптического излучения отсчитываются от фотосферы или номинальной «поверхности» звезды. Это не дает правильной скорости звезды, так как фотосфера в действительности это массивная газовая оболочка, движущаяся наружу с переменной скоростью. Наземные наблюдатели видят, конечно, только ту часть фотосферы, которая лежит между

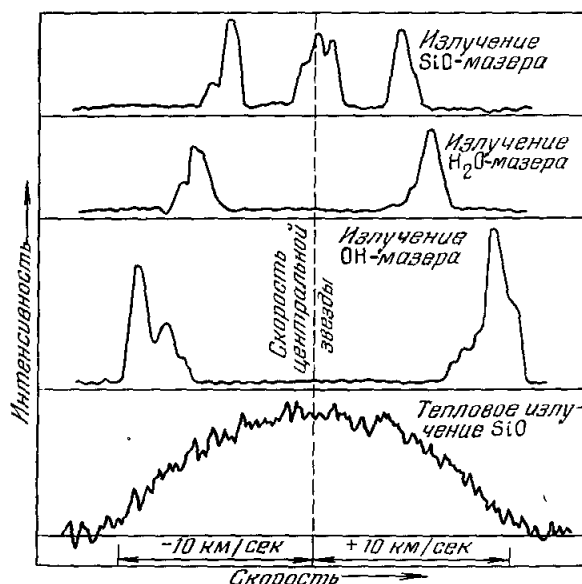


Рис. 10. Идеализированные спектры мазерного излучения долгопериодической красной переменной звезды демонстрируют максимумы излучения мазеров трех типов.

Максимумы расположены симметрично по отношению к средней скорости, которая, по-видимому, является скоростью центральной звезды и которая не может быть определена непосредственно. Недавно, однако, наблюдалось тепловое (не мазерное) излучение монооксида кремния в газе, окружающем десять мазерных звезд. Средняя скорость теплового излучения монооксида кремния равна скорости звезды, которая попадает на середину между максимумами излучения гидроксильного мазера (внизу).

звездой и Землей. Если бы было возможно каким-либо способом увидеть фотосферу на противоположной стороне звезды и измерить ее скорость, то среднее этих двух скоростей было бы собственной скоростью звезды.

Этот прием был реализован с помощью измерения доплеровской скорости обычного теплового (не мазерного) радиоизлучения, выходящего из окружающей звезду газовой атмосферы в нескольких красных переменных звездах. Молекулы монооксида кремния в оболочке звезды прозрачны для их собственного излучения. По этой причине можно зарегистрировать линии излучения этих молекул от всех областей расширяющейся оболочки: от ближней и дальней сторон. Так как оболочка выбрасывается из звезды более или менее симметрично, то средняя доплеровская скорость должна быть равна скорости звезды. Марк Рэйд и я недавно исследовали тепловые линии монооксида кремния в десяти звездах, обладающих мазерным излучением. Мы нашли, что в каждом случае средняя ско-

рость, определенная по линиям (следовательно, скорость звезды), оказывалась приблизительно посредине между двумя максимумами излучения гидроксильных мазеров. Этот результат сразу подтвердил происхождение максимумов излучения гидроксила из передней и задней областей околозвездной оболочки и предложил легкий способ оценки скорости звезды, у которой было обнаружено характерное излучение гидроксила с двумя максимумами.

Наши наблюдения указали, что также возможна регистрация теплового излучения молекул воды в оболочках красных переменных звезд, но недавние исследования А. Диниджер из Унив. Колледж и ее сотрудников дали отрицательный результат. Для переменных, обладающих мазерным излучением линий воды или монооксида кремния, недавние наблюдения Сюзена Клейнманна из Массачусетского технологического института продемонстрировали, что максимумы излучения часто расположены симметрично относительно скорости звезды, определенной по тепловому излучению монооксида кремния. Кроме того, было найдено, что скорости разных молекул имеют тенденцию собираться в группы и перекрываться. Таким образом, разность скоростей максимумов линий излучения воды меньше разности скоростей для линий гидроксила, а разность скоростей для монооксида кремния обычно меньше разности скоростей линий воды.

