

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 5 — 1967

И. С. ШКЛОВСКИЙ

МЕЖЗВЕЗДНЫЕ МОЛЕКУЛЫ ГИДРОКСИЛА

В 1949 г. было замечено, что в радиоспектрах Галактики должны появляться линии, возникающие при переходах между компонентами Λ -удвоения таких межзвездных молекул, как CH , OH и SiH [1]. Спустя четыре года удалось значительно уточнить теоретически вычисленные значения длин волн этих линий [2]. В частности, найденная длина волны для молекулы OH была 18 см. В следующем 1954 г. Таунс учел сверхтонкую структуру каждого уровня Λ -удвоения [3]. С учетом этого следовало ожидать четырех радиолиний OH с частотами 1612, 1665, 1667 и 1720 мГц.

Однако до последнего времени оптические резонансные линии OH (в отличие от CH) нигде не наблюдались. Но у нас никогда не было сомнения в том, что в межзвездном пространстве молекулы OH должны быть достаточно обильны.

Радиолинии OH были обнаружены (после десятилетних поисков) лишь в самом конце 1963 г. [4]. С тех пор было выполнено большое количество наблюдений, и сейчас проблема межзвездного гидроксила является одной из наиболее интересных и важных в радиоастрономии и астрофизике. Поведение теоретически предсказанных радиолиний OH оказалось совершенно неожиданным и даже загадочным. Не случайно применительно к некоторым источникам такого излучения возник термин мистерium.

Основные результаты наблюдений радиолиний OH (см. обзоры [5] и [6]) сводятся к следующему. а) Обнаружены весьма интенсивные дискретные источники радиоизлучения на частотах линий OH , причем это излучение поляризовано по кругу; б) При наблюдениях в поглощении относительные интенсивности радиолиний OH резко отличаются от теоретических.

Мы остановимся сперва на последнем пункте. При больцмановском распределении населенностей по всем четырем подуровням Λ -удвоения отношение интенсивностей линий 1612, 1665, 1667 и 1720 мГц должно быть 1 : 5 : 9 : 1. В области галактического ядра, однако, наблюдаемые интенсивности линий поглощения 1612 и 1720 не равны, а отношение интенсивностей линий 1665 и 1667 мГц значительно превышает теоретическое, меняясь в зависимости от галактических координат. Кроме того, интенсивность линий OH в этой области неба очень велика и

сильно меняется от точки к точке, что указывает на сравнительно большое обилие молекул ОН и на переменность отношения $\frac{n_{\text{ОН}}}{n_{\text{H}}}$.

Последняя величина меняется от $\sim 10^{-7}$ до 10^{-4} .

Отклонение наблюдаемого отношения интенсивностей радиолиний ОН (близость интенсивностей линий 1667 и 1665 мггц и сравнительно высокую интенсивность линий 1720 и 1612 мггц) можно объяснить большой оптической толщей. Однако никаким влиянием оптической толщи нельзя объяснить неравенство интенсивностей этих линий. И хотя в большом количестве случаев наблюдаемая относительная интенсивность линий указывает на то, что оптическая толща их больше единицы, их глубина редко превышает 20—30%. Это означает, что проектирующиеся на источник непрерывного спектра плотные облака ОН покрывают только небольшую часть источника [6]. Следовательно, распределение межзвездного гидроксила носит весьма «клочковатый» характер.

Чрезвычайно существенно, что в отдельных случаях линии ОН 1720 и 1612 мггц наблюдаются в эмиссии. Это имеет место, например, в спектре Кассиопеи-А для детали, соответствующей лучевой скорости 0,8 км/сек . Такое явление можно объяснить только отклонением от бальмановского распределения населенностей молекул ОН по подуровням Λ -удвоения. При инверсии населенности благодаря мизерному эффекту отдельные линии могут наблюдаться в эмиссии. Явление эмиссии весьма распространено: из 54 наблюдавшихся источников непрерывного спектра в 20 отдельные линии ОН являются эмиссионными.

