

УДК 524.5-17

МОЛЛИД: ПРОГРАММА ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОТОЖДЕСТВЛЕНИЯ МОЛЕКУЛ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ К СПЕКТРАМ ПРОТОЗВЕЗД ИЗ ОБЛАСТИ RCW 120

© 2025 А. А. Фарафонтова^{1*}, М. С. Кирсанова¹, С. В. Салий²

¹Институт Астрономии РАН, Москва, 119017 Россия

²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, 620062 Россия

Поступила в редакцию 1 июля 2025 года; после доработки 21 августа 2025 года; принята к публикации 2 сентября 2025 года

В работе представлена программа для автоматического приближения линий излучения с помощью гауссова профиля и отождествления молекул **MOLLIId** (MOlecular Line Identification). В программе отождествление молекул проводилось с помощью поэтапного сопоставления центральных частот линий и частот покоя из баз спектроскопических данных. Работа программы была протестирована на примере отождествления линий излучения в наблюдательных спектрах молодых звездных объектов (МЗО или YSO) YSO S1 и YSO S2, расположенных на границе области фотодиссоциации (ФДО) RCW 120. В спектрах источника YSO S1 было отождествлено 100 линий 41 молекулы до уровня 4–6 σ . В спектрах источника YSO S2 было отождествлено 407 линий 79 молекул до 3–5 σ . На CPU Intel Core i7-12700K время отождествления составило около шести и восьми минут на спектральный диапазон для YSO S1 и YSO S2 соответственно. По найденным линиям молекул CH_3OH , CH_3CN , CH_3CCN в YSO S2 на вращательных диаграммах мы выделили два компонента, относящихся к горячему ядру, и оценили физические параметры в ЛТР-приближении для каждого из компонентов.

Ключевые слова: линия: идентификация — звезды: формирование — ISM: молекулы

1. ВВЕДЕНИЕ

Линии излучения простых и сложных молекул служат ключевым инструментом для определения химического состава и физических параметров областей звездообразования. Современные наблюдения в суб- и миллиметровом диапазонах предоставляют спектры высокого разрешения, богатые молекулярными линиями. Однако анализ этих спектров сопряжен с существенными сложностями: отождествление линий требует тщательного поиска частот в базах данных, например таких как CDMS (Müller et al., 2001), JPL (Pickett et al., 1998), а также приближения каждого профиля линии функцией Гаусса, проверки качества приближения и оценки наиболее вероятных молекул для каждой спектральной линии. Методы ручного отождествления, например в работе Hernández-Hernández et al. (2014), используют веб-сайт **SPLATALOGUE**¹ для визуального определения основных линий в спектрах. В исследовании Gieser et al. (2019) 67 линий были

идентифицированы вручную путем поиска в базах данных CDMS и JPL.

Для упрощения процесса обработки спектральных данных разрабатываются программы и методы, позволяющие приближать профили одним или несколькими гауссовыми компонентами. Например, метод, предложенный Haud (2000), основан на последовательном добавлении гауссовых профилей в линию до достижения заданного уровня шума. На заключительном этапе приближения проводится уменьшение числа гауссовых компонент за счет удаления статистически необоснованных или объединения пространственно близких компонент. Альтернативные методы используют алгоритм автономного гауссова разложения, например, алгоритмы **GAUSSPY** (Lindner et al., 2015), **GAUSSPY+** (Riener et al., 2019), **SCOUSEPy** (Henshaw et al., 2016) выделяют потенциальные гауссовые компоненты в профиле линии с помощью вычисления первой и второй производной от наблюдаемого спектра. Программа **SPIF** (Juvela and Tharakkal, 2024) позволяет приближать профили линий одной или несколькими гауссовыми компонентами. Наилучшее приближение к данным наблюдений определяется с помощью минимизации χ^2 .

*E-mail: farafontova@inasan.ru

¹<https://splatalogue.online/#/home>

Помимо программных пакетов, используемых для приближения профилей и гауссова разложения профиля линии на компоненты, разрабатываются алгоритмы, позволяющие отождествлять линии излучения в спектре. Основой отождествления в таких алгоритмах является поиск наилучшего приближения модельного спектра, интенсивности которого рассчитываются для заданного списка молекул в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР) к наблюдательным данным. К таким программным пакетам относятся, например, *XCLASS* (Möller et al., 2017), *PySpecKit* (Ginsburg and Mirocha, 2011), *MADCUBA* (Martín et al., 2019), *CASSIS* (Vastel et al., 2015). Отличительной особенностью программ *MADCUBA* и *CASSIS* является наличие графического представления данных, а также ручной выбор молекул, для которых требуется рассчитать модельные интенсивности линий в приближении ЛТР. Расчет спектров в ЛТР-приближении и отождествление линий таким методом, как правило, точнее ручного определения, однако требует задания некоторых заранее известных условий (например, химический состав объекта), а также предположения, что излучение всех молекул возникает в одних и тех же физических условиях.

Горячие ядра относятся к наиболее ранним стадиям образования звезд. На стадии горячего ядра протозвезды погружена в окружающий газ и температуры достаточны для испарения молекул с поверхности пылинок и образования сложных молекулярных соединений в газовой фазе. Спектры горячих ядер содержат большое количество линий излучения простых и сложных молекул, например SO , CS , SO_2 , CH_3CN , $\text{CH}_2(\text{OH})\text{CHO}$, HCOOCH_3 , CH_3OCH_3 и других. В работе мы используем спектры излучения молодых звездных объектов (МЗО) в миллиметровом диапазоне. Выбранные МЗО принадлежат области звездообразования RCW 120, которая активно изучается на протяжении двух последних десятилетий. RCW 120 расположена на расстоянии 1.34 кпк от Солнца (Deharveng et al., 2009). В работе Zavagno et al. (2007) в направлении сгустков, видимых в миллиметровом диапазоне на границе ФДО RCW 120, было обнаружено множество МЗО с эволюционными классами 0, I и II. В последующих работах (см. Figueira et al., 2017; Belitsky et al., 2018) был проведен анализ ИК-излучения в направлении МЗО, оценены массы объектов и показано, что источник ID S2 является самым массивным во всей области звездообразования, а масса источника ID S1 в несколько раз меньше. Далее мы будем называть эти источники RCW 120 YSO S2 и RCW 120 YSO S1 или, для краткости, YSO S2 и YSO S1, как они обозначены в работе Plakitina et al. (2024).

Таблица 1. Выбранные диапазоны частот. Уровень шума приведен для спектров, сглаженных до спектрального разрешения 0.3 км с^{-1}

Диапазон	Частоты, ГГц	Уровень шума, мК	
		S1	S2
B1	202.951–206.831	6	6
B2	215.170–219.169	5	7
B3	236.921–240.920	4	6
B4	240.831–244.830	3	4
B5	253.169–257.167	3	4
B6	257.081–261.078	4	7

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения проводились на телескопе APEX (Güsten et al., 2006) в Чили в периоды 19–21 мая, 4–5 и 24 июня, 22–23 и 30 августа 2022 года в рамках заявки E-0109.C-0623A-2022 (руководитель: М. С. Кирсанова), наблюдательное время ESO. Основной целью данной наблюдательной программы было получение высококачественных спектров с уровнем шума менее 10 мК при спектральном разрешении не ниже 0.3 км с^{-1} . Для наблюдений использовался приемник nFLASH230 (Belitsky et al., 2018) в шести диапазонах частот, указанных в таблице 1. Наблюдаемый спектр показан на Рис. 1. В результате накопления сигнала за 3–4 часа в каждом из диапазонов удалось достичь желаемого уровня шума.

Калибровка данных к шкале антенной температуры осуществлялась в режиме реального времени с помощью стандартного пакета *apexOnlineCalibrator*. Впоследствии мы перевели спектры в шкалу температуры главного луча, разделив спектры на коэффициенты $\eta_{\text{mb}} = 0.81$ и 0.73 для мая/июня и августа соответственно². Пространственное разрешение проведенных наблюдений в зависимости от частоты составило $21''$ – $34''$, что соответствует 0.13 – 0.22 пк для расстояния RCW 120.

Две наблюдавшиеся позиции с координатами $\alpha_1 = 17^{\text{h}}12^{\text{m}}10^{\text{s}}.960$, $\delta_1 = -38^{\circ}31'59''7$ и $\alpha_2 = 17^{\text{h}}12^{\text{m}}08^{\text{s}}.700$, $\delta_2 = -38^{\circ}30'47''.4$ соответствуют протозвездам S1 и S2 из области RCW 120. Наблюдения проводились в режиме «наведение–отведение» с OFF-позицией $\alpha = 17^{\text{h}}12^{\text{m}}08^{\text{s}}.000$, $\delta = -38^{\circ}36'03''.00$. Уровень осажденной воды (PWV) лежал в диапазоне 0.3 – 0.9 мм, шумовая температура была $T_{\text{sys}} \approx 100$ – 150 К.

