

И. С. ШКЛОВСКИЙ

## ВОЗМОЖНОСТЬ НАБЛЮДЕНИЯ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ОТ МЕЖЗВЕЗДНЫХ МОЛЕКУЛ

(Представлено академиком Г. А. Шайном 1 VII 1953)

Известно, что обнаружение в радиоизлучении Галактики водородной радиолнии  $\lambda = 21$  см оказалось возможным потому, что ее существование сперва было предсказано теоретически (1, 2). В настоящее время изучение радиолнии межзвездного водорода является мощным методом исследования межзвездной газовой материи, а также динамических характеристик Галактики (3, 4). Представляет выдающийся интерес вопрос, имеются ли в радиоизлучении Галактики еще другие линии, отличные от водородной.

В (2) было показано, что нельзя ожидать радиолний от других межзвездных атомов. Впрочем, не исключено, что может быть обнаружена слабая линия поглощения от межзвездного дейтерия с длиной волны около 92,5 см (5). Мы, однако, в свое время указали, что некоторые молекулы-гидриды могут дать радиолнии излучения (2). Такие линии могут возникать при переходах между компонентами  $\Delta$ -удвоения основного вращательного уровня молекул. Хотя, как указывалось в (2), ни одним из существующих правил отбора для дипольного излучения такие переходы не запрещены, представлялось весьма желательным получение этих линий в лабораторных условиях, разумеется, в поглощении. Это дало бы полную гарантию, что излучение при переходах между компонентами  $\Delta$ -удвоения имеет дипольный характер. Учитывая, что обилие межзвездных молекул-гидридов на 7 порядков меньше, чем обилие атомов водорода, ожидать радиолний от них можно только тогда, когда излучение дипольно (радиолния водорода  $\lambda = 21$  см реализуется магнитно-дипольным излучением, вероятность которого приблизительно на 6 порядков меньше, чем вероятность дипольного излучения).

Как известно,  $\Delta$ -удвоение имеет место только для  $\Pi$ - и  $\Delta$ -состояний. Как правило, основное состояние молекул  $\Sigma$ . Только у молекул  $\text{OH}$ ,  $\text{CN}$ ,  $\text{SiH}$  и у их изотопов основное состояние  $\Pi$  (речь идет о молекулах, космическое обилие которых может быть значительным). В (2) вычислялось  $\Delta$ -удвоение для молекулы  $\text{OH}$  в предположении, что имеет место хундовский тип связи  $b$ , что более или менее справедливо для больших значений вращательного квантового числа  $K$ . Однако для основного вращательного состояния ( $K = 1$ ) такое приближение уже недостаточно. В действительности, у всех интересующих нас молекул для малых  $K$  имеет место промежуточный тип связи между моментами. Таким образом, из вычислений, приведенных в (2), можно было сделать только вывод, что длины волн радиолний межзвездных молекул-гидридов лежат в сантиметровом и дециметровом диапазонах. Между тем, для обнаружения этих линий частоты моно-

хроматического радиоизлучения должны быть известны с достаточной точностью, так как современные радиоприемники могут принимать излучение в весьма ограниченном интервале частот.

Недавно появилось сообщение (6), что методами молекулярной радиоспектроскопии удалось обнаружить у ОН две линии, соответствующие переходам между компонентами  $\Lambda$ -удвоения при  $K=4$  и  $K=5$ . Тем самым экспериментально доказано, что излучение между компонентами  $\Lambda$ -удвоения носит дипольный характер. Следовательно, задачей радиоастрономии является обнаружение этих линий в радиоспектре Галактики. Для этого в первую очередь необходимо с достаточной точностью вычислить частоты этих линий.

