

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

524.24

МЕГАМАЗЕРЫ

B. B. Бурдюжа

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	703
2. Мазеры в нашей Галактике	704
3. Краткая характеристика галактик с мегамазерами на молекулах OH	705
4. Образование молекул OH, их обилие, спектроскопические особенности низших вращательных уровней	706
5. Возможные механизмы создания инверсной населенности в мегамазерах на OH, энергетические оценки	708
6. Мегамазеры на молекулах H ₂ O и H ₂ CO	711
7. Заключение	714
Список литературы	715

1. ВВЕДЕНИЕ

В космосе равновесные условия крайне редки. Чем больше система выведена из равновесия, тем более ярким является феномен, ответственный за релаксацию последней к состоянию равновесия. Неравновесные условия могут поддерживаться достаточно долго, если имеется сторонний источник возмущения. К таким объектам относятся галактические и внегалактические мазеры на молекулах OH, H₂O, SiO, H₂CO и др.

Мегамазеры — новое яркое явление в физике космоса. Изотропная светимость молекулярного OH мазера ($\lambda \approx 18$ см) в главных радиолиниях основного вращательного состояния $J = 3/2^2\Pi_{3/2}$, обнаруженного от пекулярной галактики IC 4553 (Arg 220)¹, превысила в 10 раз светимость «стандартного» галактического источника W 3 (OH), светимость которого $L \sim 10^{-5}L_\odot$ ($L_\odot = 4 \cdot 10^{33}$ эрг/с — светимость Солнца), отсюда и название мегамазер. Недавно несколько новых мегамазеров OH обнаружено от галактик NGC 3690, Mrk 231, Mrk 273 и от некоторых IRAS *) источников², на расстояниях 2—300 Мпк. Еще в 70-х годах от галактик M82 и NGC 253 было обнаружено³ мазерное радиоизлучение OH в главных радиолиниях (1667 и 1665 МГц) основного состояния, тогда их называли супермазерами, так как их изотропная светимость на 1–2 порядка превышала светимость галактических. Изотропная же светимость мегамазеров составляет $L \sim 10-10^3 L_\odot$ при красном смешении этих галактик $z \sim 0,01-0,03$ ⁴. Наблюдаемые потоки в главных радиолиниях OH — несколько десятков мЯн (1 Ян = 10^{-23} эрг/см²с·Гц), а перекрываемый интервал скоростей в линии от 300 до 500 км/с (в сейфертовских галактиках Mrk 231 и Mrk 273 $\Delta v \sim 760$ и 1060 км/с соответственно²⁶). Особенностью мегамазеров OH является широкополосность их излучения при малом усилении ($\tau_{1667} \ll 1$, где τ — оптическая толщина).

*) IRAS — аббревиатура английских слов Infrared Astronomical Satellite — инфракрасный астрономический спутник.

Внегалактическое мазерное излучение молекул H_2O в радиолинии $6_{16} \rightarrow 5_{23}$ ($\lambda \approx 1,35$ см) впервые было обнаружено от галактики M33⁵, а наиболее мощные мазеры водяного пара были обнаружены от галактик NGC3079, NGG4258, NGC1068⁶ сизотропной светимостью $L \sim 10^2 - 10^3 L_\odot$. Типичная светимость галактических источников водяного пара $L \sim 10^4 L_\odot$ (исключение составляет источник W 49, изотропная светимость которого $\sim 1 L_\odot$), и поэтому внегалактические мазеры H_2O , а их называют еще и ультрамазерами, также являются крайне интересным феноменом. Недавно от галактики IC 4553 была обнаружена⁷ эмиссия в радиолинии $1_{10} \rightarrow 1_{11}$ молекул H_2CO ($\lambda \approx 6,2$ см) со светимостью на семь порядков выше, чем светимость 2-х известных галактических H_2CO -мазеров.

Ниже мы остановимся на моделях внегалактических мегамазеров, но вначале рассмотрим основные характеристики галактических. Подробно обсуждены будут только мегамазеры на молекулах OH, как наиболее изученный феномен, но кратко будут рассмотрены также и мегамазеры на молекулах H_2O и H_2CO .

2. МАЗЕРЫ В НАШЕЙ ГАЛАКТИКЕ

Для мощного мазерного излучения в радиолиниях молекул в нашей Галактике характерны узкие линии ($\Delta\nu \sim 1 - 50$ кГц) и высокие яркостные температуры ($T_b \sim 10^{10} - 10^{16}$ К). В лабораторных условиях для получения высокого усиления используется система зеркал, обеспечивающая многократное прохождение сигнала. Кроме того, для реализации узкополосности лабораторные системы должны быть весьма добротными. От всех этих «усложнений» свободны космические мазеры, в которых высокое усиление (до 10^{13} раз) обеспечивается большими длинами ($\sim 10^{13} - 10^{16}$ см). В космических условиях из-за отсутствия высокодобротных систем фазовая когерентность не имеет места, поэтому астрономические мазеры в принципе широкополосны, хотя в ненасыщенном режиме возможно сужение полосы усиливаемого сигнала в $(\tau/\ln 2)^{1/2}$ раз. При отсутствии фазовой когерентности мазерного излучения в космических условиях можно выделить длину когерентности

$$l_{\text{когер}} \approx \frac{\Delta\nu}{\partial v / \partial z}, \quad (1)$$

которая пропорциональна наблюдаемой ширине линии и обратно пропорциональна систематическому изменению скорости в активной среде.

Открытие в 1965 г. излучения в главных радиолиниях OH⁸ поставило первооткрывателей в тупик (излучение «мистериума»), и только после обнаружения всех четырех радиолиний⁹, принадлежащих переходам между уровнями сверхтонкой структуры основного вращательного состояния молекулы гидроксила, отождествление состоялось. Но лишь тогда, когда были измерены угловые размеры¹⁰, которые оказались очень малыми, стало твердо ясно, что работает естественный космический мазер. В середине пятидесятых годов американский физик Ч. Таунс обратил внимание на возможный интерес для радиоастрономии перехода $6_{16} \rightarrow 5_{23}$ молекулы H_2O ($\lambda \sim 1,35$ см)^{11a}. Мазерное излучение на этом переходе и было обнаружено в конце 60-х годов^{11b} (предсказание о принципиальной возможности наблюдений радиолиний OH от облаков межзвездной среды было сделано И. С. Шкловским еще в 1949 г.¹²). В дальнейшем мазерное излучение было обнаружено и от других молекул, таких, как CH, SiO, CH_3OH , H_2CO , NH₃, HCN. Кроме высоких яркостных температур, в некоторых объектах мазерное излучение в сильной степени поляризовано (циркулярная поляризация в радиолиниях OH и линейная в радиолиниях H_2O и SiO), переменно во времени, имеет малые угловые размеры и сложную пространственную структуру. Наблюдение межконтинентальным интерферометром с разрешением $\sim(300 \cdot 10^{-6})''$ дуги показало¹³, что мазеры, окружающие вновь образованные звезды, состоят из сотен

ярких конденсаций размером 10^{13} — 10^{15} см, имеют различные скорости, а их эквивалентные чернотельные температуры $\sim 10^{14}$ К и более.

Неравновесное излучение возникает между вращательными уровнями в тяжелых и в легких молекулах и между уровнями сверхтонкой структуры А-удвоенных вращательных уровней в легких молекулах. Времена жизни мазерных уровней колеблются от 1 с в тяжелых молекулах до 10^{11} с в легких молекулах, соответствующая длина волны от 0,1 до 18 см. Водородосодержащие молекулы имеют высокие вероятности спонтанных переходов между вращательными уровнями и, следовательно, могут поддерживать нетепловую заселенность последних при относительно высоких плотностях, т. е. при

$$n \leq \frac{A}{\sigma v} \sim \frac{10^{-1} - 10^{-3}}{10^{-15} \cdot 10^5} \sim 10^7 - 10^9 \text{ см}^{-3};$$

здесь A — вероятность спонтанного перехода, σ — сечение столкновительного возбуждения, v — тепловая скорость.

Мощное мазерное излучение молекул ($T_b \sim 10^{10}$ — 10^{16} К) возникает в оболочках молодых массивных звезд и в оболочках ИК звезд (в основном это гиганты и сверхгиганты класса М), в которых молекулы, излучающие мазерным образом, подвергаются воздействию сильного потока ИК излучения. Слабое мазерное излучение молекул главным образом возникает в облаках межзвездной среды. Подробнее о мазерах в нашей Галактике можно прочесть в обзорах¹⁴.

3. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГАЛАКТИК С МЕГАМАЗЕРАМИ НА МОЛЕКУЛАХ ОН

Галактики, в которых наблюдаются мегамазеры, богаты молекулярным газом ($M_{H_2} \sim 4 \cdot 10^9$ — $2 \cdot 10^{10} M_\odot$) по сравнению с обычными яркими спиральными и имеют огромную светимость в ИК диапазоне ($L \sim 10^{11}$ — $3 \cdot 10^{12} L_\odot$). Выделяют эти галактики также исключительной силы всплески звездообразования (IC 4553, NGC 3690), сейфертовские свойства их ядер (Mrk 231, Mrk 273) и мощные потоки в УФ диапазоне. Отношение ИК к УФ светимости у некоторых из обнаруженных галактик ~ 10 — 80^4 . Морфология IRAS галактик высокой светимости, как отмечено в работе¹⁵, указывает на то, что большая часть из них есть слившиеся, либо близкие контактные пары, что, по-видимому, и инициирует всплески звездообразования. NGC 3690 и IC 4553, например,— взаимодействующие галактики с развитой спиральной структурой (галактики типа Sc). Часть из обнаруженных галактик (III ZW 35, II ZW 96) являются компактными галактиками Цвикки, которые, как замечено в работе¹⁶, по своей физической природе близки к галактикам Маркарьяна¹⁷. Вообще-то, все галактики с мегамазерами структурно-пекулярны, а интенсивное звездообразование в них еще не есть достаточное условие для мазерной эмиссии¹⁸. У всех этих галактик активное ядро. Из наблюдений на инструменте VLA¹⁹ следует, что пекулярные взаимодействующие спирали, так же как компактные галактики, имеют относительно высокий поток радиоконтинуума. Кроме того, как отмечено в работе²⁰, во многих IRAS галактиках наблюдается сильная корреляция радио и далекого ИК потоков. Оптическое изучение некоторых из них (IC 4553) проявляет полосы пыли и дискообразную структуру. В галактиках с мегамазерами найдена поглощающая структура атомарного водорода в широком интервале личевых скоростей^{2, 4}, ширина которой в галактике Mrk 273, например, ~ 430 км/с. Как уже отмечено, расстояние до галактик с мегамазерами до 300 Мпк (такой предел на расстоянии обусловлен возможностями спутника IRAS), если постоянная Хаббла $H_0 \sim 75$ км/с Мпк).

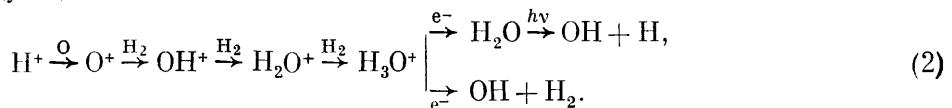
Но самые интересные свойства этих галактик — это их ИК характеристики. Во-первых, в галактиках с мазерной эмиссией обнаружен сильный избыток ИК излучения на 25 и 60 мкм, который отсутствует в других IRAS

галактиках¹⁸ (см., например, IRAS обзор активных галактик и изучение IRAS феномена в работах^{21, 22}). Кроме того, эти галактики имеют исключительно крутой спектр в области среднего ИК диапазона ($F_{25\text{мкм}}/F_{12\text{мкм}} > 4,2$) и необычно пологий спектр в далекой ИК области ($F_{100\text{мкм}}/F_{60\text{мкм}} \leq 1,4$), что наряду с активным ядром и протяженными областями звездообразования отличает эти галактики от нормальных спиралей. В галактиках с мегамазерами звезды образуются либо вокруг ядра, либо в галактическом диске²³ на шкале 100–750 пк. Из 10 наиболее ярких IRAS галактик со светимостью $L > 10^{12} L_\odot$ пять являются мегамазерами OH^{2, 24}. Светимость IRAS галактик в $10^{12} L_\odot$ сравнима со светимостью квазара, что наводит на мысль об эволюционной связи этих объектов. Заметим, что если в ранние эпохи всплески звездообразования были намного интенсивнее, то не исключено, что мегамазеры или даже гигамазеры могут быть наблюдаемые от галактик с большим красным смещением *).

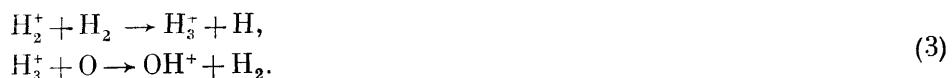
В нашей Галактике слабым аналогом мазерного излучения внегалактических молекул OH, вероятно, может служить аномальное излучение последних в главных радиолиниях от пылевых облаков²⁵, кинетическая температура в которых ~ 10 К.

4. ОБРАЗОВАНИЕ МОЛЕКУЛ OH, ИХ ОБИЛИЕ, СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ НИЖНИХ ВРАЩАТЕЛЬНЫХ УРОВНЕЙ

Реакции, в которых образуются, участвуют и разрушаются молекулы в космических условиях, существенно отличаются от условий, которые можно создать в лабораториях. В первую очередь это низкие температуры и плотности. В облаках межзвездной среды нашей Галактики различны не только температуры и плотности ($T \sim 10$ –100 К, $n \sim 10$ – 10^4 см⁻³), но и радиационные поля. Если в диффузных облаках действие радиационных полей значительно, то в плотных ими можно пренебречь. В плотных облаках с $n \sim 10^3$ см⁻³ существенными становятся космические лучи, которые инициируют ион-молекулярные реакции. В пылевых облаках с $n \sim 10^3$ см⁻³ радиационные поля малы, но не пренебрежимы. Основные газофазные реакции, характерные для диффузных облаков, в которых образуются молекулы OH, следующие:



Какая из реакций в конце цепочки (2) превалирует — пока неизвестно (при химическом моделировании их вероятности принимают равными). В плотных облаках, в которых низко содержание атомарного водорода, существенны реакции



Относительное обилие радикала OH ($[n_{\text{OH}}]/[n_{\text{H}_2}]$) колеблется в зависимости от плотности, кинетической температуры и концентрации металлов в облаках от $4 \cdot 10^{-6}$ до $2 \cdot 10^{-8}$. На относительное обилие OH также влияет отношение $[C]/[O]$, электронная концентрация, близость источников ионизации, масса и эволюционный статус облака, и поэтому теоретическое определение молекулярного обилия в том или ином облаке даже в нашей Галактике есть нетривиальная задача. При расчетах молекулярного обилия состояние статического равновесия является хорошим приближением только для диффузных облаков, так как времена их жизни существенно больше 10^7 лет.

*) Это предсказание сделал Б. В. Комберг.

В плотных облаках, которые далеки от коллапса, также может реализоваться квазистатическая ситуация. При коллапсе квазистатическая ситуация не успевает установиться, так как время свободного падения $t_{\text{ff}} \approx 4 \cdot 10^7 / n_{\text{H}_2}^{1/2}$ лет мало, и в этом случае для расчета молекулярного обилия используют нестатическое приближение^{26a}. Примем для дальнейших оценок относительное обилие OH радикала $\sim 10^{-6}$ и заметим, что основным механизмом обра-