²<https://www.apex-telescope.org/telescope/efficiency/index.php>

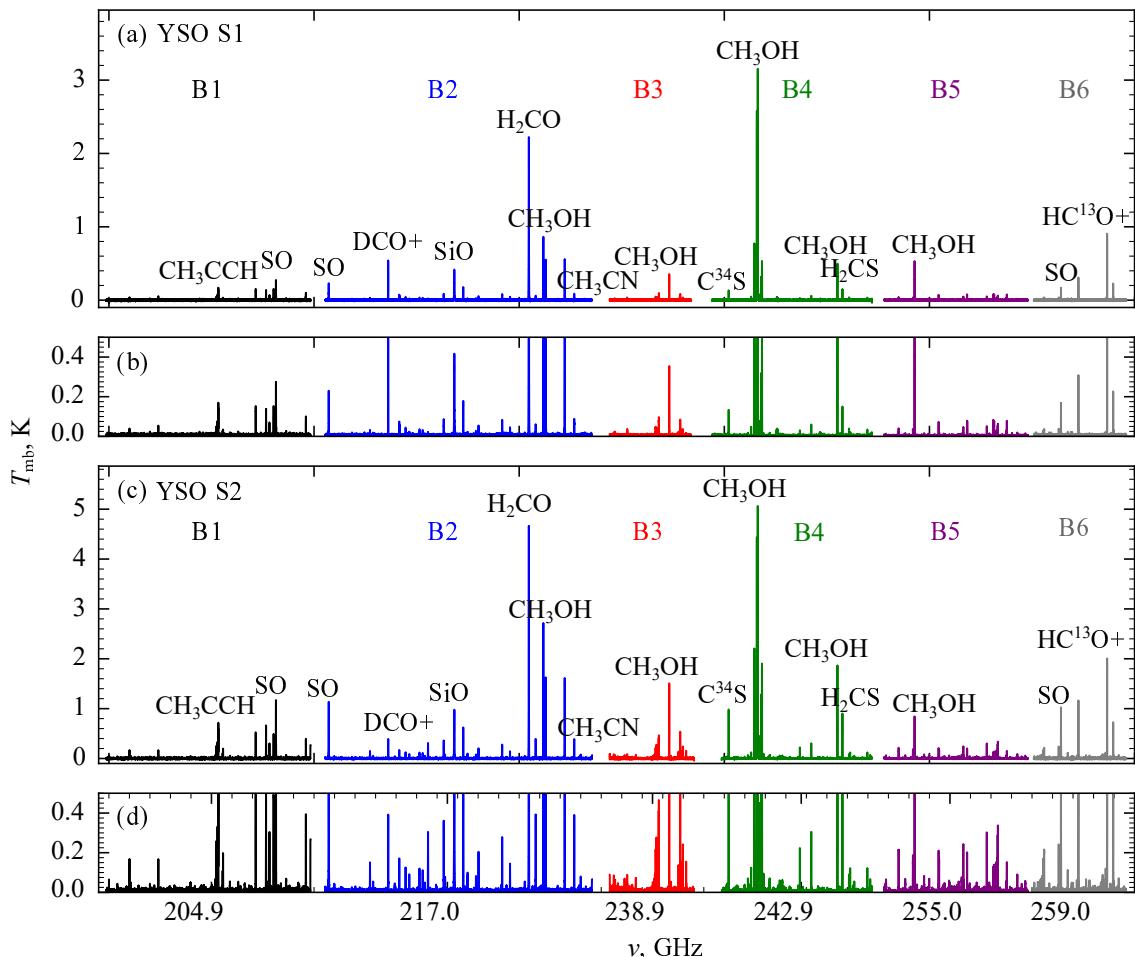


Рис. 1. Наблюдаемые спектры для источника YSO S1 (панели (а) и (б)) и YSO S2 (панели (с) и (д)). Данные, относящиеся к спектральному диапазону B1–B6 из таблицы 1, обозначены разными цветами. Для наиболее интенсивных линий приведены обозначения отождествленных молекул.

3. МЕТОДЫ

Программный пакет **MOLId** состоит из двух этапов: приближение профилей спектральных линий и отождествление молекул. Приближение профилей линий проводится с использованием однокомпонентной функции Гаусса. Для каждой линии, выделяющейся на заданном уровне шума, с помощью метода оптимизации определяются параметры: центральная частота, ширина и интенсивность линии. Центральные частоты, полученные на первом этапе, используются на втором этапе для сравнения с частотами из спектроскопических баз данных.

Перед применением программного пакета к данным наблюдений было выполнено вычитание базовой линии с помощью функции `arpls` из пакета `pybaselines` (Erb, 2024). Данная функция основана на подходе асимметричного взвешенного сглаживания по методу наименьших квадратов.

3.1. Приближение профилей линий

Профили спектральных линий, как правило, исследуются при помощи упрощенных моделей. Наиболее распространенным подходом является приближение профиля с использованием функции Гаусса. Применение гауссовой функции обусловлено гипотезой о максвелловском распределении скоростей в газе, когда в нем преобладают тепловые движения. В более широком контексте центральная предельная теорема утверждает, что при достаточном количестве случайных движений внутри диаграммы направленности, вызванных, например, турбулентностью, наблюдаемые спектральные линии будут приближаться к гауссовой форме.

В работе на языке программирования `Python` реализован процесс последовательного приближения профилей спектральных линий с помощью функции Гаусса. Приближение каждой из линий осуществляется одной гауссианой с тремя независимыми параметрами — центральной частотой

Таблица 2. Критерии отбора, используемые для отождествления молекул в спектре, по отклонению частоты из базы спектроскопических данных от центральной частоты ($\Delta\nu$), энергии верхнего уровня (E_u) и логарифму коэффициента Эйнштейна спонтанного перехода ($\lg A_{ij}$)

Уровень	$\Delta\nu$, ГГц	E_u , К	$\lg A_{ij}$
1	± 0.0005	≤ 200	$\geq 1 \times 10^{-7}$
2	± 0.001	≤ 400	$\geq 1 \times 10^{-8}$
3	± 0.002	≤ 800	$\geq 1 \times 10^{-9}$
4	± 0.003	≤ 1000	$\geq 1 \times 10^{-10}$

(x_0), полуширина на половине интенсивности (σ') и максимумом интенсивности линии $\left(\frac{1}{\sigma'\sqrt{2\pi}}\right)$ — в виде:

$$f(x_i) = \frac{1}{\sigma'\sqrt{2\pi}} \exp \left[\frac{(x_i - x_0)^2}{2\sigma'^2} \right]. \quad (1)$$

В качестве первого приближения в программе используется одиночная гауссиана. Следовательно, не учитывается случай слияния линий, когда в диаграмму направленности приемника может попасть более одного источника с неодинаковыми скоростями. Кроме того, не учитываются возможные крылья линий. Перечисленные случаи требуют более тщательного подхода, нежели мы реализовали в **MOLLId** на текущий момент.

Процесс приближения начинается с линии, наиболее интенсивной в рассматриваемом диапазоне. Эта линия находится с помощью функции `numtryp.argmax`. Найденная таким образом линия приближается гауссовым профилем и вычитается из спектра. В измененном спектре снова выбирается наиболее интенсивная линия и приближается функцией Гаусса. Процесс прекращается, когда в спектре не выделяется ни одной линии выше уровня 3σ , где σ — уровень шума на широкополосном спектре. Отсеивание случайных выбросов проводится с помощью расчета коэффициента детерминации (R^2), который рассчитывается для каждого приближения. Для случайного выброса задан $R^2 < 0.1$.

В программе оценка параметров для каждой линии проводится с помощью функции оптимизации `least_squares` с методом `trf` из `scipy.optimize`. В функции минимизируется разность $\sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2$, где x_i — значение частоты в точке i , y_i — значение интенсивности линии из наблюдений, n — суммарное количество точек данных около центра линии, $f(x_i)$ — функция Гаусса. В начале работы программы значения y_i и x_i загружаются из текстового файла со спектром.

На вход также подается начальное значение ширины линии ($FWHM$) и уровень шума (3σ). В сумме квадратичных отклонений набор частот на каждом из этапов отличается, так как после нахождения оптимальных параметров для профиля линии эта линия вычитается из спектра.

При оценке параметров линий используется адаптивный подход, а именно, учитывается ширина первой найденной линии для улучшения начального приближения для остальных линий. Ошибки получаемых параметров гауссиан вычисляются посредством якобиана функции оптимизации (J), который представляет собой матрицу частных производных:

$$J_{ij} = \frac{\partial f(x_i, \vec{p})}{\partial p_j}, \quad (2)$$

где \vec{p} — вектор параметров (A, μ, σ) на каждом i -ом шаге. Стандартные отклонения параметров (σ_i) вычисляются с помощью выражения:

$$\sigma_i = \sqrt{\text{diag} \left((J_{ij}^T J_{ij})^{-1} \frac{r_i^T r_i}{n-p} \right)}, \quad (3)$$

где n — количество точек данных наблюдений около центра линии. Значение n рассчитывается как целочисленное значение от результата деления ширины линии в ГГц на величину спектрального разрешения. Ширина линии задается на входе программы и переводится из км с^{-1} в ГГц. Величина p — количество параметров модели, r_i — разница между данными из наблюдений и приближением Гаусса для данного решения, `diag` означает извлечение диагональных элементов матрицы.

3.2. Отождествление молекул

Основным методом, который используется во второй части программного пакета, является алгоритм сопоставления частот, реализованный с учетом нескольких критерии. Первоначальный подбор молекул проводится по частоте, энергии верхнего уровня перехода (E_u) и логарифму коэффициента Эйнштейна спонтанного перехода ($\lg A_{ij}$). Мы начинали с уровней отбора с наименьшим значением E_u и наибольшим значением $\lg A_{ij}$, а затем переходили к другим значениям параметров, если линии отождествить не удавалось. Всего в программе реализуется четыре уровня отбора линий. Значения E_u и $\lg A_{ij}$ для каждого уровня отбора указаны в таблице 2. Сначала поиск молекул проводится в узком спектральном диапазоне ($\Delta\nu \pm 0.0005$) от центральной частоты линии и для низких энергий верхнего уровня ($E_u \leq 200$). Затем границы поиска расширяются, если на данном этапе не было подобрано ни одной молекулы для данной частоты. Если для одной и той же линии подобрано несколько молекул-кандидатов, среди

них выбирается кандидат с минимальным отклонением частоты от центральной, наименьшим значением E_u и наибольшим значением $\lg A_{ij}$. Подбор проводится с учетом системной скорости объекта и в соответствии со списком молекул, отождествленных в межзвездной среде³, а также с учетом изотопологов и изотопомеров этих молекул.

3.3. Оценки физических параметров в LTP-приближении

Для оценок температуры возбуждения (T_{ex}) и лучевой концентрации (N) молекул в LTP-приближении мы применяем метод вращательных диаграмм. В данном методе лучевая концентрация молекулы на верхнем уровне оптически тонкой линии (N_u) определяется как

$$N_u = \frac{8\pi k\nu^2 \int T_{\text{mb}} dV}{hc^3 A_{\text{ul}}} \text{ см}^{-2}, \quad (4)$$

где величина $\int T_{\text{mb}} dV$ — интегральная интенсивность линии, A_{ul} — коэффициент Эйнштейна спонтанного перехода с верхнего на нижний уровень, k — постоянная Больцмана, h — постоянная Планка, ν — частота линии в МГц, c — скорость света.