#### СТРОЕНИЕ МАЗЕРНОЙ ЗВЕЗДЫ

Давайте, теперь попытаемся описать строение типичной красной переменной мазерной звезды. Диаметр центральной звезды в несколько сот раз больше диаметра Солнца. Окружающая атмосфера имеет размеры в  $10^{10}$  или  $10^{11}$  км, что в 15 раз больше радиуса Солнечной системы. Давление излучения, выходящего из звезды, ускоряет газ и пыль наружу, вначале

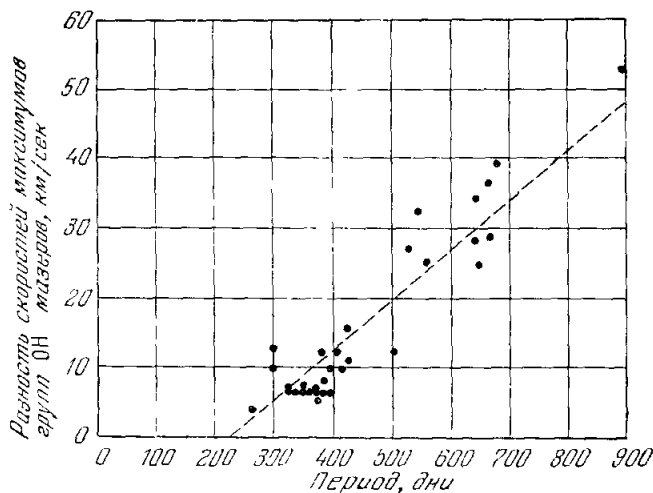


Рис. 11. Периоды звезд хорошо коррелируют с разностью скоростей максимумов излучения гидроксильных мазеров в их атмосферах.

Более длинным периодам соответствуют более высокие значения разности скоростей. Разность скоростей, приблизительно говоря, равна удвоенной скорости расширения атмосферы.

медленно, потом, в переходной области, быстрее и в конце опять медленно. В переходной области температура достаточно низкая для конденсации газа в пыль. Большие крупинки пыли выметают газ наружу, приводя к большому ускорению газа до тех пор, пока на некотором расстоянии

от звезды радиационное давление не уменьшится и вещество в оболочке не столкнется с межзвездным газом. Эта и другие диссипативные силы останавливают газ.

Если оболочка содержит мазер на монооксиде кремния, то он должен быть в том месте оболочки, где температура достаточно велика, порядка