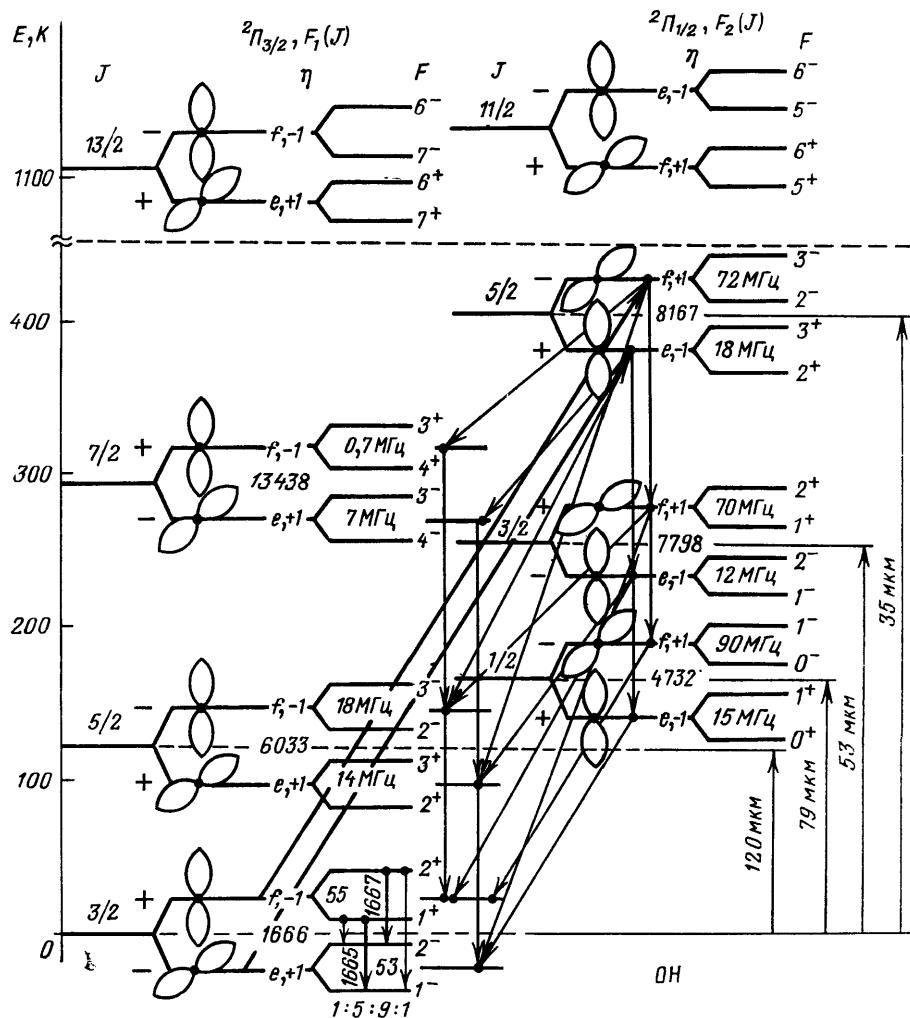


Рис. 1. Структура низких вращательных уровней молекулы OH.
Λ-удвоение и сверхтонкое расщепление не в масштабе

зования молекул OH в облаках с плотностью $n \lesssim 10^3 \text{ см}^{-3}$ является фотодиссоциация молекул H₂O, относительное обилие которых $\sim 10^{-5} - 10^{-7}$ ^{26b}.

На рис. 1 представлена схема низких вращательных уровней молекулы OH, относящихся к промежуточному между «а» и «б» по Хунду случаю связи моментов количества движения (связь «а» характеризуется сильным спин-орбитальным взаимодействием и слабым взаимодействием спина и вращения, случай «б» — противоположен случаю «а»). Как видно из рис. 1, на котором J — полный момент количества движения без спина ядра ($I = 1/2$, $F = J \pm I$), вращательные уровни состоят из двух полос $F_1(J) \ ^2\Pi_{3/2}$ и $F_2(J) \ ^2\Pi_{1/2}$, в которых электронное состояние $^2\Pi_{1/2}$ по энергии лежит выше, чем электронное состояние $^2\Pi_{3/2}$ (обращенная тонкая структура). Симметрия электронных волновых функций по отношению к отражению в плоскости оси

молекулы определяет четность Λ -удвоенных вращательных уровней (\pm). По упорядоченной номенклатуре²⁷ уровни с четностью $+(-1)^{J-1/2}$ являются e -уровнями Λ -дублетов, а с четностью $-(-1)^{J-1/2}$ являются f -уровнями Λ -дублетов. Кроме того, эти же волновые функции симметричны либо антисимметричны ($\eta = \pm 1$) по отношению к отражению в плоскости вращения молекулы. Этой симметрии соответствует определенная, преимущественная ориентация $p\pi$ электронного облака. Электронное облако для уровней F_e и F_f ориентировано преимущественно в плоскости вращения, для уровней F_f и F_e перпендикулярно плоскости вращения²⁸. С учетом этой симметрии волновая функция, соответствующая нижним вращательным уровням, может быть записана в виде²⁹

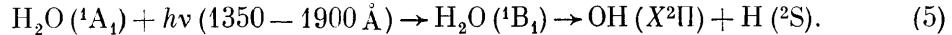
$$\psi = c_J \cos \varphi + d_J \sin \varphi, \quad (4)$$

где c_J , d_J — зависящие от значения J коэффициенты смеси, квадрат которых есть вероятность ориентации неспаренного $p\pi$ электронного облака \perp или \parallel плоскости вращения, φ — угол в плоскости x , y , которая перпендикулярна оси z (здесь ось z совпадает с осью молекулы и лежит в плоскости ее вращения).

5. ВОЗМОЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ СОЗДАНИЯ ИНВЕРСНОЙ НАСЕЛЕННОСТИ В МЕГАМАЗЕРАХ НА ОН, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ

Из анализа наблюдательных данных следует, что вероятнее всего широколосная эмиссия в главных радиолиниях молекул OH от внегалактических источников обусловлена слабым мазерным усилением ($\tau \lesssim 1$) молекулами OH радиоконтинуума диска и ядра. Модель, в которой мегамазеры есть сумма мазерного излучения от 10^6 — 10^7 отдельных молодых массивных звезд, в оболочке которых «сидят» OH мазеры типа W 3 (OH), в принципе возможна. Искусственность ее в том, что маловероятно наличие в интервале скоростей ~ 300 — 500 км/с около 10^7 O-звезд, находящихся в одной эволюционной фазе. Кроме того, как следует из наблюдений пекулярной галактики IC 4553, эмиссия в главных радиолиниях OH весьма протяжена.

Инвертировать уровни молекул OH в условиях облаков межзвездной среды любой галактики может УФ либо ИК излучение. Рассмотрим это более подробно. Облака в спиральных галактиках образуют кольцевые по отношению к ядру структуры, в поверхностных слоях которых могут интенсивно протекать реакции фотодиссоциации. Молекулы воды, облучаемые потоком УФ излучения, будут диссоциировать. Фотодиссоциативная динамика H₂O не проста, хотя природа фотофрагментов для всех областей длин волн диссоциирующего молекулы излучения известна³⁰. Как отмечено в работе³¹, около 80 % молекул H₂O будут диссоциировать по основной первичной реакции



Фотодиссоциация в первой поглощающей полосе происходит вдоль хорошо определенной²⁹ потенциальной поверхности молекулы H₂O с образованием молекулы OH в электронном состоянии ²P. Большая степень инверсии уровней F_{1f} Λ -дублетов в полосе $^2\Pi_{3/2}$ вызвана сохранением пространственной ориентации электронного облака при фотодиссоциации, т. е. при фотодиссоциации ориентация орбитали 1b₁ молекулы H₂O сохраняется параллельной $p\pi$ -орбитали OH. Этот факт подтвержден экспериментально при фотолизе «холодной» воды²⁹. Могут ли подходящие условия для фотодиссоциации H₂O быть реализованы в облаках диска внегалактических источников и какое необходимо количество УФ квантов для обеспечения нужной энергетики в мегамазерах OH? Сделаем несколько модельных предположений. Естественно считать, что свойства пыли в IRAS галактиках (экстинкция, альбедо, размер, состав) ненамного отличаются от свойств пыли нашей Галактики, которые вообще-то хорошо не известны. Это важный момент, так как пыль

поглощает и переизлучает УФ излучение. Молекулярный диск в ярких спиральных галактиках в окрестности ≤ 1 Кпк от галактического центра, по-видимому, состоит из облаков, которые могут быть подобны облакам нашей Галактики; наблюдательные данные, хотя и косвенно, говорят об этом³². Для реализации мегамазера процесс фотодиссоциации H_2O должен происходить либо в ядре диффузного облака с $n \sim 2500 \text{ см}^{-3}$, $T \sim 22 \text{ K}$ ^{33a}, либо в среде между сгущениями пылевого облака с $n \sim 3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$, $T \sim 30 \text{ K}$ ^{33b}, либо в гигантских молекулярных облаках^{33b}. Для качественных экстремальных оценок примем, что на фотодиссоциационной поверхности молекулярного диска в модельном облаке $n \sim 10^3 \text{ см}^{-3}$, $T \sim 25 \text{ K}$. Полное число «активных» молекул OH в источнике со светимостью $L_{\text{OH}} \sim 100L_\odot$ должно быть равно

$$N = \frac{L_{\text{OH}}}{h\nu W_{\text{УФ}}} \sim 4 \cdot 10^{60} \text{ молекул}, \quad (6)$$

где $W_{\text{УФ}} \sim 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ — вероятность взаимодействия молекулы H_2O с УФ излучением, в оценке которой поток взят на три порядка выше, чем средний поток УФ в нашей Галактике³⁴. Отсюда полная масса облаков при $[n_{\text{OH}}]/[n_{\text{H}_2}] \sim 10^{-6}$ есть $M_{\text{H}_2} \sim 7 \cdot 10^{10} M_\odot$, если принять, что «активных» молекул OH — 10 % полного количества.