В предположении, что температура возбуждения всех уровней молекулы одинакова и равна некоторой температуре T_{ex} , из формулы Больцмана может быть получено следующее выражение:

$$\ln \left(\frac{N_u}{g_u} \right) = \ln \left(\frac{N}{Q(T_{\text{ex}})} \right) - \frac{E_u}{kT_{\text{ex}}} \quad (5)$$

где E_u — энергия верхнего уровня, g_u — статистический вес верхнего уровня, $Q(T_{\text{ex}})$ — статистическая сумма при температуре возбуждения T_{ex} , просуммированная по всем уровням. Из этого равенства следует, что

$$N = \frac{N_u}{g_u} Q_{\text{rot}} \exp \left(\frac{E_u}{kT_{\text{ex}}} \right) \text{ см}^{-2}. \quad (6)$$

Для определения лучевых концентраций статистическая сумма рассчитывается на основе интерполяции данных из спектроскопической базы с помощью степенного приближения:

$$Q_{\text{rot}} = aT^b. \quad (7)$$

Если в наблюдениях присутствует несколько линий излучения для определенной молекулы, отношение из выражения (4) рассчитывается для

³<https://cdms.astro.uni-koeln.de/classic/molecules>

каждой линии. В этом случае, исходя из равенства (5), линейной функцией $y = ax + b$ приближается зависимость $\ln \frac{N_u}{g_u}$ от E_u/k , наклон которой обратно пропорционален $-T_{\text{ex}}$, а точка пересечения графика с осью ординат равна $\ln \frac{N}{Q_{\text{rot}}}$.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

4.1. Приближения, полученные для профилей линий

В результате применения программы MOLLI^d к наблюдаемым спектрам (см. рис. 1) RCW 120 YSO S1 и RCW 120 YSO S2 были получены приближения каждой линии с интенсивностью 5–7 σ одной гауссианой. Найденные параметры линий для YSO S1 и YSO S2 представлены в таблицах 3 и 4 соответственно. На рис. 2 приведены примеры полученных приближений профилей для нескольких молекул. На этом рисунке видно, что метод работает с ограничениями: мы не приближаем крылья линий, которые могут быть протяженными для линий некоторых молекул. Но на отождествлении линий и определении центральной частоты и ширины линии это ограничение не сказывается. В таблицах с результатами приближения можно обнаружить, что ширины линий не совпадают. Особенно отчетливо это различие заметно при сравнении линий с низкими и высокими (больше 200 К) энергиями E_u . Мы обсуждаем выявленное расхождение в ширинах профилей линий и зависимость от энергии верхнего уровня в разделе 4.3.

4.2. Отождествленные молекулы

Все молекулы в областях RCW 120 YSO S2 и RCW 120 YSO S1, отождествленные с помощью программы MOLLI^d, представлены в таблице 5. На CPU Intel Core i7-12700K время отождествления на спектральный диапазон составило около шести минут для источника RCW 120 YSO S1 и примерно восемь минут для источника RCW 120 YSO S2. Количество линий, например, для спектрального диапазона B1 для YSO S1 составляет примерно пять линий на 1 ГГц, для YSO S2 — 16 линий на 1 ГГц.

Таблица 3. Параметры отождествленных линий в RCW 120 YSO S1. Диапазоны B1–B6. Код обозначает наличие молекулы: только в каталоге JPL (1), в обоих каталогах (2), только в каталоге CDMS (3). Линии, которые не были отождествлены, отмечены как Unmatched

Молекула	Переход	ν , МГц	E_u , К	$\int T_{\text{mb}} dV$, К км с $^{-1}$	ΔV , км с $^{-1}$	T_{mb} , мК	v_{LSR} , км с $^{-1}$	Каталог	Код
B1									
SO ₂	12 _{0,12} –11 _{1,11}	203 391.550	70.12	0.17±0.01	4.73±0.40	34±2	−6.2	JPL	2
³³ SO	5 _{4,6} –4 _{3,5}	203 939.255	38.30	0.24±0.02	5.06±0.55	44±2	−8.4	CDMS	3
CH ₃ CCH	12 ₃ –11 ₃	205 045.501	129.00	0.20±0.01	4.02±0.26	47±2	−6.6	JPL	2
CH ₃ CCH	12 ₂ –11 ₂	205 065.070	92.88	0.21±0.01	3.14±0.20	62±3	−6.6	JPL	2
CH ₃ CCH	12 ₁ –11 ₁	205 076.816	71.20	0.49±0.03	3.45±0.21	132±6	−6.9	JPL	2
CH ₃ CCH	12 ₀ –11 ₀	205 080.732	63.98	0.50±0.02	3.04±0.14	154±6	−6.7	JPL	2
SO ¹⁷ O	23 _{7,17} –24 _{6,18}	205 159.894	365.11	0.06±0.01	2.51±0.73	23±3	−9.2	CDMS	3
c-C ₃ H	12 _{3,9} –13 _{1,12}	205 171.607	209.65	0.11±0.01	3.24±0.31	31±2	−5.4	JPL	1
	<i>J</i> = 23/2–25/2, <i>F</i> = 11–12								
SO ₂	11 _{2,10} –11 _{1,11}	205 300.570	70.21	0.03±0.01	1.90±0.35	16±3	−6.7	JPL	2
CH ₃ OH	1 _{1,1} –2 _{0,2} + +	205 791.270	16.84	0.83±0.02	5.31±0.16	146±2	−6.3	JPL	2
H ₂ CS	6 _{0,6} –5 _{0,5}	205 987.858	34.61	0.59±0.01	4.23±0.11	132±2	−6.6	JPL	2
H ₂ CS	6 _{2,5} –5 _{2,4}	206 054.165	87.28	0.37±0.02	5.21±0.38	66±2	−5.0	JPL	2
H ₂ ¹³ CO	3 _{1,3} –2 _{1,2}	206 131.626	31.62	0.62±0.01	4.13±0.11	141±3	−6.7	JPL	2
H ₂ CS	6 _{2,4} –5 _{2,3}	206 158.602	87.29	0.11±0.01	3.92±0.40	27±2	−6.9	JPL	2
SO	5 ₄ –4 ₃	206 176.005	38.58	1.32±0.02	4.68±0.08	264±3	−6.4	JPL	2
OCS	17–16	206 745.161	89.30	0.53±0.02	5.14±0.22	97±2	−6.5	JPL	2
B2									
SO	5 ₅ –4 ₄	215 220.653	44.10	1.12±0.01	4.66±0.07	227±2	−6.4	JPL	2
³⁴ SO	5 ₆ –4 ₅	215 839.436	34.38	0.12±0.01	4.01±0.31	29±2	−7.0	JPL	2
DCO+	3–2	216 112.582	20.74	0.87±0.03	1.58±0.06	514±18	−6.5	JPL	2
c-C ₃ H ₂	3 _{3,0} –2 _{2,1}	216 278.756	19.47	0.19±0.01	2.58±0.15	69±3	−6.8	JPL	2
CH ₃ CHO	11 _{1,10} –10 _{1,9} E	216 581.930	64.87	0.12±0.01	4.33±0.62	27±2	−7.0	JPL	1
CH ₃ CHO	11 _{1,10} –10 _{1,9} A	216 630.234	64.81	0.09±0.01	2.99±0.20	29±2	−6.5	JPL	1
H ₂ S	11 _{5,6} –10 _{8,3}	216 710.437	83.98	0.08±0.01	3.83±0.51	19±2	−6.5	JPL	2
CH ₃ OH	5 _{−1,4} –4 _{−2,3} E	216 945.521	55.87	0.39±0.01	4.70±0.18	79±2	−6.5	JPL	2
SiO	5–4	217 104.980	31.26	2.86±0.03	6.61±0.10	407±2	−6.3	JPL	2
c-C ₃ H	7 _{3,4} –6 _{5,1}	217 235.992	84.16	0.29±0.05	2.47±0.54	110±10	−9.1	JPL	1
	<i>J</i> = 13/2–11/2, <i>F</i> = 6–6								
CH ₃ COOH	19 _{1,18} –18 _{2,17}	217 428.127	110.62	0.05±0.01	1.81±0.23	26±3	−7.3	CDMS	3
CH ₃ CHO	14 _{3,11} –14 _{2,12} A	217 469.279	117.70	0.13±0.02	3.72±0.74	33±3	−4.9	JPL	1
c-C ₃ H ₂	6 _{0,6} –5 _{1,5}	217 822.148	38.61	0.23±0.01	2.61±0.13	84±4	−6.9	JPL	2
H ₂ CO	3 _{0,3} –2 _{0,2}	218 222.192	20.96	10.89±0.19	4.75±0.10	2155±26	−6.7	JPL	2
c-C ₃ H	14 _{7,7} –14 _{7,8}	218 325.331	333.10	0.22±0.01	3.47±0.19	59±2	−5.8	JPL	1
	<i>J</i> = 29/2–29/2, <i>F</i> = 15–15								
CH ₃ OH	4 _{−2,3} –3 _{−1,2} E	218 440.063	45.46	3.85±0.07	4.32±0.09	838±10	−6.6	JPL	2
H ₂ CO	3 _{2,2} –2 _{2,1}	218 475.632	68.09	2.65±0.05	4.67±0.10	535±6	−6.6	JPL	2
H ₂ CO	3 _{2,1} –2 _{2,0}	218 760.066	68.11	2.78±0.05	4.78±0.10	547±7	−6.6	JPL	2
OCS	18–17	218 903.356	99.81	0.46±0.02	5.04±0.30	86±3	−6.3	JPL	2
B3									
CH ₃ CN	13 ₃ –12 _{−3}	239 096.497	144.63	0.25±0.04	5.75±1.14	40±3	−6.4	JPL	2
CH ₃ CN	13 ₂ –12 ₂	239 119.505	108.92	0.11±0.02	4.51±0.98	22±2	−6.3	JPL	2
CH ₃ CN	13 ₁ –12 ₁	239 133.313	87.49	0.21±0.03	5.74±0.83	35±2	−6.8	JPL	2
CH ₃ CCH	14 ₅ –13 ₅	239 138.245	266.68	0.17±0.02	4.11±0.44	40±2	−6.1	JPL	2

(Продолжение)

Молекула	Переход	ν , МГц	E_u , К	$\int T_{\text{mb}} dV$, К км с $^{-1}$	ΔV , км с $^{-1}$	T_{mb} , мК	v_{LSR} , км с $^{-1}$	Каталог	Код
CH ₃ CCH	14 ₃ –13 ₃	239 211.215	151.14	0.10±0.01	3.04±0.26	30±2	-6.9	JPL	2
CH ₃ CCH	14 ₂ –13 ₂	239 234.034	115.02	0.14±0.01	3.28±0.14	40±1	-6.8	JPL	2
CH ₃ CCH	14 ₁ –13 ₁	239 247.728	93.35	0.27±0.01	3.34±0.17	75±3	-6.9	JPL	2
CH ₃ CCH	14 ₀ –13 ₀	239 252.294	86.12	0.28±0.01	2.92±0.11	89±3	-6.7	JPL	2
CH ₃ OH	5 _{1,5} –4 _{1,4} A	239 746.219	49.06	1.72±0.04	4.61±0.12	350±4	-6.5	JPL	2
H ₂ CCO	12 _{1,12} –11 _{1,11}	240 185.794	87.99	0.08±0.01	3.48±0.33	22±1	-6.9	JPL	2
H ₂ CS	7 _{0,7} –6 _{0,6}	240 266.872	46.14	0.32±0.01	3.57±0.10	84±2	-6.7	JPL	2
H ₂ CS	7 _{3,4} –6 _{3,3}	240 393.037	164.60	0.15±0.01	4.48±0.41	32±2	-6.7	JPL	2