При любом распределении населенности по подуровням Λ -удвоения молекулы ОН должно выполняться условие [6].

$$\tau_{1620} + \tau_{1720} = \frac{\tau_{1665}}{5} + \frac{\tau_{1667}}{9}, \quad (1)$$

где τ — оптическая толща соответствующей линии. Если оптическая толща поглощающих облаков ОН значительно меньше единицы, вместо уравнения (1) можно написать:

$$\Delta T_{1612} + \Delta T_{1720} = \frac{\Delta T_{1665}}{5} + \frac{\Delta T_{1667}}{9}, \quad (2)$$

где ΔT_v — наблюдаемая глубина линий. Анализ наблюдений показывает, что соотношение (2) никогда не выполняется. Это можно объяснить влиянием большой оптической толщи. Однако, таким образом нельзя объяснить те случаи, когда наблюдаются эмиссионные линии. Так, согласно [6], в радиоспектре W 44 (остаток вспышки Сверхновой) наблюдаются две спектральные детали. Одна деталь показывает эмиссию в линии 1612 мггц , другая — в линии 1720 мггц (см. рис. 1). Рассмотрим, например, вторую деталь. Наблюдаемые ΔT для линий 1667, 1665, 1612 и 1720 мггц равны соответственно 2,1; 1,5; 0,6 и —2,5. Соотношение (2) явно не выполняется, причем знаки правой и левой части этого уравнения после подстановки приведенных выше значений ΔT_v оказываются противоположными. Простым увеличением оптической толщи в линиях нельзя добиться возможности выполнения равенства (1). Это видно хотя бы из того, что наблюдаемая интенсивность линии 1612 значительно меньше интенсивности линий 1665 и 1667 мггц . Так как соотношение (1), носящее самый общий характер, должно выполняться, мы лишь можем предположить «неоднородную» модель для облаков ОН. А именно считать, что линии поглощения образуются в сравнительно протяженной области, в то время как эмиссия в линии

1720 возникает в сравнительно малой плотной области, в которой имеется инверсия населенности. Малая плотная область, проектируясь на протяженный источник непрерывного спектра, не может, естественно, дать сколь-нибудь заметный (при наблюдениях с широкой диаграммой направленности) эффект поглощения: даже при очень большой оптической толщине наблюдаемая ΔT_ν будет определяться квадратом отношения угловых размеров малой области и источника непрерывного спектра. С другой стороны, подобных ограничений для индуцированного излучения от этой малой области не существует. Итак, малая

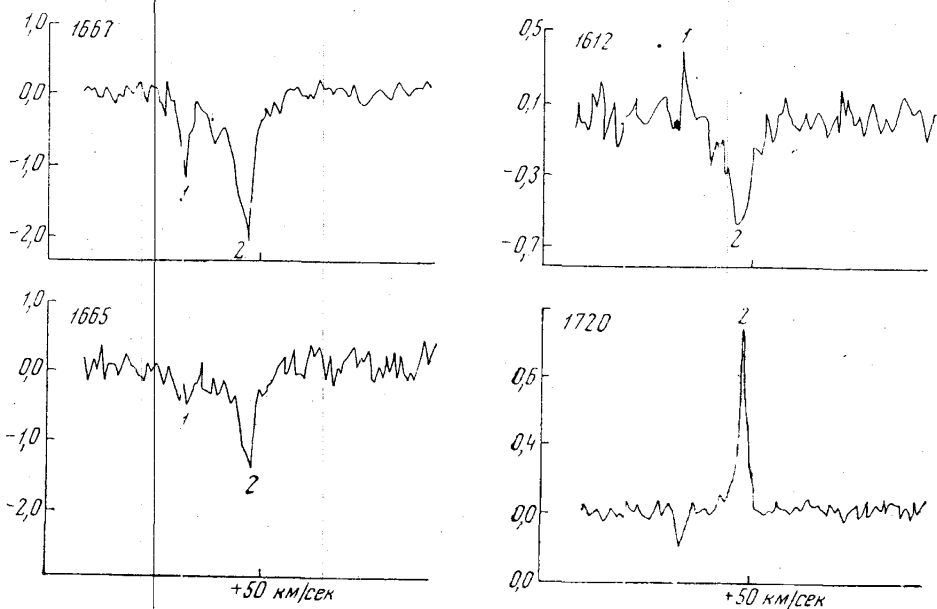


Рис. 1

плотная область с инвертированным распределением населенности молекул ОН по подуровням Λ -удвоения, проектирующаяся на протяженный источник непрерывного спектра, может наблюдаться только в эмиссии на одной (или нескольких) линии ОН. Заметим, кстати, что ни в одном случае не наблюдался эмиссионный эффект одновременно на двух линиях так называемых сателлитах 1612 и 1720 мГц при наличии поглощения на двух других основных. Это легко объяснить невозможностью создания такого типа инверсии населенности.