С другой стороны, без учета пыли, если $L_{\text{OH}} \sim 100L_\odot$, то скорость разрушения молекул H_2O ($L_{\text{OH}}/h\nu$) $m_{\text{H}_2\text{O}} \sim 10^{30} \text{ г/с}$. Даже при $[n_{\text{H}_2\text{O}}]/[n_{\text{H}_2}] \sim 10^{-5}$ расход молекул H_2 процессом фотодиссоциации $\dot{M}_{\text{H}_2} \sim 10^{35} \text{ г/с}$, и тогда вся масса межзвездного газа переработается всего лишь за время $t \sim M_{\text{H}_2}/\dot{M}_{\text{H}_2} \sim 1,4 \cdot 10^9 \text{ с}$, т. е. за 47 лет. Учет пыли приведет не только к экранированию молекул, но в случае H_2O ледяная оболочка пылинок может явиться тем резервуаром, который необходим для регенерации водяных паров, хотя этот резервуар крайне недолговечен³⁵. Возможно, создается впечатление, что имеется большой запас по светимости в УФ, так как, например, в источнике Mrk 231 $L_{\text{OH}} \sim 3 \cdot 10^{53} \text{ фот/с}$, $L_{\text{УФ}} \sim 5 \cdot 10^{55} \text{ фот/с}$. Но такое впечатление иллюзорно, поскольку для работы обсуждаемого механизма требуются «холодные» молекулы H_2O с $T_{\text{кин}} \leq 25 \text{ K}$, которые с необходимостью должны быть экранированы пылью, и поток УФ квантов на которые будет существенно ниже, чем при оценке $W_{\text{УФ}} \sim 10^{-8} \text{ с}^{-1}$. Хотя длина активной области молекул OH при фотодиссоциации молекул H_2O получается приемлемой (в источнике Mrk 231, например, $I \sim 1,5 \cdot 10^{18} \text{ см}$ при ненасыщенном усилении $\exp(\alpha l) \sim 2$), тем не менее этот механизм создания инверсии вращательных уровней в молекуле OH не может быть основным. Вероятность взаимодействия молекул OH с ИК излучением на 5–6 порядков превышает вероятность взаимодействия H_2O с УФ излучением при любой приемлемой геометрии мегамазеров, даже с учетом широкополосности процесса фотодиссоциации $\Delta\lambda \sim 550 \text{ \AA}$ (5). Наблюдательным подтверждением несостоятельности фотодиссоциационного механизма накачки является обнаружение в галактике IC 4553^{36a} поглощения в радиолиниях вращательного состояния $J = 5/2$ $2\Pi_{3/2}$ ($\lambda \approx 5 \text{ см}$), которое при таком механизме возбуждения не должно иметь место.

Вероятность взаимодействия молекул OH с ИК излучением $\lambda \approx 35 \text{ мкм}$, в источнике Mrk 231, например, на расстоянии 10 пк $W_{\text{ИК}} \sim (F_{35\text{мкм}} \lambda^2 / 4\pi h\nu) A \sim 0,007 \text{ с}^{-1}$ при $F_{35\text{мкм}} \sim 5 \cdot 10^{-8} \text{ эрг/см}^2$ и $A \sim 0,017 \text{ с}^{-1}$, и поэтому при низких плотностях только ИК излучение будет определять заселенность уровней молекул OH, CH, H_2CO , H_2O и др. Отметим, попутно, что вероятность столкновений молекул с H_2 или с H при $T \sim 25 \text{ K}$ и $n \sim 10^3 \text{ см}^{-3}$ в облаках крайне низка, т. е. на много порядков меньше вероятности их взаимодействия с ИК излучением; кроме того, в радиолиниях состояния $J = 1/2$ ($\lambda \approx 6 \text{ см}$) также обнаружено поглощение^{36b}, которое при столкновительном возбуждении OH с H_2 не должно иметь место.

Сделаем предварительно несколько замечаний относительно ИК накачки молекул OH. Дело в том, что для реализации усиления в главных радиолиниях $\Delta F = 0$ $F' \rightarrow F = 2^+ \rightarrow 2^-$ (1667 МГц) и $F' \rightarrow F = 1^+ \rightarrow 1^-$ (1665 МГц) ИК накачка или любая другая должна обеспечить перенос заселенности со сверхтонких уровней $F = 1^-$, 2^- на сверхтонкие уровни $F = -1^+$, 2^+ (см. рис. 1) и, чтобы это произошло, необходимо эффективно подавить конкурирующие процессы³⁷. Подавление конкурирующих процессов достигается, например, в результате перекрытия некоторых ИК линий при высокой кинетической температуре в облаке $T_{\text{кин}} \geq 500$ К или из-за микротурбулентных движений в нем³⁸, т. е. необходимы некоторые специальные условия. Для реализации усиления в радиолиниях сателлитов $\Delta F = \pm 1$ $F' \rightarrow F = 2^+ \rightarrow 1^-$ (1720 МГц) и $F' \rightarrow F = 1^+ \rightarrow 2^-$ (1612 МГц), которые соединяют подуровни Λ -дублетов с разными значениями полного момента количества движения, в подавлении конкурирующих процессов необходимости нет. Здесь требуется только перераспределение населенности в подуровнях одной четности, т. е. перенос населенности с подуровня $F = 2^+$ на подуровень $F = 1^+$ и с подуровня $F = 2^-$ на подуровень $F = 1^-$ для усиления в радиолинии 1612 МГц или с подуровня $F = 1^+$ на подуровень $F = 2^+$ и с подуровня $F = 1^-$ на подуровень $F = 2^-$ для усиления в радиолинии 1720 МГц; это легко достигается после прохождения ИК излучением $\lambda \approx \approx 120$ мкм ($J = 5/2$ ${}^2\Pi_{3/2} \rightarrow J = 3/2$ ${}^2\Pi_{3/2}$) и $\lambda \approx 79$ мкм ($J = 1/2$ ${}^2\Pi_{1/2} \rightarrow J = 3/2$ ${}^2\Pi_{3/2}$) определенной оптической толщи. На этот процесс обратил внимание Литвак³⁹. Таким образом, как нам представляется, в мегамазерах из-за их широкополосности механизм накачки должен быть «общим», каким, например, является механизм перераспределения заселенности, соответствующий переходам с $\Delta F = \pm 1$. С другой стороны, в нем должно быть заложено хотя бы слабое подавление конкурирующих процессов, так как усиливаются главные радиолинии с $\Delta F = 0$. Таким «общим» процессом, например, может явиться найденная в работе⁴⁰ асимметрия в матричных элементах дипольных переходов $J = 5/2$, F' , ξ' , ${}^2\Pi_{1/2} \rightarrow J = 3/2$, F , ξ , ${}^2\Pi_{3/2}$ ($\lambda \approx 35$ мкм) и $J = 3/2$, F' , ξ' , ${}^2\Pi_{1/2} \rightarrow J = 3/2$, F , ξ , ${}^2\Pi_{3/2}$ ($\lambda \approx 53$ мкм), точнее, асимметрия в конкурирующих переходах (переходу J' , F' , $\xi' \rightarrow J$, F , ξ конкурирующим будет переход J' , F' , $-\xi' \rightarrow J$, F , $-\xi$). Обсуждаемая асимметрия не есть просто небольшая добавка к вероятности перехода из-за кубической зависимости эйнштейновского коэффициента $A_{J,F'\xi' \rightarrow J,F,\xi}$ от частоты (значения частот ИК зеркальных переходов из-за различия в Λ и в сверхтонком расщеплении вращательных уровней $J = 5/2$ ${}^2\Pi_{1/2}$ и $J = 3/2$ ${}^2\Pi_{3/2}$ — разные; см. также рис. 1), а обусловлена влиянием электронного состояния ${}^2\Sigma^-$ (см. дискуссию в^{37a}). Переходы $\lambda \approx 35$ мкм, как отмечают авторы^{37a}, обладают инвертирующей тенденцией для уровней основного состояния, а переходы $\lambda \approx 53$ мкм обладают антиинвертирующей тенденцией. Степень инверсии зависит от относительной интенсивности ИК излучения на $\lambda \approx 35$ мкм и $\lambda \approx 53$ мкм, т. е. от крутизны спектра. Авторы^{37a} получили, что степень инверсии в их расчетах не превышала несколько процентов, т. е. не превышала степени асимметрии между эйнштейновскими коэффициентами:

$$\frac{|\mu_{-J',J}|^2}{|\mu_{J',-J}|^2} \left(\frac{v_{-J',J}}{v_{J',-J}} \right)^3 \sim 3 \cdot 10^{-2}. \quad (7)$$