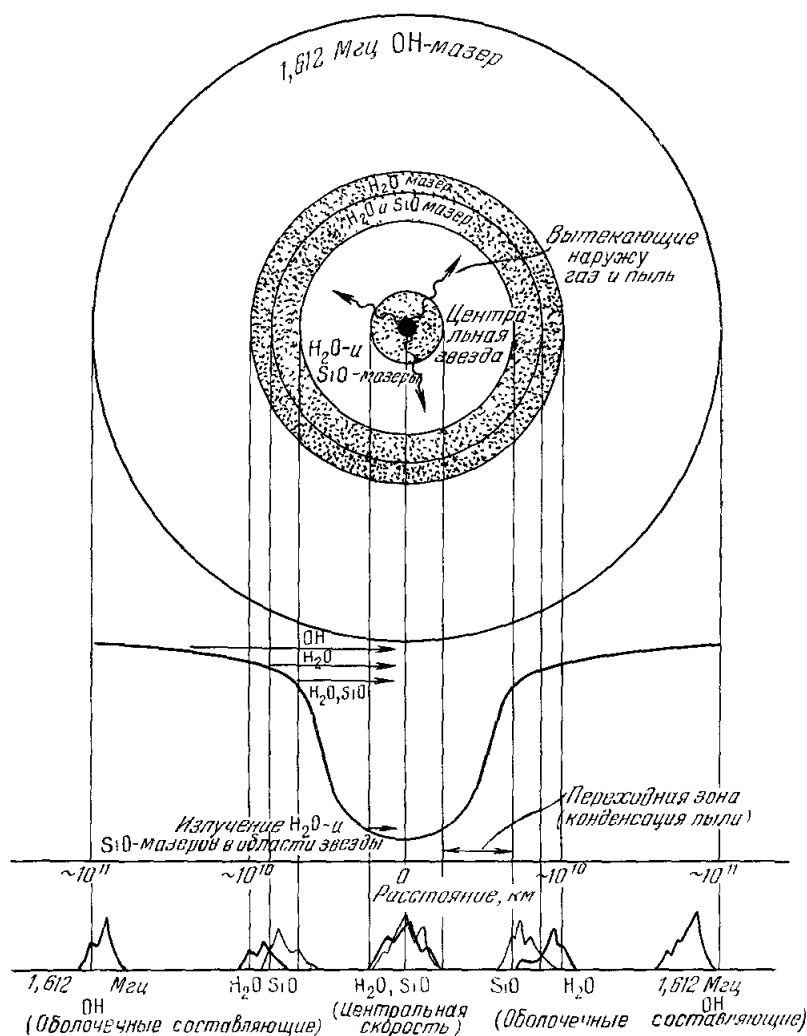


Рис. 12. Схематическая модель красной переменной звезды.

Показаны положения водяных, гидроксильных и мазеров на монооксиде кремния в оболочке. Выбрасываемые из звезды газ и пыль ускоряются наружу радиационным давлением. U-образная кривая описывает профиль скорости. Мазеры находятся в местах плавного ускорения газа. В переходной зоне условия быстрого ускорения делают мазеры слишком неустойчивыми. Профили излучения мазеров изображены на тех радиальных расстояниях от звезды, на которых они образуются. Их относительные скорости могут быть выведены из кривой профиля скорости. Как объясняется в тексте, принимаемое излучение мазеров испускается из передней и задней частей оболочки, если смотреть на нее со стороны Солнечной системы.

1000 °K. Наиболее подходящие для водяного мазера температуры немногим ниже. В действительности, оболочки часто имеют эти два типа мазеров в одном и том же месте. Гидроксильный мазер должен находиться в наиболее холодной части звездной атмосферы — в быстро движущихся обла-



стях, лежащих на расстояниях  $10^{10}$  км. Внутри переходной зоны, ближе к звезде, быстрые изменения скорости препятствуют образованию мазера.

Модель, которую я описал, объясняет странную корреляцию между разностью значений скорости в максимумах излучения гидроксила и периодом пульсаций звезды. Чтобы упростить модель, необходимо принять во внимание то, что звезды с большей светимостью обладают большими периодами. Так как радиационное давление — функция светимости, то можно думать, что более яркие, долгопериодические звезды имеют атмосферы с более быстро движущимися внешними оболочками, в которых локализованы гидроксильные мазеры. Чем быстрее движется оболочка, тем больше разность скоростей между излучением гидроксильных мазеров, находящихся на более близкой и наиболее удаленной от нас сторонах оболочки. Плотности и температуры газа внутри оболочек не очень хорошо известны, поэтому реальные звезды редко ведут себя так, как я описывал. Тем не менее наблюдения звездных мазеров дают ключ к пониманию природы переменных красных гигантов и сверхгигантов.

### МЕЖЗВЕЗДНЫЕ МАЗЕРЫ

Кроме природных мазеров, обнаруженных в атмосферах старых переменных звезд, найдены также мазеры в молекулярных облаках, которые связаны с молодыми или формирующимися звездами. По мере того как массивные межзвездные облака начинают сжиматься под действием гравитации, появляются мазеры, представляющие собой маяки на пути их развития. Они возникают, когда первые звезды начинают сверкать сквозь свои газовые и пылевые коконы. Таким хорошо изученным объектом является яркая туманность, известная как Мессье 17, в созвездии Стрельца, где два мощных водяных мазера были обнаружены вблизи от инфракрасного объекта. Это может быть протозвезда, еще недостаточно яркая для того, чтобы быть заметной в видимой области. Соседние мазерные области сами по себе могут быть участками невидимых новых звезд. Мазеры находятся в молекулярном облаке, размеры которого легко установить по излучению молекул монооксида углерода.

Такие мазеры не встречаются ни в ярких областях туманности, где интенсивное ультрафиолетовое излучение должно диссоциировать молекулы воды, ни в более холодных областях в темных молекулярных облаках. Представляется, что чаще всего мазеры возникают под прикрытием молекулярного облака, но всегда поблизости должен иметься источник инфракрасного излучения, которое может поставлять энергию для накачки мазера. В Мессье 17 одна мазерная область совпадает с местом, где концентрируются линии уровня излучения монооксида углерода. Здесь, возможно, проходит ударная волна, порождаемая звездным ультрафиолетовым излучением. Область повышенной плотности газа позади ударной волны может быть причиной конденсации новых звезд. Такие рассуждения могут быть основаны не более чем на случайном совпадении. Однако еще несколько межзвездных водяных мазеров наблюдались в подобных окружениях.