Для более протяженного облака ОН, ответственного за образование линий поглощения, имеются две возможности: 1) населенности подуровней Λ -удвоения следуют «нормальному» больцмановскому распределению при некоторой «температуре возбуждения» T_b и 2) населенности подуровней резко отличаются от равновесного распределения. В случае 1) для упомянутой детали в спектре W44 следует принять, что оптическая толщина протяженного облака больше единицы, а отсутствие линии поглощения 1720 мГц можно объяснить наложением эмиссии от малой конденсации. В случае 2) оптическая толщина протяженного облака может быть менее единицы.

До сих пор мы принимали, что угловые размеры конденсации с инвертированной населенностью подуровней настолько незначитель-

ны, что эффект поглощения от нее пренебрежимо мал. В принципе, однако, может быть такая ситуация, когда эта конденсация имеет достаточно большие угловые размеры, чтобы быть ответственной за часть наблюдаемого поглощения. Например, можно считать, что значительная часть поглощения у 1612 мгц обусловлена этой конденсацией, причем оптическая толща для этой линии значительно больше единицы. Часть поглощения линий 1665 и 1667 также можно объяснить влиянием конденсации.

При такой интерпретации из наблюдаемой глубины линии поглощения 1612 мгц, в предположении, что ее оптическая толща больше единицы, можно оценить угловые размеры конденсации. Глубина линии поглощения 1612 мгц (наблюдаемая) около 1%. Следовательно, при такой интерпретации конденсация экранирует $\sim 1\%$ поверхности источника W44. Расстояние до этого источника можно оценить согласно методу, развитому в [7]. Оно оказывается ~ 2000 пс. Угловые размеры W44 около $16'$. Следовательно, угловые размеры конденсации $1''.6$. Так как лучевая скорость облака вызывает поглощение $+50$ км/сек, то оно находится в спиральном рукаве Галактики, удаленном от нас на расстояние, близкое к расстоянию до W44. Отсюда следует, что линейные размеры конденсации $\sim 10^{18}$ см, т. е. достаточно велики. Заметим, что если никакого заметного поглощения у 1612 мгц конденсация не дает, ее линейные размеры могут быть существенно меньше.

В случае Кассиопеи-А расстояние до облака, ответственного за поглощение и аномальное излучение линии 1720 мгц, известно. Это облако находится в орионовом рукаве, удаленном от Солнца на расстояние около 400 пс.

Повторяя те же рассуждения, что и в случае W44, найдем, что, если поглощение у 1612 мгц обусловлено конденсацией, ответственной за эмиссию у 1720 мгц, она должна экранировать $3 \cdot 10^{-3}$ поверхности источника Кассиопеи-А. Это соответствует угловым размерам $13''$, что на расстоянии 400 пс дает линейные размеры $8 \cdot 10^{16}$ см. Если поглощение у 1612 мгц обусловлено более протяженным облаком, размеры конденсации будут еще меньше.

Если считать, что в более протяженных облаках молекулы ОН имеют неравновесное распределение по подуровням Λ -удвоения, возникает трудная проблема: что поддерживает такое состояние вопреки тенденции к установлению больцмановского распределения при столкновениях молекул ОН с другими частицами облака, особенно со свободными электронами? В зонах $H\text{I}$ последних должно быть мало, но никак не меньше, чем $10^{-4} \cdot n_H^{1/2}$ (предел, обусловленный ионизацией космическими лучами). С другой стороны, согласно [8], эффективное сечение столкновений молекул ОН со свободными электронами, приводящих к переходам между подуровнями Λ -удвоения, исключительно велико $-4 \cdot 10^{-12}$ см². При таком сечении время установления больцмановского распределения должно быть 10^8 сек, или 3 года! Каковы возможные процессы, ведущие к нарушению больцмановского распределения? Прежде всего, сюда следует отнести резонансное поглощение молекулами ОН ультрафиолетового излучения в области λ 3080 Å. Этот механизм подробно рассматривался в [8] применительно к проблеме накачки источников аномального излучения ОН. Можно рассчитать эффективность этого механизма в условиях межзвездного пространства. Положим, что плотность излучения в спиральном рукаве $\sim 10^{-12}$ эрг/см³, причем спектр этого излучения достаточно «ранний». Полуширина коэффициента поглощения молекул ОН для резонансного излучения при $T \sim 100^\circ \text{K}$ будет $\Delta\lambda_D \sim 3 \cdot 10^{-3}$ Å. Если цветовая темпера-