B4

C ³⁴ S	5–4	241 016.194	34.70	0.53±0.01	3.85±0.10	129±2	-6.5	JPL	2
SO ₂	5 _{2,4} –4 _{1,3}	241 615.798	23.59	0.20±0.01	4.40±0.26	44±1	-6.5	JPL	2
CH ₃ OH	5 _{0,5} –4 _{0,4} E	241 700.159	47.93	3.85±0.07	4.70±0.10	770±7	-6.6	JPL	2
CH ₃ CHO	33 _{4,29} –33 _{3,30} A	241 734.477	763.36	0.03±0.01	2.63±1.08	12±2	-8.9	JPL	1
CH ₃ OH	5 _{1,5} –4 _{1,4}	241 767.234	40.39	13.74±0.25	5.08±0.11	2540±24	-6.6	JPL	2
HN ¹³ CO	11 _{0,11} –10 _{0,10} , <i>F</i> =12–11	241 780.789	69.62	0.46±0.11	7.12±1.95	61±4	-8.9	JPL	1
CH ₃ OH	5 _{0,5} –4 _{0,4} A	241 791.352	34.82	16.58±0.30	5.01±0.10	3110±27	-6.6	JPL	2
CH ₃ OH	5 _{4,1} –4 _{4,0} A	241 806.525	115.16	0.09±0.02	4.46±0.89	19±1	-5.3	JPL	2
CH ₃ OH	5 _{3,2} –4 _{3,1} A	241 833.106	84.62	0.38±0.02	4.69±0.22	76±2	-6.0	JPL	2
CH ₃ OH	5 _{2,4} –4 _{2,3} A	241 842.284	72.53	0.30±0.01	4.89±0.21	58±1	-6.7	JPL	2
CH ₃ OH	5 _{1,4} –4 _{–1,3} E	241 879.025	55.87	1.52±0.03	4.54±0.09	315±3	-6.6	JPL	2
CH ₃ OH	5 _{2,3} –4 _{2,2} A	241 887.674	72.53	0.25±0.01	4.83±0.27	48±1	-6.1	JPL	2
CH ₃ OH	5 _{–2,4} –4 _{–2,3} E	241 904.147	60.73	2.69±0.06	4.83±0.12	523±7	-7.0	JPL	2
HCO	10 _{0,10} –9 _{1,9} , <i>J</i> =19/2–17/2, <i>F</i> =10–9	242 117.059	228.66	0.04±0.00	2.45±0.25	17±1	-7.8	JPL	1
Unmatched	N/A	242 305.247	0.00	1.18±0.35	35.12±9.50	32±2	0.0	0	0
CH ₂ DCN	14–13	242 915.951	351.52	0.04±0.01	2.10±0.49	17±2	-5.1	JPL	2
OCS	20–19	243 218.040	122.57	0.29±0.01	4.68±0.22	57±1	-6.5	JPL	2
CH ₃ OH	5 _{1,4} –4 _{1,3} A	243 915.788	49.66	2.54±0.05	4.81±0.12	497±5	-6.6	JPL	2
H ₂ CS	7 _{1,6} –6 _{1,5}	244 048.504	60.03	0.62±0.01	4.01±0.09	144±2	-6.6	JPL	2
c-C ₃ H ₂	3 _{2,1} –2 _{1,2}	244 222.133	18.17	0.09±0.00	2.65±0.11	34±1	-6.8	JPL	2
SO ₂	14 _{0,14} –13 _{1,13}	244 254.218	93.90	0.13±0.03	6.72±1.61	18±1	-7.0	JPL	2
H ₂ CCO	12 _{1,11} –11 _{1,10}	244 712.269	89.40	0.12±0.01	4.12±0.40	27±2	-6.7	JPL	2

B5

NS	6–5	253 968.393	39.93	0.23±0.03	6.73±1.03	32±1	-6.9	JPL	2
CH ₃ OH	2 _{–0,2} –1 _{1,1} E	254 015.377	20.09	3.19±0.06	5.70±0.13	525±4	-5.2	JPL	2
H ₂ CNH	4–3	254 685.137	30.62	0.30±0.01	4.13±0.20	69±1	-5.4	CDMS	3
³³ SO ₂	32–31	254 700.733	530.30	0.05±0.01	3.48±0.84	13±1	-5.2	JPL	2
OCS	21–20	255 374.461	134.83	0.22±0.02	4.58±0.43	46±2	-5.2	JPL	2
HC ¹⁸ O ⁺	3–2	255 479.432	24.52	0.30±0.01	3.67±0.16	78±1	-5.2	JPL	2
CH ₃ CCH	15 ₈ –14 ₈	256 024.303	560.29	0.25±0.01	4.70±0.30	50±1	-8.8	JPL	2
CH ₃ O ¹³ CHO	21 ₁₄ –21 ₁₃	256 210.315	263.95	0.36±0.03	5.08±0.52	66±2	-5.2	CDMS	3
SO ¹⁷ O	15–14	256 230.876	194.33	0.37±0.02	4.80±0.30	72±1	-8.4	CDMS	3
CH ₃ OCHO	50 _{9,41} –49 _{11,38} A	256 299.660	473.26	0.14±0.01	4.89±0.48	28±1	-6.4	JPL	1
CH ₃ CCH	15 ₂ –14 ₂	256 317.071	127.32	0.09±0.01	3.04±0.29	28±1	-5.7	JPL	2
CH ₃ CCH	15 ₁ –14 ₁	256 331.739	105.65	0.38±0.08	7.28±1.72	49±3	-5.2	JPL	2
CH ₃ CCH	15 ₀ –14 ₀	256 336.629	98.42	0.26±0.01	3.85±0.16	64±1	-5.3	JPL	2
CH ₃ O ¹³ CHO	21 ₁₂ –21 ₁₁	256 565.363	229.87	0.12±0.01	4.11±0.33	27±1	-6.5	CDMS	3

(Продолжение)

Молекула	Переход	ν , МГц	E_u , К	$\int T_{\text{mb}} dV$, К км с $^{-1}$	ΔV , км с $^{-1}$	T_{mb} , мК	v_{LSR} , км с $^{-1}$	Каталог	Код
HDCO	4–3	256 585.538	30.85	0.30±0.02	3.73±0.25	77±2	−5.2	JPL	2
^{34}SO	6 $_7$ –5 $_6$	256 877.456	46.71	0.06±0.01	3.06±0.33	17±1	−6.1	JPL	2
B6									
CH ₃ CN	14 ₃ –13 ₃	257 482.791	156.99	0.12±0.02	4.98±0.84	24±2	−6.2	JPL	2
CH ₃ CN	14 ₂ –13 ₂	257 507.561	121.28	0.08±0.01	3.64±0.40	21±1	−6.8	JPL	2
CH ₃ CN	14 ₁ –13 ₁	257 522.427	99.85	0.26±0.05	8.40±2.01	29±1	−7.1	JPL	2
CH ₃ CN	14 ₀ –13 ₀	257 527.383	92.70	0.17±0.01	4.79±0.45	33±1	−6.4	JPL	2
HC ¹³ N	3–2	258 156.996	24.78	0.16±0.01	4.02±0.19	38±1	−6.6	JPL	2
SO	6 ₆ –5 ₅	258 255.813	56.50	0.84±0.02	4.72±0.11	166±2	−6.4	JPL	2
c-HCOOH	9–8	258 551.581	61.90	0.04±0.01	2.14±0.74	16±2	−5.3	CDMS	3
H ¹³ CN	3–2	259 011.798	24.86	1.30±0.02	4.09±0.08	299±3	−6.6	JPL	2
CH ₃ C ₃ N	63–62	260 189.411	399.66	0.09±0.05	6.15±3.45	14±2	−8.7	CDMS	3
H ¹³ CO+	3–2	260 255.339	24.98	2.42±0.06	2.48±0.06	915±17	−6.8	JPL	2
SiO	6–5	260 518.020	43.76	1.50±0.04	6.39±0.19	221±2	−6.3	JPL	2
CH ₃ CHO	14 _{1,14} –13 _{1,13} E	260 530.403	96.39	0.16±0.04	6.82±1.90	22±1	−5.5	JPL	1

Таблица 4. Параметры отождествленных линий в RCW 120 YSO S2. Диапазоны B1–B6. Код обозначает наличие молекулы: только в каталоге JPL (1), в обоих каталогах (2), только в каталоге CDMS (3). Линии, которые не были отождествлены, отмечены как Unmatched