Согласно Ван Флеку (7), в общем случае промежуточной связи (переходный случай связи от типа  $a$  к типу  $b$  по Хунду) расщепление вращательных уровней из-за  $\Lambda$ -удвоения будет равно:

$$\Delta\nu(J) = [(1/2 p + q)(\pm 1 + 2X^{-1} - YX^{-1}) + 2qX^{-1}(J - 1/2)(J + 3/2)](J + 1/2), \quad (1)$$

где мы воспользовались обозначениями Мэлликена и Кристи (8). В формуле (1)  $p$  и  $q$  — параметры  $\Lambda$ -удвоения, которые могут быть получены из анализа тонкой структуры оптических спектров молекул;

Таблица 1

Молекула	$A, \text{см}^{-1}$	$B_v, \text{см}^{-1}$	$Y=A/B_v$	$p_{\text{набл.}}, \text{см}^{-1}$	$q_{\text{набл.}}, \text{см}^{-1}$
ОН	-138	18,47	-7,45	+0,231	-0,038
СН	+28,4	14,207	+2,0	+0,032	+0,037
SiH	+144	7,4	+19,5	+0,049	0,0154

$J = K \pm 1/2$  — квантовое число;  $Y = A/B_v$ , где  $B_v$  — вращательная постоянная,  $A$  — мультиплетное расщепление;  $X = \frac{Y}{\pm 1 + \sqrt{Y(Y-4) + (J+1/2)^2}} \cdot 4$ .

Знак  $+$  в  $\pm$  относится к  $T_2$ -термам, знак  $-$  к  $T_1$ -термам.  $T_2$ -термы соответствуют  ${}^2\Pi_{3/2}$  для регулярных дублетов в

случае  $a$ ,  $J = K - 1/2$  в случае связи типа  $b$  и  ${}^2\Pi_{1/2}$  для обращенных дублетов;  $T_1$ -термы соответствуют  ${}^2\Pi_{1/2}$  для регулярных дублетов в случае  $a$ ,  $J = K + 1/2$  в случае связи типа  $b$  и  ${}^2\Pi_{3/2}$  для обращенных дублетов.

У молекул ОН основное состояние  ${}^2\Pi_1$ , т. е. последовательность термов обращена; у молекул СН и SiH основное состояние  ${}^2\Pi_{1/2}$  — регулярные дублеты. Приводим таблицу основных параметров, необходимых для вычисления расщепления уровней при  $\Lambda$ -удвоении. Данные взяты согласно (8) (см. табл. 1).

Параметры  $\Lambda$ -удвоения  $p$  и  $q$  получены из анализа тонкой структуры оптических спектров. Прежде всего возникает вопрос, с какой степенью надежности можно вычислять  $\Delta\nu(J)$  согласно формуле (1). Мы проверили, как эта формула представляет экспериментально полученные частоты (6) для ОН. Для  $K=4$ ,  $J=4^{1/2}$  опыты дают  $\Delta\nu_0(4^{1/2}) = 23\,822$  Мгц, а согласно формуле (1)  $\Delta\nu_T(4^{1/2}) = 23\,600$  Мгц; для  $K=5$ ,  $J=5^{1/2}$   $\Delta\nu_0(5^{1/2}) = 36\,989$  Мгц, а теория дает  $\Delta\nu_T(5^{1/2}) = 37\,060$  Мгц. Согласие можно считать хорошим.

В табл. 2 приводятся результаты вычислений расщепления  $\Lambda$ -удвоения для самых глубоких уровней молекул ОН, СН и SiH. В случае вычисления  $\Lambda$ -удвоения для уровня  $J = 1/2$  молекулы СН по формуле (1) мы сталкиваемся с особенностью. При  $Y \rightarrow 2$ ,  $X \rightarrow 0$  и  $\Delta\nu(1/2)$  становится неопределенным. Эту неопределенность можно раскрыть, если положить  $Y = 2 + Z$ . Тогда  $X = |Z|$  и  $\Delta\nu(1/2) = -2(p + q)$ , если  $Z > 0$ ,  $\Delta\nu(1/2) = 0$ , если  $Z < 0$ .

Существующая точность определения молекулярных постоянных  $A$  и  $B_v$  не позволяет сделать определенный вывод о знаке  $Z$ . Заме-

тим еще, что формула (1) не является совершенно строгой; в ней опущены члены, которые обычно бывают малы (<sup>7</sup>, <sup>8</sup>). При  $Z < 0$ ,  $J = 1/2$  эти члены, повидимому, следует принимать во внимание.