тура излучения 10^4 °К, то в полосе $\Delta\lambda_D$ около $\lambda=3080$ Å содержится $\sim 10^{-16}$ всей энергии излучения. При этом плотность рассеиваемых фотонов будет $\sim 10^{-7}$ см $^{-3}$. Полагая эффективное сечение рассеяния $\sim 10^{-14}$ см 2 (что соответствует силе осциллятора $\sim 10^{-3}$), найдем, что частота «накачки» молекул ОН в межзвездном пространстве будет $3 \cdot 10^{-11}$ сек $^{-1}$. Это в сотни раз меньше частоты столкновений со свободными электронами, приводящих к больцмановскому распределению.

Другой потенциальный механизм «накачки» — расстояние инфракрасных квантов в частотах вращательно-колебательного спектра ОН ($\lambda \sim 3$ м), в условиях межзвездного пространства также малоэффективен. Концентрация рассеиваемых инфракрасных квантов может быть на порядок больше, чем ультрафиолетовых, однако эффективное сечение рассеяния невелико, примерно такое же, как и для ультрафиолетовых квантов, так как эйнштейновский коэффициент для вращательно-колебательных переходов сравнительно мал ($\sim 10^3$ сек $^{-1}$). Поэтому «частота» накачки инфракрасным «диффузным» излучением может быть $\sim 3 \cdot 10^{-10}$ сек $^{-1}$, что также недостаточно.

Наконец, мыслим еще химический механизм накачки. Химия межзвездного гидроксила исследовалась в [9]. Основная реакция, ведущая к образованию молекул ОН, такова:



Энергия активации этой реакции достаточно велика (0,3 эв), поэтому она может идти, только если температура межзвездного газа не меньше 500° К. Такая температура возникает при столкновениях облаков межзвездного газа между собой. Но в случае облаков межзвездного газа, проектирующихся на Кассиопею-А, температура на порядок ниже, что следует из наблюдаемой ширины линий поглощения 21 см в спектре этого источника. Следовательно, никакого образования новых молекул ОН там происходить не может.

При такой ситуации более естественно считать, что в сравнительно протяженных облаках ОН, вызывающих поглощение, распределение молекул по подуровням А-удвоения является больцмановским, что, как уже указывалось, не противоречит наблюдениям. При такой интерпретации, однако, возникает ряд трудностей. Во-первых, концентрация молекул ОН в облаках получается очень большой. В самом деле, из измеренной глубины линий поглощения получается величина $\frac{N_{\text{ОН}}}{T_b}$, где $N_{\text{ОН}}$ — количество молекул ОН в столбе единичного сечения, вызывающих поглощение, T_b — температура возбуждения. В случае Кассиопеи-А, например, при глубине поглощения $\sim 1,5\%$, $\frac{N_{\text{ОН}}}{T_b} \sim 10^{13}$ [6].

Если имеется больцмановское распределение с $T_b \sim 10^2$, $N_{\text{ОН}} \sim 10^{15}$ см $^{-2}$. Кроме того, имеются все основания считать, что распределение ОН в межзвездной среде весьма неоднородно. Если в отдельных сравнительно небольших (10^{18} см) облаках оптическая толща > 1 , $N_{\text{ОН}}$ будет 10^{17} см $^{-2}$ и поэтому можно сделать вывод, что в таких облаках межзвездный газ находится преимущественно в молекулярном состоянии, причем почти весь кислород связан в гидроксил. Это полностью меняет существующие представления о природе областей межзвездной среды, где водород неионизирован. Следует, однако, заметить, что наши знания о физических условиях в области II весьма несовершенны и существующие представления могут быть далеки от истины.