Молекула	Переход	ν , МГц	E_u , К	$\int T_{\text{mb}} dV$, К км с $^{-1}$	ΔV , км с $^{-1}$	T_{mb} , мК	v_{LSR} , км с $^{-1}$	Каталог	Код
B1									
CH ₃ CN, v8=1	11 _{–1,3} –10 _{1,3}	203 161.011	577.51	0.16±0.02	5.45±1.08	28±2	−5.5	JPL	2
CH ₃ CHO	27 _{2,25} –27 _{2,26} E, $vt = 1$	203 241.771	570.50	0.05±0.01	2.39±0.46	18±3	−7.4	JPL	1
CH ₃ OCH ₃	3–2	203 374.155	18.12	0.06±0.01	2.66±0.37	21±3	−6.9	JPL	2
CH ₃ COOH	31 _{31,0} –31 _{30,1} E	203 383.931	534.83	0.32±0.03	6.37±0.86	47±3	−6.9	CDMS	3
SO ₂	12 _{0,12} –11 _{1,11}	203 391.550	70.12	0.78±0.02	4.73±0.16	155±3	−6.4	JPL	2
CH ₃ OCH ₃	3–2	203 410.100	18.12	0.20±0.02	5.11±0.56	37±2	−6.9	JPL	2
CH ₃ OCH ₃	3–2	203 418.718	18.12	0.18±0.02	4.58±0.53	37±3	−6.9	JPL	2
CH ₃ OCHO	17–16	203 853.774	95.56	0.10±0.01	3.87±0.47	24±2	−6.6	JPL	1
CH ₃ OCHO	17–16	203 864.211	95.55	0.10±0.01	3.77±0.59	25±3	−6.1	JPL	1
³³ SO	5 _{4,6} –4 _{3,5}	203 939.255	38.30	0.65±0.02	3.64±0.11	167±3	−7.8	CDMS	3
CH ₃ OCH ₃	9–8	204 157.879	63.46	0.17±0.02	7.07±1.41	23±2	−7.4	JPL	2
SO ₂	18 _{3,15} –18 _{2,16}	204 246.760	180.56	0.13±0.02	5.17±0.83	23±2	−6.7	JPL	2
H ₂ CS-33	6–5	204 343.749	87.01	0.08±0.01	4.86±1.10	16±2	−5.7	CDMS	3
CH ₃ OCH ₃	8–7	204 552.037	55.27	0.26±0.03	5.94±0.92	41±3	−6.8	JPL	2
c-C ₃ H ₂	4 _{2,2} –3 _{3,1}	204 788.926	28.82	0.06±0.01	2.38±0.47	23±4	−6.6	JPL	2
HNSO	25–24	204 805.452	317.04	0.11±0.02	4.16±0.80	25±3	−7.3	CDMS	3
CH ₃ CCH	12 ₆ –11 ₆	204 939.931	323.94	0.14±0.04	6.83±2.89	19±2	−8.5	JPL	2
CH ₃ OCH ₃	6–5	204 960.955	41.61	0.16±0.03	5.43±1.15	27±3	−6.6	JPL	2
CH ₃ CCH	12 ₄ –11 ₄	205 018.080	179.17	0.21±0.01	3.47±0.24	57±3	−6.3	JPL	2
CH ₃ CCH	12 ₃ –11 ₃	205 045.401	128.78	0.87±0.02	3.24±0.08	252±5	−6.7	JPL	2
CH ₃ CCH	12 ₂ –11 ₂	205 065.015	92.78	1.07±0.02	3.19±0.07	315±6	−6.7	JPL	2
CH ₃ CCH	12 ₁ –11 ₁	205 076.775	71.18	1.95±0.05	3.19±0.10	573±14	−6.7	JPL	2
CH ₃ CCH	12 ₀ –11 ₀	205 080.660	63.98	2.18±0.05	3.00±0.07	682±14	−6.7	JPL	2
CH ₃ OCH ₃	4–3	205 094.583	31.60	0.07±0.01	3.88±0.77	18±3	−7.1	JPL	2
SO ¹⁷ O	23–22	205 159.894	365.11	0.34±0.04	3.50±0.55	91±9	−8.5	CDMS	3

(Продолжение)

Молекула	Переход	ν , МГц	E_u , К	$\int T_{\text{mb}} dV$, К км с ⁻¹	ΔV , км с ⁻¹	T_{mb} , мК	v_{LSR} , км с ⁻¹	Каталог	Код
c-C ₃ H	12 _{3,9} –13 _{1,12} $J = 23/2$ –25/2, $F = 11$ –12	205 171.607	209.65	0.58±0.04	3.05±0.27	179±10	-5.5	JPL	1
SO ₂	11 _{2,10} –11 _{1,11}	205 300.570	70.21	0.28±0.03	5.77±0.73	46±3	-6.5	JPL	2
CH ₃ COOH	24 _{14,10} –23 _{17,6} E	205 459.219	270.17	0.17±0.01	3.61±0.35	45±3	-5.5	CDMS	3
CH ₃ OCHO	18–17	205 495.754	98.97	0.15±0.03	6.62±1.66	21±2	-6.3	JPL	1
CH ₃ OCHO	18–17	205 501.702	98.95	0.21±0.06	8.71±3.43	23±2	-5.6	JPL	1
H ₂ C ³⁴ S	6–5	205 583.082	47.72	0.22±0.03	5.88±0.93	36±2	-6.5	JPL	2
CH ₃ OCHO	18–19	205 669.412	98.94	0.11±0.02	5.21±1.14	20±2	-6.4	JPL	1
CH ₃ OCH ₃	16–15	205 705.221	146.48	0.18±0.04	6.65±1.85	25±2	-8.5	JPL	2
CH ₃ OCH ₃	16–15	205 708.009	146.48	0.19±0.02	6.40±0.93	27±1	-5.6	JPL	2
CH ₃ OH	1 _{1,1} –2 _{0,2} ++	205 791.270	16.84	2.32±0.03	4.25±0.06	513±4	-6.3	JPL	2
H ₂ CS	6 _{5,2} –5 _{5,1}	205 943.205	363.17	0.08±0.01	4.21±0.75	17±2	-7.1	JPL	2
H ₂ CS	6 _{0,6} –5 _{0,5}	205 987.391	34.61	2.34±0.04	3.42±0.07	642±10	-7.0	JPL	2
CH ₃ OH	12 _{–5,7} –13 _{–4,9} E	206 001.302	317.06	0.37±0.04	7.31±1.20	48±2	-6.8	JPL	2
H ₂ CS	6 _{4,2} –5 _{4,1}	206 001.880	244.52	0.35±0.04	6.77±1.05	49±3	-5.8	JPL	2
H ₂ CS	6 _{3,3} –5 _{3,2}	206 052.602	153.06	1.81±0.02	5.62±0.10	303±3	-7.1	JPL	2
CH ₃ CHO	21 _{1,20} –21 _{0,21} A, $vt = 1$	206 098.405	424.89	0.05±0.01	2.41±0.61	19±3	-8.5	JPL	1
H ₂ ¹³ CO	3 _{1,3} –2 _{1,2}	206 131.626	31.62	1.78±0.03	3.53±0.06	473±6	-6.5	JPL	2
H ₂ CS	6 _{2,4} –5 _{2,3}	206 158.016	87.33	0.69±0.02	4.10±0.15	158±4	-7.1	JPL	2
CH ₃ CHO	26 _{2,24} –25 _{3,23} A	206 160.117	718.61	0.50±0.08	4.12±0.91	113±12	-5.5	JPL	1
¹³ CH ₃ OH	19–20	206 170.671	451.36	1.02±0.12	6.09±1.01	158±9	-8.5	CDMS	3
SO	5 ₄ –4 ₃	206 176.005	38.58	4.88±0.08	4.07±0.08	1126±15	-6.5	JPL	2
CH ₃ OCHO	26 ₂₀ –26 ₁₉	206 181.313	472.11	0.37±0.06	5.27±1.13	65±6	-5.5	JPL	1
¹³ CH ₃ OCH ₃	22–21	206 219.681	237.27	0.15±0.02	5.45±0.75	26±2	-6.4	CDMS	3
CH ₃ OCHO	16–15	206 247.919	92.59	0.09±0.01	3.81±0.57	22±2	-6.6	JPL	1
CH ₃ OCHO	16–15	206 270.469	92.58	0.18±0.03	5.64±1.20	30±3	-6.2	JPL	1
CH ₃ OCHO	19–18	206 365.385	101.07	0.27±0.03	5.49±0.90	47±3	-8.5	JPL	1
HSCN	18–17	206 369.966	216.65	0.50±0.06	7.72±1.28	61±2	-5.7	CDMS	3
C ₂ H ₅ CN	11–10	206 404.810	840.62	0.07±0.01	3.61±0.81	17±3	-6.2	JPL	2
CH ₃ COOH	16 _{12,4} –16 _{9,8} E	206 436.769	128.94	0.07±0.02	3.95±1.58	16±4	-5.5	CDMS	3
CH ₃ OCHO	16–15	206 601.165	89.25	0.27±0.05	6.99±1.80	37±3	-5.5	JPL	1
CH ₃ OCHO	16–15	206 619.476	89.24	0.12±0.02	4.62±0.76	24±2	-6.2	JPL	1
SO ¹⁸ O	34–33	206 712.959	710.73	0.08±0.02	4.68±1.71	17±3	-5.5	JPL	2
SO ¹⁸ O	34–33	206 719.744	710.73	0.14±0.02	5.58±0.90	24±2	-6.5	JPL	2
OCS	17–16	206 745.161	89.30	1.63±0.03	4.05±0.09	378±6	-6.4	JPL	2

B2

SO	5 ₅ –4 ₄	215 220.653	44.10	4.84±0.08	4.12±0.08	1104±14	-6.5	JPL	2
CH ₃ OH	6 _{1,6} –7 _{2,6} A	215 302.206	373.83	0.22±0.02	5.55±0.65	37±2	-7.0	JPL	2
HCOOH	10–9	215 407.945	60.17	0.11±0.02	4.88±1.07	20±3	-6.5	JPL	1
H ₂ CNCN	18–17	215 425.370	86.68	0.11±0.07	7.53±6.03	13±5	-9.8	CDMS	3
CH ₃ OH	14 _{–0,14} –13 _{3,11} E	215 564.188	543.57	0.02±0.01	1.03±0.55	18±5	-9.3	JPL	2
CH ₃ OCH ₃	43–42	215 619.605	918.94	0.14±0.02	6.09±1.28	21±2	-7.0	JPL	2
³⁴ SO	5 ₆ –4 ₅	215 839.436	34.38	0.58±0.02	3.96±0.15	137±4	-7.1	JPL	2
¹³ CH ₃ OH	4–3	215 886.963	45.01	0.30±0.02	5.73±0.49	48±2	-6.5	CDMS	3
Unmatched	N/A	216 081.746	0.00	0.04±0.04	7.30±10.13	5±3	0.0	0	0
DCO+	3–2	216 112.582	20.74	0.99±0.04	2.59±0.10	358±12	-7.0	JPL	2
CH ₂ DCHO	12–11	216 210.665	123.05	0.20±0.01	4.90±0.44	38±2	-6.5	CDMS	3
CH ₃ OCHO	19–20	216 216.539	109.32	0.27±0.16	12.07±9.91	21±2	-6.0	JPL	1

(Продолжение)