Точность вычисления по формуле (1) может быть оценена как  $\pm 10$  Мгц; линия  $\lambda = 18,3$  см, принадлежащая ОН, из-за наличия спина ядра  $I$  атома водорода должна быть расщеплена на 4 компоненты. Однако наблюдаться будут только две, соответствующие переходам с  $\Delta F = 0$  ( $F = J + I$ ) (<sup>7</sup>). Расстояние между компонентами этой линии будет около 1 Мгц. Другие линии также должны быть расщеплены, однако характер этого расщепления нам пока неясен. Для уточнения величины  $\Delta\nu$  ( $1^{1/2}$ ) в случае молекулы ОН мы определили параметры  $p$  и  $q$  из измеренных в (<sup>8</sup>) частот линий, полагая  $Y = -7,547$  (<sup>7</sup>). Получилось, что  $p = +0,2228$  см<sup>-1</sup>,  $q = -0,03903$  см<sup>-1</sup>, откуда  $\Delta\nu$  ( $1^{1/2}$ ) = 1645 Мгц.

Интенсивность этих радиолиний может быть довольно значительной. Согласно (<sup>6</sup>), сильные линии поглощения получались в трубке длиной в 1 м при давлении 0,1 мм и при относительной концентрации молекул гидроксила в несколько десятых процента. Отсюда найдем, что число поглощающих молекул было около  $10^{15}$  см<sup>-2</sup>, между тем как в межзвездной среде при концентрации молекул-гидридов  $3 \cdot 10^{-8}$  см<sup>-3</sup> в столбе единичного сечения протяженности в  $3 \cdot 10^{22}$  см будет  $10^{15}$  см<sup>-2</sup> молекул. Так как точное значение дипольного момента для радикалов ОН, СН и SiH пока неизвестно, вероятности излучения можно оценить только по порядку величины. Для указанных линий ОН, СН и SiH  $A \sim 10^{-9}$  сек<sup>-1</sup>. При такой вероятности перехода оптическая толща Галактики для линий СН и ОН (в предположении, что концентрация пока еще не наблюдавшейся молекулы ОН такая же, как СН и СН<sup>+</sup>) будет на порядок меньше оптической толщи Галактики для водородной радиолинии  $\lambda = 21$  см. Известно, что Галактика для последней линии в значительной степени непрозрачна. Поэтому следует ожидать, что в центре «молекулярных» радиолиний интенсивность в направлениях, где дифференциальное галактическое вращение отсутствует, будет близка к интенсивности абсолютно черного тела при температуре, равной кинетической температуре межзвездного газа в зонах H I (около 100°).

До сих пор межзвездная линия ОН в оптической астрономии не наблюдалась. Заметим, что сила осциллятора для электронных переходов у этой молекулы очень незначительна. Мы не видим оснований считать, что молекула ОН должна быть в межзвездном пространстве менее обильна, чем молекула СН. Кремний, как известно, весьма обильный в космосе элемент. Его обилие всего лишь в 10 раз меньше, чем обилие углерода. Межзвездная молекула SiH в оптической астрономии не обнаружена. Наличие этой молекулы в межзвездном пространстве весьма вероятно. Молекулы  $C^{13}H$  и  $C^{13}H^{1+}$  также могут дать линии в радиоспектре Галактики, однако значения параметров  $p$  и  $q$  для этих молекул нам пока неизвестны. Изотопический анализ межзвездного газа, возможность которого открывается радиоастрономией, представляет исключительный интерес.

Если бы концентрация межзвездного дейтерия была достаточно большой (приблизительно больше, чем 1/300 от концентрации межзвездного водорода), то можно было бы обнаружить линии  $C^{12}H^2$ ,  $C^{12}H^{2+}$  и  $O^{16}H^2$ . Заметим, что концентрация дейтерия в межзвездном пространстве пока неизвестна.