Другой трудностью, возникающей при гипотезе о больцмановском распределении молекул ОН, является различие интенсивностей линий поглощения 1612 и 1720 *мгц* в области галактического центра. Устранить эту трудность можно предположением, что на эти линии накладывается эмиссия от конденсаций с инвертированной населенностью подуровней Λ -удвоения. Следует, впрочем, заметить, что около галактического ядра плотность инфракрасного излучения в области $\lambda \sim 3 \mu$ может быть весьма значительной. Поэтому отклонения от больцмановского распределения могут быть довольно большими.

Что можно сказать о природе плотных конденсаций, ответственных за эмиссию на частотах линий спутников в спектрах Кассиопеи-А, W44 и других объектов? Существующие данные пока еще очень скудны. Все же на одно интересное обстоятельство следует обратить внимание. Речь идет о практическом отсутствии разницы в лучевых скоростях системы линий поглощения и линии излучения. Скорее всего это может означать, что «конденсация» — это часть облака, ответственного за образование данной системы линий поглощения, в которой условия возбуждения подуровней Λ -удвоения аномальны. Можно предположить, например, что это — ближайшие окрестности холодной звезды-гиганта с температурой поверхности 1000° К. Недавно такие звезды были обнаружены, в частности, в туманности Ориона [10]. Мощность излучения такой звезды в области 3μ будет $\sim 5 \cdot 10^{21}$ *эрг/сек* *гц*. Поток инфракрасных квантов на расстоянии $\sim 10^{17}$ *см* от звезды будет $\sim 10^7$ *кв.см⁻²сек⁻¹*. Следовательно, частота рассеяний молекулой ОН инфракрасных квантов будет $\sim 10^{-7}$ *сек⁻¹* — величина достаточно большая, чтобы обеспечить любое нарушение больцмановского распределения, в том числе инверсию населенностей подуровней Λ -удвоения. Интересно предпринять поиски источника инфракрасного излучения в области Кассиопеи-А.

Весьма важен вопрос о характере связи между описанными конденсациями с инвертированной населенностью в «нормальных» облаках межзвездной среды и удивительными источниками аномального поляризованного излучения ничтожных угловых размеров и огромной поверхностной яркости, наблюдаемых около многих диффузных туманностей, в частности W3, W49 и др. (будем их называть источниками мистериума). И в том и в другом случае механизм излучения является мазерный эффект. Облако газа с инвертированной населенностью молекул ОН усиливает излучение в узких спектральных участках, которое через него происходит. Поэтому такие объекты преимущественно должны наблюдаться тогда, когда они проектируются на более или менее яркий фон радиоизлучения с непрерывным спектром. По-видимому, это объясняет отсутствие эмиссии в линиях ОН в области антицентра, установленное с точностью $\sim 0,1^\circ$ К [10]. Так как нельзя предположить специальную ориентацию конденсаций в облаках ОН по отношению к Солнцу, следует сделать вывод, что космические мазеры бегущей волны усиливают излучение более или менее изотропно. По-видимому, существует значительное различие между описанными выше конденсациями и источниками мистериума. Насколько позволяют судить имеющиеся наблюдательные данные, во-первых, усиливаются только линии — спутники, во-вторых, — все линии, причем линии 1665 и 1667 *мгц*, как правило, наиболее интенсивны. Возможно, что это связано с различием в механизмах накачки. Было бы весьма желательно исследовать характер поляризации эмиссионных линий в спектрах W44 и Кассиопеи-А.

В [11] была выдвинута идея, что накачка в источниках «мистериума» обусловлена действием некоего внутреннего механизма. В частно-

сти, в [11] рассматривалась накачка через инфракрасный, вращательно-колебательный спектр, причем источники этого излучения — сравнительно холодные протозвезды — имеют распределение интенсивности, резко отличное от планковского. Последние интерференционные измерения явно говорят в пользу нашей гипотезы. Согласно [12], вырисовывается следующая структура источников «мистериума»: в области размером 10^{-2} пс движутся с относительными скоростями порядка нескольких км/сек отдельные конденсации ОН, размеры которых меньше 10^{15} см. При интерпретации этих наблюдений сразу же возникает основной вопрос: является ли совокупность таких конденсаций системой с отрицательной или положительной энергией. Если принять вторую возможность, то в высшей степени затруднительно понять, как такие конденсации оказались в столь малом объеме. Трудно считать, что наблюдается какой-то взрыв: слишком малы предполагаемые скорости разлета конденсаций, отсутствует ионизированный газ и другие атрибуты ударной волны.