Молекула	Переход	ν , МГц	E_u , К	$\int T_{\text{mb}} dV$, К км с $^{-1}$	ΔV , км с $^{-1}$	T_{mb} , мК	v_{LSR} , км с $^{-1}$	Каталог	Код
c-C ₃ H ₂	3 _{3,0} –2 _{2,1}	216 278.756	19.47	0.49±0.01	2.80±0.07	164±4	-6.6	JPL	2
CCD	3–2	216 372.837	20.77	0.39±0.01	2.92±0.10	125±3	-7.1	CDMS	3
CCD	3–2	216 428.253	20.78	0.24±0.01	2.82±0.13	78±3	-7.2	CDMS	3
H ₂ CO	9 _{1,8} –9 _{1,9}	216 568.651	173.99	0.25±0.12	10.07±6.20	24±4	-4.2	JPL	2
CH ₃ CHO	11 _{1,10} –10 _{1,9} E	216 581.930	64.87	0.41±0.01	3.40±0.09	113±2	-6.3	JPL	1
CH ₃ CHO	11 _{1,10} –10 _{1,9} A	216 630.234	64.81	0.38±0.01	3.45±0.14	103±3	-6.3	JPL	1
c-C ₃ H	4 _{1,3} –3 _{1,2}	216 641.130	25.29	0.10±0.03	6.53±2.60	14±2	-6.5	JPL	1
c-C ₃ H	$J = 7/2$ –5/2, $F = 3$ –3	216 660.258	25.29	0.20±0.03	3.85±0.82	48±5	-9.8	JPL	1
H ₂ S	11 _{5,6} –10 _{8,3}	216 710.437	83.98	1.38±0.02	4.33±0.08	299±3	-6.5	JPL	2
CH ₃ OCHO	18–17	216 830.197	105.68	0.15±0.04	6.32±2.10	22±3	-6.5	JPL	1
c-C ₃ H	7 _{3,4} –6 _{5,1}	216 840.544	84.16	0.09±0.06	5.19±3.91	17±7	-4.2	JPL	1
CH ₃ OH	5 _{-1,4} –4 _{-2,3} E	216 945.521	55.87	1.48±0.03	4.01±0.08	348±5	-6.5	JPL	2
CH ₃ OCHO	20–19	216 967.420	111.48	0.56±0.05	7.47±0.82	70±3	-4.2	JPL	1
¹³ CH ₃ OH	14–15	217 044.616	254.25	0.12±0.03	5.99±1.62	19±3	-9.8	CDMS	3
HCCS	18–17	217 093.448	100.54	0.53±0.09	8.42±1.95	59±5	-9.8	CDMS	3
SiO	5–4	217 104.980	31.26	6.03±0.10	5.97±0.13	949±8	-6.2	JPL	2
CH ₃ OCHO	28–27	217 111.831	460.33	0.92±0.13	7.66±1.34	113±8	-4.2	JPL	1
c-C ₃ H	7 _{3,4} –6 _{5,1}	217 235.992	84.16	2.01±0.22	3.82±0.50	495±38	-9.8	JPL	1
$J = 13/2$ –11/2, $F = 6$ –6									
HDCS	7–6	217 263.689	77.62	0.10±0.02	4.12±0.71	23±3	-7.1	CDMS	3
SO ¹⁸ O	12–11	217 279.061	106.13	0.06±0.04	3.01±2.56	18±8	-4.2	JPL	2
CH ₃ OH	6 _{1,5} –7 _{2,5} A	217 299.205	373.93	0.75±0.23	10.65±4.27	66±7	-9.8	JPL	2
HC ¹³ CN	24–23	217 398.568	130.43	0.09±0.02	4.74±0.99	18±2	-7.0	JPL	2
CH ₃ COOH	19 _{1,18} –18 _{2,17}	217 428.127	110.62	0.19±0.01	2.36±0.17	75±5	-7.3	CDMS	3
CH ₂ DCHO	9–8	217 434.943	79.98	0.14±0.02	3.11±0.51	42±3	-9.2	CDMS	3
HSCN	19–18	217 440.036	969.10	0.00±0.00	0.35±0.32	9±6	-5.2	CDMS	3
CH ₃ CHO	14 _{3,11} –14 _{2,12} A	217 469.279	117.70	0.65±0.11	4.42±0.88	139±15	-4.2	JPL	1
CHD ₂ OH	24–23	217 803.369	854.92	0.12±0.01	3.90±0.39	28±2	-6.8	CDMS	3
c-C ₃ H ₂	6 _{0,6} –5 _{1,5}	217 822.148	38.61	0.80±0.02	2.89±0.08	259±6	-6.6	JPL	2
CH ₃ OH	20 _{-1,19} –19 _{-0,20} E	217 886.504	508.38	0.26±0.03	7.74±1.29	31±1	-7.2	JPL	2
c-C ₃ H	14 _{7,7} –14 _{7,8}	217 943.137	333.09	0.08±0.02	2.40±0.88	32±5	-4.4	JPL	1
$J = 27/2$ –27/2, $F = 13$ –13									
c-C ₃ H ₂	5 _{2,4} –4 _{1,3}	218 160.442	35.42	0.16±0.02	3.84±0.42	39±3	-6.5	JPL	2
H ₂ CO	3 _{0,3} –2 _{0,2}	218 222.192	20.96	21.11±0.10	4.28±0.02	4634±16	-6.3	JPL	2
CH ₃ OCHO	17–16	218 280.900	99.73	0.11±0.01	3.87±0.41	28±2	-7.0	JPL	1
CH ₃ OCHO	17–16	218 297.890	99.72	0.10±0.01	4.42±0.75	22±2	-6.6	JPL	1
c-C ₃ H	14 _{7,7} –14 _{7,8}	218 325.331	333.10	1.83±0.05	4.64±0.16	372±6	-5.7	JPL	1
$J = 29/2$ –29/2, $F = 15$ –15									
Unmatched	N/A	218 438.535	0.00	11.00±0.27	3.94±0.12	2621±39	0.0	0	0
CH ₃ OH	4 _{-2,3} –3 _{-1,2}	218 440.063	45.46	10.33±0.12	3.64±0.05	2665±24	-6.4	JPL	2
CH ₃ OCHO	47–46	218 458.125	738.70	0.10±0.02	4.45±1.34	22±3	-9.1	JPL	1
H ₂ CO	3 _{2,2} –2 _{2,1}	218 475.632	68.09	6.63±0.05	3.87±0.03	1608±9	-6.4	JPL	2

(Продолжение)

Молекула	Переход	ν , МГц	E_u , К	$\int T_{\text{mb}} dV$, К км с $^{-1}$	ΔV , км с $^{-1}$	T_{mb} , мК	v_{LSR} , км с $^{-1}$	Каталог	Код
CH ₃ OCHO	18 ₁₆ –18 ₁₅	218 654.665	459.64	0.09±0.01	4.31±0.74	20±2	–6.4	JPL	1
H ₂ CO	3 _{2,1} –2 _{2,0}	218 760.066	68.11	6.68±0.05	3.91±0.03	1608±10	–6.4	JPL	2
OCS	18–17	218 903.356	99.81	1.66±0.02	4.18±0.07	374±4	–6.4	JPL	2
HNCO	10–9	218 981.170	101.08	0.24±0.07	8.38±3.41	27±2	–6.1	JPL	2
CH ₃ OCHO	28–27	219 078.529	433.59	0.05±0.01	2.01±0.33	25±3	–5.5	JPL	1
B3									
CH ₃ OH	14 _{1,13} –13 _{2,12} A	236 936.089	260.20	0.20±0.03	5.62±0.88	33±2	–6.8	JPL	2
CH ₃ OCH ₃	7–6	237 048.853	31.26	0.22±0.05	6.85±1.74	30±2	–7.0	JPL	2
SO ₂	12 _{3,9} –11 _{2,10}	237 068.870	93.96	0.17±0.02	5.12±0.67	31±2	–6.5	JPL	2
HSO	6–5	237 110.599	93.82	0.80±0.34	6.02±3.87	125±89	–12.0	CDMS	3
CH ₃ OH	22 _{–1,21} –22 _{–0,22} E	237 129.402	608.08	0.46±0.20	16.71±4.06	26±8	–12.0	JPL	2
CH ₃ CHO	34 _{3,32} –33 _{4,29} E	237 157.205	570.00	1.01±0.83	18.15±9.04	52±4	–12.1	JPL	1
OC ³⁴ S	20–19	237 273.635	119.58	0.09±0.01	3.55±0.57	24±3	–6.6	CDMS	3
HSO	6–5	237 306.495	93.84	0.19±0.05	5.76±1.73	31±3	–7.1	CDMS	3
CH ₃ OCHO	21–20	237 344.870	131.61	0.30±0.15	12.55±3.00	23±2	–8.6	JPL	1
CH ₃ OH	7 _{–1,6} –6 _{2,4} E	237 429.483	86.05	0.29±0.10	15.04±3.07	18±2	–12.0	JPL	2
H ₂ CO	19 _{3,16} –20 _{1,19}	237 482.325	773.26	0.15±0.02	5.51±1.03	25±2	–7.1	JPL	2
CH ₃ OCH ₃	9–8	237 620.902	46.46	0.31±0.03	5.00±0.47	59±3	–6.4	JPL	2
C ₂ H ₃ CN	27–26	237 746.819	741.36	0.41±0.03	4.44±0.33	86±3	–4.5	JPL	2
CHD ₂ OH	20–19	237 852.011	631.14	0.13±0.03	5.56±1.39	21±2	–6.5	CDMS	3
C ₄ H	25 _{25,24} –24 _{24,23}	237 898.009	148.45	0.12±0.02	4.51±0.68	26±2	–6.2	JPL	2
¹³ CH ₃ OH	5–4	237 983.380	48.82	0.23±0.05	6.46±1.57	33±2	–6.0	CDMS	3
CH ₃ OCH ₃	27–26	238 015.230	354.97	0.14±0.07	8.34±5.38	16±2	–7.6	JPL	2
H ₂ C ³³ S	7–6	238 156.719	45.73	0.44±0.02	5.56±0.37	74±2	–6.3	CDMS	3
CH ₃ CCH	14 ₁₁ –13 ₁₁	238 701.997	958.40	0.10±0.02	4.52±0.89	21±2	–5.4	JPL	2
CH ₃ CN	13 ₇ –12 ₇	238 912.715	430.10	0.11±0.02	4.72±1.02	21±2	–6.6	JPL	2
CH ₃ CN	13 ₆ –12 ₆	238 972.389	337.37	0.27±0.02	5.96±0.51	42±1	–6.4	JPL	2
c-H ¹³ CCCH	16 ₁₀ –16 ₀₉	238 989.101	390.11	0.08±0.01	3.21±0.38	24±2	–7.1	JPL	1
CH ₃ CN	13 ₅ –12 ₅	239 022.924	258.87	0.57±0.14	9.33±2.82	57±4	–4.8	JPL	2
CH ₃ CN	13 ₄ –12 ₄	239 064.299	194.62	0.48±0.04	5.64±0.59	80±3	–6.5	JPL	2
CH ₃ CN	13 ₃ –12 ₃	239 096.497	144.63	1.23±0.06	5.58±0.30	206±4	–6.7	JPL	2
CH ₃ CN	13 ₂ –12 ₂	239 119.504	108.92	1.06±0.03	5.28±0.19	188±3	–6.5	JPL	2
CH ₃ CN	13 ₁ –12 ₁	239 133.313	87.49	1.65±0.11	6.66±0.55	232±6	–6.8	JPL	2
CH ₃ CN	13 ₀ –12 ₀	239 137.916	80.34	1.36±0.03	4.87±0.12	263±3	–6.4	JPL	2
CH ₃ CCH	14 ₄ –13 ₄	239 179.248	201.31	0.15±0.01	4.04±0.37	35±2	–6.4	JPL	2
CH ₃ CCH	14 ₃ –13 ₃	239 211.215	151.14	0.74±0.02	3.48±0.09	200±3	–6.5	JPL	2
CH ₃ CCH	14 ₂ –13 ₂	239 234.011	114.92	0.82±0.02	3.33±0.08	232±4	–6.5	JPL	2
CH ₃ CCH	14 ₁ –13 ₁	239 247.727	93.32	1.45±0.04	3.51±0.11	389±8	–6.6	JPL	2
CH ₃ CCH	14 ₀ –13 ₀	239 252.294	86.12	1.59±0.03	3.29±0.07	454±7	–6.6	JPL	2
SO ¹⁸ O	20–19	239 679.605	204.15	0.08±0.03	3.80±1.35	21±3	–9.2	JPL	2
CH ₃ OH	5 _{1,5} –4 _{1,4} A	239 746.219	49.06	6.27±0.07	3.97±0.05	1483±10	–6.4	JPL	2
H ₂ C ³⁴ S	7–6	239 829.036	59.23	0.20±0.02	4.23±0.46	45±3	–6.2	JPL	2
CH ₃ OCHO	19–18	240 021.140	122.26	0.24±0.10	10.00±5.13	23±2	–7.2	JPL	1
c-C ₃ H	$J = 10_{5,6}^{5,6}–10_{3,7}^{3,7}$, $F = 21/2–19/2$, $F = 11–10$	240 087.326	165.75	0.17±0.10	10.53±4.16	15±6	–9.7	JPL 1	
H ₂ CCO	12 _{1,12} –11 _{1,11}	240 185.794	87.99	0.54±0.01	3.90±0.08	131±2	–6.5	JPL	2
CH ₃ OH	5 _{–3,3} –6 _{–2,5} E	240 241.490	82.53	0.42±0.02	5.49±0.35	71±2	–6.3	JPL	2
H ₂ CS	7 _{5,2} –6 _{5,1}	240 261.987	374.70	1.17±0.76	9.61±5.06	115±70	–12.0	JPL	2