Вообще о межзвездных мазерах известно меньше, чем о мазерах в атмосферах звезд. Хотя как гидроксильные, так и водяные мазеры встречаются в межзвездных областях, их ассоциации менее часты, чем в звездных атмосферах. Кроме того, когда мазеры двух типов возникают по соседству в межзвездном пространстве, то нет простой связи с их относительными скоростями. Молекула монооксида кремния — обычная составляющая молекулярных облаков, но никогда не наблюдалось ее мазерное излучение в межзвездном пространстве.

Излучение межзвездных мазеров изменяется с характерным временем, заключенным в пределах от нескольких месяцев до нескольких дней. Однако эти вариации не обладают явной периодичностью. В одном случае резкое изменение интенсивности было зарегистрировано в течение 24 часов в противоположность поведению типичного звездного мазера, чей уровень активности довольно близко следует за изменением светового потока центральной звезды.

#### НАКАЧКА МЕЖЗВЕЗДНОГО МАЗЕРА

Также не очень хорошо установлен механизм накачки межзвездных мазеров. По аналогии с звездной моделью можно ожидать, что энергия накачки черпается из инфракрасного излучения. Это излучение испускается нагретыми пылевыми частицами и, может быть, протозвездными объектами. Хотя это и вероятно, но инфракрасное излучение, по-видимому, не производит симметричной инверсии населенностей уровней, как в звездных гидроксильных мазерах. В межзвездных гидроксильных мазерах присутствует излучение с частотой  $1,612 \text{ Мгц}$ , но оно не необходимо доминирующее. В некоторых случаях наиболее сильное излучение на частотах  $1,665$  и  $1,667 \text{ Мгц}$ . Это — линии, характерные для нормальных населенностей молекул. Часто наблюдается линия с наибольшей частотой  $1,720 \text{ Мгц}$ , которая никогда не видна в звездных мазерах. Все, что можно сказать с уверенностью, это то, что гидроксильные и водяные мазеры наблюдаются там, где природа создает сцену, на которой разыгрывается рождение звезд... Мазер должен возбуждаться инфракрасным излучением, которое присутствует в избытке. Должно быть также ультрафиолетовое излучение от ярких, недавно образовавшихся звезд.

Если основываться на имеющихся данных со всеми существенными ограничениями, то мое собственное мнение — предубеждение, если хотите, — склоняется в пользу вездесущего инфракрасного излучения как механизма накачки. Простая накачка инфракрасными фотонами не дает, однако, удовлетворительного решения, как для звездных мазеров. Полная схема, возможно, будет вынуждена тщательно рассмотреть нагрев пылинок в облаке и должна будет объяснить как необычные наблюдаемые отклонения, так и вопрос о том, почему монооксид кремния никогда не проявляется как межзвездный мазер.

Имеющаяся сейчас модель образования звезд достаточно убедительна, по крайней мере на качественном уровне. Межзвездный мазер встречается в местах, где образуются новые звезды. Он, по-видимому, является предвестником рождения звезды! А в случае долгопериодических переменных мазер — свидетель последних конвульсий умирающей звезды. Лучшее понимание мазеров обоих типов научит нас не только физике космических мазеров, но также физике звезд и звездной эволюции.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Abel G. O. Exploration of the Univers.— Holt, Pinehart and Winston, 1969.  
 Dickinson D. F., Litvak M. M. Zuckerman B. M.— Sky and Telescope, January 1970, v. 39, No 1, p. 4.  
 Johnston K. J. Knowles S. H., Schwartz P. R.— Ibid., August 1972, v. 44, No 2.  
 Litvak M. M.— In: Annual Review of Astrophysics and Astrophysics. Vol. 12./Ed. Burbidge G. R.— N.Y.: Annual Review, Inc., 1974.  
 Pasachoff J. M. Contemporary Astronomy.— W. B. Saunclers Comp, 1977.