Естественно считать совокупность движущихся конденсаций, заключенных в малой области, системой с отрицательной энергией. Тогда, зная дисперсию скоростей конденсации и линейные размеры областей, в которой они движутся, по теореме о вириале можно найти полную массу во всей области. Она оказывается порядка нескольких $M_{\odot}$ для W3 и нескольких десятков $M_{\odot}$ — для W49. Считая, что эта масса распределена между десятью конденсациями, размеры которых $< 10^{15}$ см, найдем, что средняя плотность их $> 10^{-15}$ г/см³. По всем основным характеристикам такие объекты следует считать кратными звездными (вернее противозвездными) системами. Если это так, то радиоастрономия совершенно неожиданно дала могущественный метод, позволяющий поставить звездную космологию на прочную наблюдательную основу. Первоочередной задачей является попытка обнаружить инфракрасные источники в источниках «мистериума». По нашим оценкам, поток излучения от W3 в диапазоне $\lambda = 3 \mu$ на зеркало диаметром 1 м равен $\sim 10^{-14} - 10^{-13}$ вт/м, т. е. дает величину, находящуюся в пределах возможностей обнаружения современной измерительной техникой.

В заключение скажем несколько слов о возможной причине круговой поляризации источников «мистериума». Как показывают наблюдения, это не может быть Зееман-эффект (например, у некоторых источников наблюдается только один знак вращения). В принципе круговая поляризация может возникнуть при прохождении излучения через среду, в которой спины молекул ориентированы [13].

Такая ориентация может возникнуть при облучении среды резонансными квантами, поляризованными по кругу. Резонансным излучением может быть инфракрасное излучение протозвезд в отдельных линиях вращательно-колебательного спектра ОН, при условии, что оно возникает в среде, где напряженность магнитного поля достаточно велика (например, 100 эрст). По причине эффекта Допплера, вызванного движением конденсаций, последние будут преимущественно рассеивать либо правс-, либо левополяризованное излучение. Поэтому индуцированное излучение, проходящее через среду, ориентированную (и одновременно инвертированную) инфракрасными квантами, будет иметь соответственно либо левую, либо правую поляризацию. Следовательно, каждая конденсация должна быть источником индуцированного излучения с поляризацией только одного знака, что, по-видимому, и наблюдается. Заметим, что даже, если степень круговой поляризации активизирующего среду инфракрасного излучения невелика, на выходе

естественного космического мазера будет наблюдаться весьма высокая степень круговой поляризации. Подчеркнем, что высказанная гипотеза о причине круговой поляризации источников мистериума носит самый предварительный характер.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шкловский И. С. «Астр. журн.», 22, 10, 1949.
 2. Шкловский И. С. ДАН СССР, 92, 25, 1953.
 3. Townes C. H. Intern. Astro univ. Symp., No. 4, 92.
 4. Weinreb S., Barrett A. M., Meeks M. L., Henry I. C. «Nature», 200, 829, 1963.
 5. Robinson B. I. Preprint IAU Symposi Norduyk, 1966.
 6. Robinson B. I. Preprint Annual Review of Actronomy, vol. 5, 1967.
 7. Шкловский И. С. «Астр. журн.», 37, 369, 1960.
 8. Perkins F., Godd T., Salpeter E. E. Aph. 1. 145, 361, 1966.
 9. Carrob T. O., Sabpeter E. E. Preprint Center for Radio Physics and Space research Cornell university, 1965.
 10. Becklin E. E., Nengebauer G. Aph. J. 147, 799, 1967.
 11. Шкловский И. С. АИ, № 372, 1966.
 12. Davies R. D., Rowson B., Booth R. S., Cooper A. I., Gent H., Adgie R. L., Grouter I. H. Preprint Nature, 1967.
 13. Варшанович Д. А. «Астр. журн.», 42, 557, 1965.
-