(Продолжение)

Молекула	Переход	ν , МГц	E_u , К	$\int T_{\text{mb}} dV$, К км с $^{-1}$	ΔV , км с $^{-1}$	T_{mb} , мК	v_{LSR} , км с $^{-1}$	Каталог	Код
H ₂ CS	7 _{0,7} –6 _{0,6}	240 266.320	46.14	2.05±0.04	3.63±0.07	530±7	-7.0	JPL	2
HSCN	21–20	240 317.663	991.62	0.27±0.10	11.44±1.38	22±2	-8.2	CDMS	3
H ₂ CS	7 _{4,4} –6 _{4,3}	240 332.190	256.59	0.16±0.02	4.28±0.64	34±3	-6.8	JPL	2
H ₂ CS	7 _{2,6} –6 _{2,5}	240 381.750	98.85	0.68±0.02	4.28±0.13	150±3	-6.7	JPL	2
H ₂ CS	7 _{3,5} –6 _{3,4}	240 393.032	164.52	1.20±0.02	4.73±0.08	238±2	-6.8	JPL	2
H ₂ CS	7 _{2,5} –6 _{2,4}	240 548.229	98.87	0.65±0.02	4.03±0.12	152±3	-7.3	JPL	2
CH ₃ OH	26 _{3,23} –26 _{2,24} A	240 738.926	863.98	0.25±0.16	16.62±5.10	14±2	-12.0	CDMS	3
B4									
HNCO	11–10	240 875.850	112.64	0.13±0.03	6.75±1.90	18±2	-7.5	JPL	2
CH ₃ OH	5 _{0,5} –4 _{0,4} A	240 938.974	542.89	0.13±0.05	6.98±3.00	17±2	-7.7	JPL	2
CH ₃ OH	5 _{1,5} –4 _{1,4} A	240 960.557	359.95	0.17±0.02	5.09±0.62	32±2	-6.9	JPL	2
C ³⁴ S	5–4	241 016.194	34.70	4.02±0.04	3.88±0.04	973±6	-6.4	JPL	2
CH ₃ OH	5 _{–0,5} –4 _{–0,4} E	241 206.035	335.31	0.26±0.11	9.71±5.11	25±2	-5.5	JPL	2
CH ₃ OH	5 _{1,4} –4 _{1,3} E	241 238.144	448.11	0.30±0.06	8.62±2.18	32±1	-5.9	JPL	2
c-C ₃ H	9 _{3,6} –9 _{3,7} $J = 19/2$ –19/2, $F = 10$ –10	241 271.047	129.19	0.08±0.01	3.65±0.73	22±2	-4.7	JPL	1
CH ₃ OH	5 _{1,4} –4 _{1,3} A, $v_t=1$	241 441.270	360.02	0.20±0.01	5.09±0.43	36±1	-6.9	JPL	2
SO ¹⁸ O	5–4	241 530.837	51.42	0.43±0.03	6.97±0.50	58±2	-4.3	JPL	2
HDO	2–1	241 561.550	95.22	0.22±0.03	6.54±1.08	32±1	-6.3	JPL	1
CH ₃ OH	25 _{3,22} –25 _{2,23} A	241 588.758	803.70	0.12±0.02	5.64±1.04	21±1	-7.3	JPL	2
SO ₂	5 _{2,4} –4 _{1,3}	241 615.798	23.59	0.53±0.01	4.11±0.09	120±2	-6.5	JPL	2
CH ₃ OH	5 _{–0,5} –4 _{–0,4} E	241 700.159	47.93	9.12±0.06	3.89±0.03	2200±10	-6.4	JPL	2
CH ₃ OH	5 _{1,5} –4 _{1,4} E	241 767.234	40.39	18.95±0.17	4.01±0.04	4444±24	-6.4	JPL	2
HNCO	11–10	241 774.092	69.62	1.34±0.03	4.55±0.10	278±3	-6.2	JPL	2
CH ₃ OH	5 _{0,5} –40,4 A	241 791.352	34.82	21.84±0.20	4.04±0.04	5083±30	-6.4	JPL	2
CH ₃ OH	5 _{4,2} –4 _{4,1} A	241 806.525	115.16	0.43±0.02	5.29±0.22	76±1	-6.6	JPL	2
CH ₃ OH	5 _{4,2} –4 _{4,1} E	241 813.255	122.72	0.29±0.01	4.90±0.23	55±1	-6.5	JPL	2
CH ₃ OH	5 _{3,2} –4 _{3,1} A	241 833.106	84.62	2.09±0.04	4.66±0.09	421±4	-6.1	JPL	2
CH ₃ OH	5 _{2,4} –4 _{2,3} A	241 842.284	72.53	2.35±0.03	4.95±0.08	446±3	-6.9	JPL	2
CH ₃ OH	5 _{3,2} –4 _{3,1} E	241 852.299	97.53	0.63±0.01	5.05±0.13	118±1	-6.5	JPL	2
CH ₃ OH	5 _{1,4} –4 _{1,3} E	241 879.025	55.87	5.34±0.06	3.95±0.05	1269±9	-6.4	JPL	2
CH ₃ OH	5 _{2,3} –4 _{2,2} A	241 887.674	72.53	1.61±0.02	4.40±0.07	344±3	-6.4	JPL	2
CH ₃ OH	5 _{2,3} –4 _{2,2} E	241 904.147	60.73	8.13±0.04	4.03±0.02	1894±6	-6.8	JPL	2
CH ₃ OH	5 _{2,3} –5 _{1,1} E	241 919.043	679.63	0.03±0.01	2.51±0.75	10±2	-8.4	JPL	2
CH ₃ OCH ₃	13–14	241 946.249	81.13	0.45±0.01	4.59±0.14	91±1	-6.5	JPL	2
CH ₃ CHO	13 _{1,13} –12 _{1,12} E	242 106.020	83.89	0.27±0.01	3.89±0.15	64±1	-6.3	JPL	1
HCO	10 _{0,10} –9 _{1,9} $J = 19/2$ –17/2, $F = 10$ –9	242 117.059	228.66	0.26±0.01	3.93±0.20	63±2	-7.6	JPL	1
I-CC ¹³ CH ₂	12–11	242 210.945	195.89	0.19±0.10	9.87±5.20	18±12	-3.3	CDMS	3
H ₂ NCO+	12–11	242 375.645	609.08	0.21±0.01	3.26±0.17	59±2	-6.4	CDMS	3
H ₂ CCO	12 _{3,10} –11 _{3,9}	242 398.451	193.01	0.22±0.01	4.58±0.32	46±2	-6.8	JPL	2
³³ SO ₂	13–12	242 426.044	105.35	0.09±0.04	4.66±2.41	18±5	-4.4	JPL	2
CH ₃ OH	14 _{1,14} –13 _{2,11} E	242 446.084	248.93	0.42±0.02	6.68±0.44	60±1	-6.6	JPL	2
³⁴ SO ₂	36–35	242 466.960	646.86	0.22±0.10	7.56±3.46	27±8	-11.9	JPL	2
CH ₃ OH	24 _{3,21} –24 _{2,22} A	242 490.245	745.74	0.33±0.11	14.04±1.14	22±1	-6.7	JPL	2
CH ₂ DCN	14 ₁₂ –14 ₁₁	242 534.598	862.08	0.30±0.10	11.67±2.31	24±2	-11.9	JPL	2
HNCO	11–10	242 639.836	113.15	0.10±0.02	4.83±1.20	20±2	-5.7	JPL	2

(Продолжение)