Таким образом, при истинном поглощении квантов $\lambda \approx 35$ мкм, которые дробятся на более низкочастотные при каскадных переходах по уровням полосы ${}^2\Pi_{1/2}$ к основному состоянию (см. рис. 1), всегда возникает слабая инверсия Λ -дублета $J = 3/2$ ${}^2\Pi_{3/2}$ молекулы OH (вероятность выживания (φ) квантов $\lambda \approx 35$ мкм крайне низка, $\varphi \sim 0,05 - 0,005$). Примем для оценки, что $\Delta n/n_{\text{OH}} \sim 1\%$ и $n \sim 10^3$ см $^{-3}$, т. е. $\Delta n \sim 10^{-5}$ см $^{-3}$ при $[n_{\text{OH}}]/[n_{\text{H}_2}] \sim \sim 10^{-6}$. Для обеспечения требуемого усиления в радиолинии 1667 МГц

$\exp(\alpha l) \sim 2$ в ненасыщенном режиме необходимо иметь

$$\alpha = \frac{\lambda^2 \Delta n (2F' + 1) A_{F' \rightarrow F}}{8\pi \Delta v} \sim 3 \cdot 10^{-20} \text{ см}^{-1}, \quad (8)$$

где $A_{F' \rightarrow F}$ — вероятность спонтанного перехода $2^+ \rightarrow 2^- = 7,8 \cdot 10^{-11} \text{ с}^{-1}$, Δv — ширина мазерной радиолинии $\sim 1,6 \cdot 10^6 \text{ Гц} \approx 300 \text{ км/с}$. Значение $(\alpha l) \sim 0,7$ обеспечивается на длине 8 пк. Следует отметить, что наблюдаемый наклон в спектре в области среднего ИК излучения от некоторых спиральных галактик противоположен требуемому (наш предварительный расчет с новыми ИК частотами⁴¹ показал, что для возникновения инверсии уровней в основном состоянии отношение $F_{5\text{мкм}}/F_{35\text{мкм}}$ должно быть $\leq 0,2$); по данным IRAS¹⁸, в галактиках Mrk 231, Mrk 273, Arp 220, IRAS 1708—0014 отношение $F_{25\text{мкм}}/F_{12\text{мкм}} \geq 4,2$, т. е. приведенные неравенства несовместны, хотя они получены на разных (но близких) длинах волн. Здесь уместно заметить следующее. Модельный ИК спектр IRAS галактик⁴² состоит из дисковой компоненты, «starburst» компоненты и сейфертовской компоненты. В свою очередь дисковая компонента ИК спектра состоит по крайней мере из двух составляющих: теплой, ассоциирующейся с ОВ звездами и молодыми звездообразующими комплексами, и холодной, ассоциирующейся с диффузной нейтральной межзвездной средой. Поскольку наблюдаемый спектр в IRAS источниках является интегральным от всей галактики, то пока надежно разделить компоненты ИК спектра практически невозможно (необходимо лучшее пространственное разрешение).

Упомянем в заключение еще один механизм, предложенный в работе³⁷⁶, также связанный с возможностью получения слабой инверсии верхних подуровней основного состояния, если молекулы OH находятся в условиях, где пыль достаточно нагрета. Далекое ИК излучение оптически тонкой пыли характеризуется распределением³⁷⁽⁶⁾

$$F(v) = \tau_d(v) (e^{hv/KT_d} - 1)^{-1}, \quad (9)$$

в котором $\tau_d(v)$ — оптическая толщина пыли, $\tau_d(v) = \tau_d(v_0) (v/v_0)^p$, T_d — ее температура, p — показатель степени, лежащий в пределах $1,5 \leq p \leq 3,5$ и зависящий от типа пылевых частиц, $\lambda_0 \approx 80 \text{ мкм}$. Так как с ростом J Л-расщепление увеличивается (см. рис. 1), то ИК переходы с верхних подуровней основного состояния имеют большую частоту, чем ИК переходы с нижних. Как показано в работе³⁷⁶, значение $F(v + \delta)$, в котором δ — разница в частотах конкурирующих переходов ($\delta/v \sim 10^{-3}$), будет выше значения $F(v)$, что при определенной величине T_d повлечет за собой инверсию верхних подуровней относительно нижних. Основное влияние на инверсию подуровней основного состояния $J = 3/2$ в данном механизме оказывает наиболее вероятный переход $J = 5/2 \rightarrow J = 3/2$ ($\lambda \approx 120 \text{ мкм}$). Окончательный выбор ИК механизма накачки еще предстоит сделать.

6. МАГАМАЗЕРЫ НА МОЛЕКУЛАХ H₂O И H₂CO

К настоящему времени обнаружено 11 внегалактических мазеров H₂O^{5, 6, 43} и один внегалактический мазер в радиолинии H₂CO от пекулярной галактики IC 4553⁷. Мазеры H₂O наблюдаются в иррегулярных, взаимодействующих или слившихся, сейфертовских и разрушенных спиральных галактиках. Этим галактикам присуща активность ядра и высокая ИК светимость, но этих усилий еще не достаточно, так как галактика M82, например, имеет высокую ИК светимость и активность ядра, а мощного мазера H₂O от нее не наблюдается (светимость от галактики M82 $L_{H_2O} \sim 1,5L_\odot$). Поэтому мазеры H₂O со светимостью $L_{H_2O} \sim 10^2 - 5 \cdot 10^2 L_\odot$, наблюдаемые от таких галактик, как NGC 3079, NGC 1068, NGC 4945, NGC 4258, — вероятнее всего, короткоживущий феномен, что и объясняет их крайнюю редкость. Из 36 «нормальных» спиралей со светимостью $L \sim 3 \cdot 10^{10} L_\odot$ только в двух

был обнаружен H_2O мазер. Как в галактических, так и во внегалактических источниках H_2O имеет место связь $L_{\text{H}_2\text{O}} \sim 10^{-7} - 10^{-9} L_{\text{ИК}}$ (см. работы ⁴⁴⁻⁴⁵), а также подобие ИК цветовых температур (большие 60/100 мкм, 25/60 мкм цветовые температуры и малые 12/25 мкм цветовые температуры). Внегалактические мазеры H_2O имеют скорости, отличающиеся от центроида скоростей материнских галактик; в NGC 3079, например, структуры H_2O смещены на -140 км/с, в NGC 4258 структуры H_2O смещены на -60 км/с, в то время как скорости OH структур совпадают с систематическими скоростями галактик. Интервал скоростей, перекрываемый мазерными линиями H_2O очень велик (до 700 км/с в галактике NGC 1068). В нашей Галактике рекордсменом в этом отношении является самый мощный источник W 49, перекрываемый интервал скоростей H_2O структур у которого ~ 500 км/с. Здесь уместно напомнить, что наиболее вероятной сейчас считается кинематическая интерпретация этого феномена — ускорение облаков звездным ветром или лучевым давлением центральной звезды, которая впервые была дана в работе ⁴⁶. Полного подобия для внегалактических источников здесь нет, так как в галактических источниках высокоскоростные структуры имеют интенсивность приблизительно на два порядка слабее интенсивности главных структур. Внегалактические мазеры H_2O имеют вспышечный характер переменности ⁴³ (см. подробнее о вспышке в галактическом источнике Ori в работах ⁴⁷). Главным результатом наблюдений пока является измеренный на VLA размер области эмиссии молекул H_2O , который не превышает 1,3 пк в галактике NGC 4258 и 3,5 пк в NGC 1068 (эти размеры могут быть значительно меньше ⁴⁸). Этот факт заставляет отказаться от предположения, что в наблюдающую светимость дают вклад 100—500 источников, подобных W 49, по причине неприемлемо высокой плотности ОВ звезд в ядрах этих галактик ⁴⁸. Верхний предел на плотность ОВ звезд в ядрах галактик M82 и NGC 253 $< 3 \text{ pc}^{-3}$, в диске нашей Галактики плотность ОВ звезд $\sim 10^{-4} \text{ pc}^{-3}$ (см. также ⁴⁸). Отсутствие достаточного количества ОВ звезд вызывает серьезные энергетические трудности у радиационного механизма накачки ⁴⁹ H_2O , так как его эффективность, как впервые отмечено в работе ^{50a}, была намного переоценена. Заметим, что поскольку внегалактические мазеры H_2O имеют огромную светимость ($\geq 10^{51}$ фот/с) при малой протяженности в отличие от OH мегамазеров, то они, вероятнее всего, работают в насыщенном режиме усиления, при котором интенсивность излучения на выходе не зависит от интенсивности на входе. Из простейшей оценки на светимость мазера в насыщенном режиме:

$$L = h\nu n_1 \Delta P \cdot V, \quad (10)$$

в которой n_1 — число молекул H_2O на верхнем сигнальном уровне 6_{16} и ΔP — скорость накачки, можно оценить эффективность процесса создания инверсии. Для обеспечения светимости $L_{\text{H}_2\text{O}} \sim 10^2 - 5 \cdot 10^2 L_{\odot}$ величина $n_1 \Delta P$ должна лежать в пределах $6 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$, если объем, например, $V \sim 4 \cdot 10^{45} \text{ см}^3$ и число мазерных структур ~ 100 (число мазерных структур и размер мазерной H_2O конденсации ($\sim 10^{15} \text{ см}$) выбраны произвольно). Столкновительные механизмы накачки ⁵⁰, предложенные для объяснения экстремально мощных галактических мазеров H_2O W 49, W 51 и т. п., в которых для создания инверсии необходим двухтемпературный газ $T_e \neq T_{\text{H}_2}$ со степенью ионизации $\sim 10^{-5} - 10^{-6}$, в принципе могут объяснить наблюдаемые характеристики внегалактических мазеров H_2O . Нам представляется, что внегалактический мазерный феномен H_2O так же богат и разнообразен, как и галактический, и в менее мощных источниках, таких, как галактики M82 и IC10, должен работать радиационный механизм накачки квантами $\lambda \approx 6,3 \text{ мкм}$, предложенный в работе ⁴⁹, так как имеют место существенные ИК корреляции ⁴³ и сильная переменность. Кроме того, при столкновении облаков друг с другом или при их столкновении с окружающей оболочкой возможна реализация комбинации радиационного и столкно-

вительного возбуждения⁵¹. При такой накачке имеет место конверсия кинетической энергии движущихся облаков («буллитов») во внутреннюю энергию газа, приводящая к мазерному эффекту на молекулах H_2O (но, вообще-то, как отмечено в⁵¹, такая ситуация — короткоживущий феномен). Исключительно важным условием для понимания физики внегалактических мазеров H_2O является измерение индивидуального размера H_2O структур, которое для внегалактических источников может быть сделано только наземно-космическим интерферометром⁵², имеющим разрешение $\leq (100 \cdot 10^{-6})''$ дуги. Такой интерферометр должен быть реализован в рамках проектов QUASAT и «Радиоастрон». Тщательным изучением кинематики H_2O мазеров (измеряя статистический и орбитальный параллаксы) можно уточнить значение постоянной Хаббла⁵². Таким образом, во внегалактических мазерах H_2O ясным

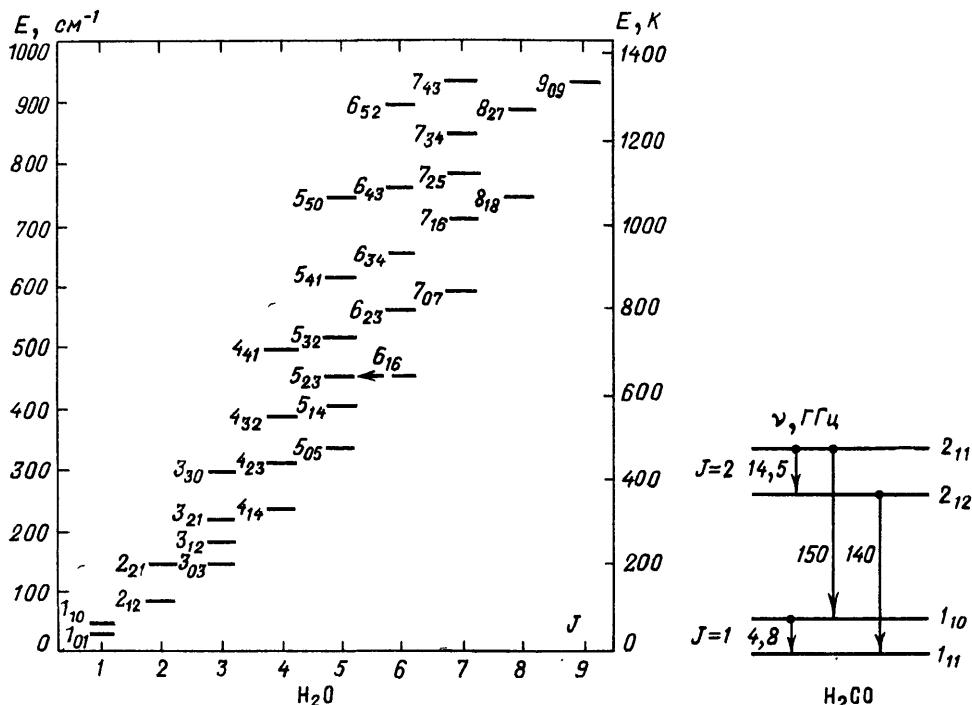


Рис. 2. Нижние вращательные уровни молекул H_2O и H_2CO

является только то, что в некоторых активных ядрах галактик имеет место высокий темп истечения вещества, формирующегося в облака, при котором возможна реализация условия накачки $n_1 \Delta P \sim 10^4 \text{ см}^{-3}\text{с}^{-1}$. Что питает этот феномен и насколько далеки условия в ядре нашей собственной Галактики⁵³ от обсуждаемых, еще подлежит изучению.

Мегамазер в радиолинии $1_{10} \rightarrow 1_{11}$ молекулы H_2CO ($\lambda \approx 6,2 \text{ см}$), обнаруженный от галактики IC 4553, имеет центроид скоростей и ширину линии ($\Delta v \sim 169 \text{ км/с}$), совпадающие с центроидом скоростей и шириной главных радиолиний OH при светимости $L_{\text{H}_2\text{CO}} \sim 12L_\odot$ ⁷. Это пока что единственный пример внегалактического мазера на молекуле формальдегида, хотя поглощение в линии $1_{10} \rightarrow 1_{11}$ наблюдалось от галактик NGC 3079, NGC 253, NGC 4945, M82 и др. (см. работу⁷ и ссылки в ней). В нашей Галактике только от двух источников со светимостью $L_{\text{H}_2\text{CO}} \sim 1,1 \cdot 10^{-6} L_\odot$ (Sgr B2)⁵⁴ и $L_{\text{H}_2\text{CC}} \sim 3,2 \cdot 10^{-8} L_\odot$ (NGC 7538)⁵⁵ обнаружено мазерное излучение в радиолинии молекулы H_2CO . Как и в OH мегамазерах, внегалактические мазеры в радиолинии H_2CO , имеют протяженную структуру (~30 pc), поэтому их усиление крайне низкое, $\tau_{4,8\text{ГГц}} \sim 1,5 \cdot 10^{-2}$, т. е. $\exp(\alpha l) \sim 1,015$. Накачи-