Таблица 2

Молекула	$J$	$\Delta\nu$ , Мгц	$\lambda$ , см
ОН	$1^{1/2}$	1640	18,3
СН	$1^{1/2}$	3180	9,45
SiH	$1^{1/2}$	2395	12,5

«Теллурические» линии ОН, обусловленные гидроксидом, присутствующим в земной атмосфере, будут иметь ничтожно малую интенсивность. Согласно (9), полное число молекул атмосферного гидроксида на всех колебательных и вращательных уровнях не превышает  $10^{11}$  см<sup>-2</sup>. Таким образом, монохроматическое радиоизлучение от межзвездных молекул-гидридов может быть беспрепятственно наблюдаемо на Земле.

Не исключено, что удастся обнаружить и другие линии, принадлежащие рассмотренным выше межзвездным молекулам. Рассмотрим, например, молекулу СН. Вращательный уровень  ${}^2\Pi_{3/2}$  ( $K=1$ ), энергия которого больше, чем у самого глубокого уровня  ${}^2\Pi_{1/2}$  этой же молекулы, является метастабильным (интеркомбинация!). Если степень запрета для спонтанного перехода  ${}^2\Pi_{3/2} \rightarrow {}^2\Pi_{1/2}$  достаточно велика (точнее, если продолжительность жизни молекулы в состоянии  ${}^2\Pi_{3/2}$  не меньше, чем время между столкновениями молекул СН и атомов Н), то населенность уровня  ${}^2\Pi_{3/2}$  будет в 2 раза больше, чем «основного» уровня  ${}^2\Pi_{1/2}$ . Это следует из формулы Больцманна с учетом статистических весов. Тогда может наблюдаться радиолиния с частотой 7025 Мгц ( $\lambda = 4,27$  см). Аналогично, у молекулы ОН переход между компонентами  $\Lambda$ -удвоения для более «высокого» уровня  ${}^2\Pi_{3/2}$  даст линию с частотой 4350 Мгц ( $\lambda = 6,9$  см).

У молекулы SiH переход между компонентами  $\Lambda$ -удвоения у самого глубокого вращательного уровня системы  ${}^2\Pi_{3/2}$  даст линию с частотой около 360 Мгц ( $\lambda = 83,5$  см). Эта линия должна наблюдаться в поглощении.

До сих пор мы анализировали только молекулы-гидриды. Между тем, в межзвездном газе обнаружена молекула CN (основное состояние  $\Sigma$ ). У молекулы NO (которая в межзвездном газе пока оптической астрономией не обнаружена) основное состояние  ${}^2\Pi_{1/2}$ . Переход между компонентами  $\Lambda$ -удвоения у самого глубокого вращательного уровня дает линию с частотой около 450 Мгц ( $\lambda = 66,7$  см), которая также может быть наблюдаема в поглощении.

Таким образом, открываются новые, весьма богатые возможности изучения межзвездной среды и динамики Галактики методами радиоастрономии.

Государственный астрономический институт  
им. П. К. Штернберга

Поступило  
27 VI 1953

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> H. van de Hulst, Ned. Tyd. Nat., 201, 219 (1945). <sup>2</sup> И. С. Шкловский, Астр. журн., 26, 10 (1949). <sup>3</sup> C. Muller, J. Oort, Nature, 168, 357 (1951). <sup>4</sup> W. Christiansen, J. Hindman, A. J. S. R., 5, 437 (1952). <sup>5</sup> И. С. Шкловский, Астр. журн., 29, 144 (1952). <sup>6</sup> T. Sanders, A. Shawlow, G. Dousmanis, C. Townes, Phys. Rev., 89, 1158 (1953). <sup>7</sup> J. van Vleck, *ibid.*, 33, 467 (1929). <sup>8</sup> R. Mulliken, A. Christy, *ibid.*, 38, 87 (1931). <sup>9</sup> И. С. Шкловский, Изв. Крымск. астр. обсерв., 7 (1951).