вающим агентом в галактических мазерах H_2CO является, по-видимому, тепловая эмиссия (свободно-свободные переходы $\lambda \approx 2 \text{ мм}$) от компактных областей HII^{56} , т. е. реализуется чисто радиационный механизм накачки при условии $\tau_{2\text{мм}} < 1$. Физической причиной накачки является более быстрый индуцированный переход $J = 2 \rightarrow 1$ на верхний уровень состояния $J = 1$, чем на нижний (см. рис. 2). Ввиду отсутствия обнаружимого потока теплового континуума от галактики IC 4553, авторы⁷ провели модельный расчет для возможной накачки H_2CO мазера нетепловым континуумом для различных концентраций H_2CO (краткая дискуссия по вопросу образования и концентрации молекул H_2CO дана в работе⁵⁶). Оптимальное значение отношения концентрации H_2CO к градиенту скорости в среде (необходимость наличия градиента скорости вызвана условием $\tau_{2\text{мм}} < 1$), при котором оптическая толщина в радиолинии $1_{10} \rightarrow 1_{11}$ достигает максимума⁷ ($\tau_{4,8\text{ГГц}} \sim 2 \cdot 10^{-2}$), равно $[n_{\text{H}_2\text{CO}}]/\partial v/\partial z \sim 10^{-4}$. Как и в OH мегамазерах, H_2CO молекулы усиливают радиоизлучение диска и ядра.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из далеко не полной картины феномена внегалактических мегамазеров можно сделать некоторые предварительные выводы. Мегамазеры на молекулах OH и мегамазер на молекуле H_2CO усиливают радиоизлучение диска и ядра некоторых IRAS галактик. Возбуждаются мегамазеры OH, вероятно, ИК излучением $\lambda \approx 35 \text{ мкм}$ и $\lambda \approx 120 \text{ мкм}$, а мегамазер H_2CO — вероятнее всего, излучением $\lambda \approx 2 \text{ мм}$. Так как эти мегамазеры работают в ненасыщенном режиме, то можно ожидать, что любая переменность в ядре или в диске будет усиlena в $\exp(\alpha l)$ раз, т. е. возможно исследование переменности в радиолиниях молекул. Из-за удаленности галактик в диаграмму направленности наземных антенн попадает вся галактика, что находит отражение в широкополосности и высокой мощности их мазерного радиоизлучения, так как светит вся межзвездная среда либо большая часть ее диска.

Представляется весьма вероятным обнаружение внегалактического мазерного радиоизлучения от молекулы CH в радиолинии $F = 0^- \rightarrow 1^+$ (3264 МГц) основного вращательного состояния $J = 1/2$, хотя условия на его обнаружение довольно жесткие. При $N_{\text{CH}} \sim 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (N_{CH_2} — плотность молекул на луче зрения), как отмечено в работе⁵⁷, степень инверсии $\sim 10\%$ будет иметь место при взаимодействии CH с ИК излучением $\lambda \approx 150 \text{ мкм}$ при $n_{\text{H}_2} \sim 10^3 \text{ см}^{-3}$, $T \sim 30\text{--}100 \text{ К}$. Значение $\alpha l \sim 1$ при ненасыщенном усилении достигается на длине $\sim 1 \text{ кпк}$, если $[n_{\text{CH}}]/[n_{\text{CH}_2}] \sim 10^{-8}$, $\Delta n \sim \sim 10^{-6} \text{ см}^{-3}$, $\Delta v \sim 300 \text{ км/с}$.

В окрестности активных ядер некоторых спиральных галактик с высоким темпом истечения вещества возможно, вероятно, только столкновительным путем, условие накачки $n_1 \Delta P \sim 10^4 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ для мазера H_2O . Мазерным образом излучают облака, движущиеся с высокой скоростью ($\sim 100 \text{ км/с}$). Индивидуальный размер H_2O облаков на расстоянии от Земли в несколько мегапарсек или более можно измерить только наземно-космическим интерферометром с разрешением $\lesssim 100 \cdot 10^{-6} \text{ угл. сек}$ в будущих экспериментах «Радиоастрон» и QUASAT. Эти эксперименты дадут возможность не только прояснить физическую природу мазеров H_2O , но и «заглянуть» вглубь активных ядер. Кроме того, изучение кинематики движущихся H_2O структур позволит новым методом уточнить постоянную Хаббла.

Благодарю Н. Г. Бочкарева, Б. В. Комберга, В. И. Слыши за полезное обсуждение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baan W. A., Wood P. A. D., Haschick A. D.//*Astrophys. J. Lett.* 1982. V. 260. P. 149.
2. a) Baan W. A., Haschick A. D., Schmeltz J. T.//*IAU Circ.* 1984. No. 3993; *Astrophys. J. Lett.* 1985. V. 298. P. L51.
Bottinelli L., Fraix-Burnet D., Gouguenheim L., le Squeren A. M., Patey I.//*IAU Circ.* 1985. No. 4074.
Bottinelli L., Fraix-Burnet D., Gouguenheim L., Kazes I., le Squeren A. M., Patey I., Rickard L. J., Turner B. E.//*Astron. and Astrophys.* 1985. V. 151. P. L7.
Bottinelli L., Gouguenheim L., le Squeren A. M., Dennefeld M., Paturel G.//*IAU Circ.* 1985. No. 4106.
Chapman J. M., Cohen R. J., Pointon L., Staveley-Smith L., Unger S. W.//*Ibidem.* 1986. No. 4180.
Bottinelli L., Gouguenheim L., le Squeren A. M., Martin J. M., Dennefeld M., Paturel G.//*Ibidem.* No. 4231.
Norris R. P., Whiteoak J. B., Gardner F. F., Allen D. A., Roche P. F.//*Ibidem.* 1986. V. 221. P. 51.
Mirabel I. F.//*IAU Circ.* 1986. No. 4268.
Bottinelli L., Gouguenheim L., le Squeren A. M., Martin J. M., Dennefeld M., Paturel G.//*Ibidem.* 1987. No. 4357, 4379.
Kazes I., Mirabel I. F., Sanders D. B.//*Ibidem.* No. 4362.
Mirabel I. F., Kazes I., Sanders D. B.//*Astrophys. J.* 1988. V. 324. P. L59.
b) Staveley-Smith L., Unger S. W., Cohen R. J., Chapman J. M., Pointon L.//*Ibidem.* No. 4248; *Mon. Not. RAS.* 1987. V. 226. P. 689.
3. Whiteoak J. B., Gardner F. F.//*Astrophys. Lett.* 1973. V. 15. P. 211.
Nguyen-Q-Rieu, Mebold U., Winberg A., Guibert J., Both R.//*Astron. and Astrophys.* 1976. V. 52. P. 467.
4. Baan W. A.//*Nature.* 1985. V. 315. P. 26.
5. Churchwell E., Witzel A., Huchtmeier W., Pauliny-Toth I., Roland J., Sieber W.//*Astron. and Astrophys.* 1977. V. 54. P. 969.
6. Huchtmeier W. K., Witzel A., Kühr H., Pauliny-Toth I. I., Roland J.//*Astron. and Astrophys. Lett.* 1978. V. 64. P. L21.
Dos Santos P. M., Lepine J. R. D.//*Nature.* 1979. V. 278. P. 34.
Gardner F. F., Whiteoak J. B.//*Mon. Not. RAS.* 1982. V. 201. P. 13 P.
Henkel C., Gusten R., Downes D., Thum C., Wilson T. L., Biermann P.//*Astron. and Astrophys. Lett.* 1984. V. 141. P. L1.
Claussen M. J., Heiligenman G. M., Lo K. J.//*Nature* 1984. V. 310 P. 298.
7. Baan W., Gusten R., Haschick A. D.//*Astrophys. J.* 1986. V. 305. P. 830.
8. Weaver H., Williams D. R. W., Dieter N. H., Lum W. T.//*Nature* 1965. V. 208. P. 29.
9. Weinreb S., Meeks M. L., Carter J. C., Barrett A. H., Rogers A. E. E.//*Ibidem.* P. 440.
10. Moran J. M., Burke B. F., Barrett A. H., Rogers A. E. E., Ball J. A., Carter J. C.//*Astrophys. J. Lett.* 1968. V. 152. P. L97.
11. a) Townes C. H.//*Fourth IAU Symposium Manchester. 1965/Ed.* H. C. van de Hulst. — Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1957.
b) Cheung A. C., Rank D. M., Townes C. H., Thornton D. D., Welch W. J.//*Nature.* 1969. V. 221. P. 626.
12. Шкловский И. С.//*Астрон. ж.* 1949. Т. 26. С. 10.
13. Genzel R., Downes D., Schnepp M. H., Reid M. J., Moran J. M., Kogan L. R., Kostenko V. I., Matveyenko L. I., Ronnang B.//*Astrophys. J.* 1981. V. 247. P. 1039.
14. Reid M. J., Moran J. M.//*Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* 1981. V. 19. P. 231.
Elitzur M.//*Rev. Mod. Phys.* 1982. V. 54. P. 1225.
15. Sanders D. B., Scoville N. Z., Young Y. S., Soifer B. T., Schloerb F. P., Rice W. L., Danielson G. E.//*Astrophys. J.* 1986. V. 305. P. L45.
16. Аракелян М. А.//*Астрофизика.* 1974. Т. 10. С. 507.
17. Sargent W. L. W.//*Astrophys. J.* 1970. V. 160. P. 405.
Аракелян М. А., Дибай Э. А., Есипов В. Ф., Маркарян Б. Е.//*Астрофизика.* 1971. Т. 7. С. 177.
18. Unger S. W., Chapman J. M., Cohen R. J., Hawarden T. G., Mountain C. M.//*Mon. Not. RAS.* 1986. V. 220. P. 1 P.
19. Baan W. A., Haschick A. D.//*Astrophys. J.* 1984. V. 279. P. 541.
Schmeltz J. T., Baan W. A., Haschick A. D.//*Ibidem.* 1987. V. 321. P. 225.

20. Wielebinski R., Wunderlich E., Klein U., Hummel E.// Proc. of the Conference «Star Formation in Galaxies»/Ed. C. J. Lonsdale Persson. Pasadena, USA. Calif. Inst. Techn. 1986. P. 589.
21. a) Miley G. K., de Grijs R. Preprint Space Telescope Science Institute No. 65. Baltimore, 1985.
б) Fairclough J. H.//Mon. Not. RAS 1986. V. 219. P. 1. P.
в) Wynn-Williams C. G., Becklin E. E.//Astrophys. J. 1986. V. 308. P. 620.
г) Chini R., Kreysa E., Krugel E., Mezger P. G.//Astron. and Astrophys. 1986. V. 166. P. L8.
22. Lawrence A., Walker D., Rowan-Robinson M., Leech K. J., Penston M. V.//Mon. Rot. RAS. 1986. V. 219. P. 687.
23. Keel W. C.//²⁰.—P. 661.
24. Sanders D. B., Soifer B. T., Neugebauer G., Scoville N. Z., Madore B. F., Danielson G. E., Elias J. H., Matthews K., Persson C. J., Persson S. E.//Ibidem. P. 411.
25. Turner B. E.//Astrophys. J. 1973. V. 186. P. 357.
Crutcher R. M.//Ibidem. 1979. V. 234. P. 881.
26. a) Watt G. D.//Mon. Not. RAS. 1985. V. 212. P. 93;
б) Prasad S. S., Huntress W. T. Jr.//Astrophys. J. Suppl. 1980. V. 43. P. 1.
27. Brown J. M., Hougen J. T., Huber K. P., Johns J. W. C., Koppl I., Lefebvre-Brion H., Merer A. J., Ramsay D. A., Rostas J., Zare R. N.//J. Mol. Spectr. 1975. V. 55. P. 500.
28. Alexander M. H., Dagdigian P. J.//Chem. Phys. 1984. V. 80. P. 4325.
29. a) Andrensen P., Ondrey G. S., Titze B.//Phys. Rev. Lett. 1983. V. 50. P. 486.
б) Andrensen P., Ondrey G. S., Titze B., Rothe E. W.//J. Chem. Phys. 1984. V. 80. P. 2548.
30. Stief L. J., Donn B., Glicker S., Gentieu E. P., Mentall J. E.//Astrophys. J. 1972. V. 171. P. 21.
31. Окабе Х. Фотохимия малых молекул.—М.: Мир, 1981.—С. 93.
32. Sanders D. B., Mirabel I. F.//Astrophys. J. Lett. 1985. V. 298. P. L31.
Mezger P. G., Chini R., Kreysa E., Gemund H. P., Preprint Max-Plank Institute fur Radioastronomie No. 244.—Bonn, 1984.
33. a) Black J. H., Dalgarno A.//Astrophys. J. Suppl. 1977. V. 34. P. 405.
б) Norman C., Silk J.//Astrophys. J. 1980. V. 238. P. 158.
в) Solomon P. M., Sanders D. B., Scoville N. Z.//Proc. IAU Symposium No. 84/Ed. W. B. Burton.—Dordrecht, Holland: D. Reidel, 1979. —P. 35.
34. Van Dishoeck E. F., Dalgarno A.//Astrophys. J. 1984. V. 277. P. 576.
35. Andrensen P.//Astron. and Astrophys. 1986. V. 154. P. 42.
36. a) Henkel C., Batrla W., Gusten R.//Ibidem. V. 168. P. L13.
б) Henkel C., Gusten R., Baan W. A.//Bull. Am. Astron. Soc. 1986. V. 18. P. 689; Astron. and Astrophys. 1987. V. 185. P. 14.
37. a) Bujarrabal V., Destombes J. L., Guibert J., Marliere-Demuyenc C., Nguyen-Q-Rieu, Omont A.//Ibidem. 1980. V. 81. P. 1.
б) Elitzur M.//Ibidem. 1978. V. 62. P. 305.
38. Бурдюжка В. В., Варшалович Д. А.//Астрон. ж. 1973. Т. 50. С. 481.
Кегель В. Н., Varshalovich D. A.//Nature. 1980. V. 286. P. 136.
Guilloteau S., Lucas R., Omont A.//Astron. and Astrophys. 1981. V. 97. P. 347.
39. Litvak M. M.//Astrophys. J. 1969. V. 156. P. 471.
40. Destombes J. L., Marliere C., Baudry A., Brillet J.//Astron. and Astrophys. 1977. V. 60. P. 55.
41. Brown J. M., Shubert J. E., Evenson K. M., Radford H. E.//Astrophys. J. 1982. V. 258. P. 899.
42. Rowan-Robinson M.//²⁰. P. 133.
43. Henkel C., Wouterloot J. G. A., Bally J.//Astron. and Astrophys. 1986. V. 155. P. 193.
44. Wouterloot J. G. A., Walmsley C. M.//Preprint Max-Plank-Institute für Radioastronomie Nr. 255.—Bonn, 1986.
45. Genzel R., Downes D.//Astron. and Astrophys. 1979. V. 72. P. 234.
Jaffe D. T., Gusten R., Downes D.//Astrophys. J. 1981. V. 250. P. 621.
Morgwood A. F. M., Salinari P.//Astron. and Astrophys. 1983. V. 125. P. 342.
46. Стрельников В. С., Суняев Р. А.//Астрон. ж. 1972. Т. 49. С. 704.

47. Стрельницкий В. С.//Письма Астрон. ж. 1982. Т. 8. С. 165.
 Abraham Z., Cohen N. L.,opher R., Rafaelli J. C., Zisk S. H.
 //Astron. and Astrophys. Lett. 1981. V. 100. P. L10.
48. Claussen M. J., Lo K. Y.//Astrophys. J. 1986. V. 308. P. 592.
49. Goldreich P., Kwan J.//Ibidem. 1974. V. 191. P. 93.
50. а) Стрельницкий В. С.//Interstellar Molecules. IAU Symposium No. 87/Ed.
 B. H. Andrew.—Dordrecht, Holland: D. Reidel, 1980.—P. 591.
 б) Стрельницкий В. С.//Mon. Not. RAS. 1984. V. 207. P. 339.
 Kylafis N. D., Norman C.//Astrophys. L. Lett. 1986. V. 300. P. L73.
 Болгова Г. Т., Макаров С. В., Соболев А. М.//Астрофизика.
 1988. Т. 27.
51. Tarter J. C., Welch W. J.//Astrophys. J. 1986. V. 305. P. 467.
52. Morgan J.//Nature. 1984. V. 310. P. 270.
 Андреянов В. В., Кардашев Н. С., Попов М. В., Рудаков В. А., Сагдеев Р. З., Слыши В. И., Царевский Г. С.//Астрон. ж. 1986. Т. 63. С. 852.
53. Gatley I., Jones T. J., Hyland A. R., Wade R., Geballe T. R., Krisciunas K.//Mon. Not. RAS 1986. V. 222. P. 299.
54. Whiteoak J. B., Gardner F. F.//Ibidem. 1983. V. 205. P. 27.
55. Downes D., Wilson T. L.//Astrophys. J. Lett. 1974. V. 191. P. L77.
 Forster J. R., Goss W. M., Wilson T. L., Downes D., Dickel H. R.//Astron. and Astrophys. 1980. V. 84. P. L1.
 Rots A. H., Dickel H. R., Forster J. R., Goss W. M.//Astrophys. J. Lett. 1981. V. 245. P. L15.
56. Boland W., de Jong T.//Astron. and Astrophys. 1981. V. 98. P. 149.
57. Бурдюжा В. В. Препринт ИКИ АН СССР № 720.—Москва, 1982.