Молекула	Переход	ν , МГц	E_u , К	$\int T_{\text{mb}} dV$, К км с $^{-1}$	ΔV , км с $^{-1}$	T_{mb} , мК	v_{LSR} , км с $^{-1}$	Каталог	Код
H ₂ NCO+	12–11	242 661.877	135.13	0.24±0.27	7.08±4.63	32±39	-11.9	CDMS	3
SO ¹⁸ O	14–13	242 872.997	88.85	0.26±0.10	8.65±3.38	28±8	-3.2	JPL	2
CH ₃ OCHO	19–18	242 896.025	130.44	0.10±0.02	5.43±1.25	18±2	-6.7	JPL	1
CH ₂ DCN	14–13	242 915.951	351.52	1.85±0.45	6.22±0.79	280±76	-2.1	JPL	2
HDCS	8–7	242 991.144	61.48	0.11±0.01	3.54±0.26	28±1	-6.7	CDMS	3
OCS	20–19	243 218.040	122.57	1.38±0.02	4.29±0.07	303±3	-6.4	JPL	2
CH ₃ OH	18 _{6,12} –19 _{5,15} A	243 397.654	590.28	0.26±0.16	11.19±8.34	22±2	-7.1	JPL	2
CH ₃ OH	23 _{3,20} –23 _{2,21} A	243 412.610	690.09	0.16±0.05	7.79±2.62	20±2	-6.6	JPL	2
HCOCN	2517–2516	243 554.384	993.36	0.24±0.23	8.83±6.37	26±24	-11.9	CDMS	3
C ₂ H ₅ CN	59–58	243 643.234	470.62	0.11±0.01	4.78±0.71	21±2	-6.8	CDMS	2
CH ₃ OH	5 _{1,4} –4 _{1,3} A	243 915.788	49.66	7.76±0.08	3.95±0.04	1848±11	-6.4	JPL	2
NHD2	7–6	243 965.411	427.21	0.29±0.31	6.32±3.65	44±51	-11.9	CDMS	3
I-HC ₄ N	53 ₅₄ –53 ₅₃	243 984.452	316.52	0.08±0.01	3.97±0.58	20±2	-7.4	CDMS	3
H ₂ CS	7 _{1,6} –6 _{1,5}	244 048.504	60.03	3.50±0.06	3.73±0.07	881±11	-6.4	JPL	2
c-C ₃ H ₂	3 _{2,1} –2 _{1,2}	244 222.133	18.17	0.22±0.01	2.62±0.10	80±2	-6.8	JPL	2
SO ₂	14 _{0,14} –13 _{1,13}	244 254.218	93.90	0.70±0.02	5.57±0.16	119±1	-6.5	JPL	2
CH ₃ OH	9 _{-1,9} –8 _{-0,8} E	244 337.983	395.65	0.70±1.35	22.70±53.18	29±8	-3.6	JPL	2
CHD ₂ CHO	15–14	244 362.854	98.12	0.11±0.01	2.12±0.12	49±2	-8.3	CDMS	3
HCC ¹³ CN	27–26	244 588.039	164.35	0.05±0.02	5.06±1.78	10±2	-7.4	JPL	2
H ₂ CCO	12 _{1,11} –11 _{1,10}	244 712.269	89.40	0.47±0.01	3.67±0.10	120±2	-6.4	JPL	2
CH ₃ CHO	13 _{0,13} –12 _{0,12} E	244 789.251	83.14	0.25±0.02	4.02±0.37	58±3	-6.3	JPL	1
CH ₃ O ¹³ CHO	50–49	244 825.652	832.42	0.22±0.48	5.13±5.04	41±99	-11.9	CDMS	3

B5

³⁴ SO	6 ₆ –5 ₅	253 208.020	55.69	0.13±0.01	3.52±0.42	35±2	-5.4	JPL	2
CH ₃ OH	13 _{3,11} –12 _{2,12}	253 221.376	260.99	0.41±0.03	5.88±0.47	66±1	-5.8	JPL	2
NS	6–5	253 570.476	39.81	1.15±0.03	4.99±0.14	218±2	-5.8	JPL	2
CH ₃ OH	14 _{3,12} –14 _{2,13} A	253 755.809	293.46	0.51±0.04	7.34±0.68	66±1	-5.4	JPL	2
CH ₃ OCH ₃	20–19	253 906.535	226.60	0.12±0.03	5.92±1.47	20±2	-6.4	JPL	2
NS	6–5	253 968.393	39.93	1.21±0.05	6.28±0.32	181±3	-7.1	JPL	2
CH ₃ OH	2 _{-0,2} –1 _{1,1} E	254 015.377	20.09	4.11±0.03	4.59±0.04	841±3	-5.3	JPL	2
HOCH ₂ CN	39–38	254 084.587	346.30	0.13±0.01	3.63±0.32	33±2	-6.1	CDMS	3
³⁰ SiO	6–5	254 215.845	42.70	0.15±0.01	4.77±0.36	29±1	-6.6	JPL	2
³⁴ SO ₂	28–27	254 277.635	414.26	0.54±0.07	7.01±1.01	73±3	-8.8	JPL	2
CHD ₂ CHO	10–9	254 319.457	73.87	0.25±0.21	12.60±12.33	19±2	-6.6	CDMS	3
HCOOH	11–10	254 382.460	83.74	0.12±0.02	4.71±0.86	24±2	-7.4	JPL	1
CH ₃ OH	15 _{3,13} –15 _{2,14} A	254 423.520	328.26	0.50±0.06	7.28±1.03	65±2	-5.2	JPL	2
³³ SO ₂	9–8	254 509.496	63.04	0.14±0.03	6.35±1.43	21±1	-6.4	JPL	2
H ₂ CNH	4–3	254 685.137	30.62	0.93±0.02	4.33±0.11	202±2	-5.5	CDMS	3
¹³ CH ₃ OH	9–8	254 693.481	151.98	0.57±0.08	7.08±1.12	76±3	-8.8	CDMS	3
CH ₃ O ¹³ CHO	21 ₁₀ –21 ₉	254 781.236	403.40	0.08±0.01	4.10±0.67	18±2	-7.0	CDMS	3
CH ₃ CHO	13 _{2,11} –12 _{2,10} E	254 827.152	94.09	0.17±0.01	4.15±0.39	38±1	-5.6	JPL	1
¹³ CH ₃ OH	8–7	254 841.818	131.59	0.28±0.21	12.08±10.75	22±2	-5.6	CDMS	3
CH ₃ CHO	13 _{2,11} –12 _{2,10} A	254 850.487	94.07	0.19±0.02	4.48±0.44	40±1	-5.3	JPL	1
¹³ CH ₃ OH	7–6	254 959.398	113.48	0.19±0.04	8.19±2.22	22±1	-5.2	CDMS	3
SO+	6–5	254 977.935	38.92	0.26±0.02	4.44±0.37	55±2	-5.5	JPL	1
HDO	5–4	255 050.260	437.38	0.37±0.21	12.93±8.59	27±1	-7.8	JPL	1
SO ¹⁷ O	31–30	255 072.102	638.82	0.21±0.08	10.98±4.97	18±1	-5.3	CDMS	3
¹³ CH ₃ OH	5–4	255 120.837	84.03	0.20±0.05	7.06±2.16	27±2	-5.4	CDMS	3
CH ₃ O ¹³ CHO	21–20	255 173.731	377.29	0.12±0.04	6.11±2.25	18±2	-5.2	CDMS	3

(Продолжение)

Молекула	Переход	ν , МГц	E_u , К	$\int T_{\text{mb}} dV$, К км с $^{-1}$	ΔV , км с $^{-1}$	T_{mb} , мК	v_{LSR} , км с $^{-1}$	Каталог	Код
$^{13}\text{CH}_3\text{OH}$	6–5	255 193.509	97.62	0.15 ± 0.01	4.44 ± 0.47	33 ± 1	–5.8	CDMS	3
CH_3OH	16 _{3,14} –16 _{2,15}	255 241.888	365.37	0.35 ± 0.03	6.37 ± 0.62	52 ± 1	–5.8	JPL	2
$^{13}\text{CH}_3\text{OH}$	8–7	255 265.637	131.59	0.22 ± 0.09	9.37 ± 4.28	22 ± 1	–5.6	CDMS	3
CH_3CHO	13 _{1,12} –12 _{1,11} E	255 326.968	88.45	0.34 ± 0.03	4.98 ± 0.54	65 ± 2	–5.2	JPL	1
SO^+	6–5	255 353.237	39.03	0.37 ± 0.04	6.07 ± 0.69	57 ± 2	–5.4	JPL	1
OCS	21–20	255 374.461	134.83	1.27 ± 0.03	4.96 ± 0.13	240 ± 2	–5.4	JPL	2
CH_3CHO	13 _{1,12} –12 _{1,11}	255 384.754	88.39	0.28 ± 0.03	5.00 ± 0.55	53 ± 2	–5.2	JPL	1
HC^{18}O^+	3–2	255 479.432	24.52	0.82 ± 0.02	3.96 ± 0.12	193 ± 3	–5.6	JPL	2
$^{13}\text{CH}_3\text{OH}$	10–9	255 496.966	174.62	0.21 ± 0.06	9.21 ± 3.08	21 ± 1	–6.4	CDMS	3
SO_2	4 _{3,1} –4 _{2,2}	255 553.303	31.29	0.29 ± 0.05	6.68 ± 1.39	41 ± 2	–5.2	JPL	2
$^{13}\text{CH}_3\text{OH}$	11–10	255 701.008	199.53	0.22 ± 0.10	9.27 ± 4.76	22 ± 1	–5.7	CDMS	3
C^{13}CH	3–2	255 746.211	24.55	0.19 ± 0.02	3.78 ± 0.34	48 ± 2	–6.1	CDMS	3
C^{13}CH	3–2	255 758.790	24.55	0.08 ± 0.01	3.30 ± 0.64	22 ± 2	–5.2	CDMS	3
C^{13}CH	3–2	255 803.600	24.56	0.11 ± 0.02	4.38 ± 0.68	23 ± 2	–6.2	CDMS	3
SO_2	3 _{3,1} –3 _{2,2}	255 958.044	27.62	0.12 ± 0.02	4.82 ± 1.02	23 ± 2	–5.2	JPL	2
CC^{13}CCH	27–27	255 974.350	172.00	0.05 ± 0.02	3.34 ± 1.64	13 ± 2	–8.8	CDMS	3
CH_3CCH	15 ₈ –14 ₈	256 024.303	560.29	1.35 ± 0.02	4.18 ± 0.07	302 ± 2	–8.6	JPL	2
SOO-17	15–14	256 093.239	104.05	0.15 ± 0.03	3.44 ± 0.73	40 ± 3	–8.8	CDMS	3
HCCC^{13}N	29–28	256 121.745	184.40	0.11 ± 0.01	4.05 ± 0.59	25 ± 1	–5.3	JPL	2
CH_3OCH_3	19–18	256 139.230	208.32	0.06 ± 0.01	4.06 ± 0.85	13 ± 1	–6.1	JPL	2
$\text{CH}_3\text{O}^{13}\text{CHO}$	21 ₁₄ –21 ₁₃	256 210.315	263.95	0.47 ± 0.06	4.01 ± 0.56	110 ± 6	–5.2	CDMS	3
CH_3OH	17 _{3,15} –17 _{2,16} A	256 228.714	404.79	0.83 ± 0.24	11.76 ± 3.94	66 ± 3	–8.8	JPL	2
SO_2	5 _{3,3} –5 _{2,4}	256 246.946	35.89	0.25 ± 0.02	5.36 ± 0.42	44 ± 1	–5.4	JPL	2
CH_3CCH	15 ₄ –14 ₄	256 258.427	214.00	0.17 ± 0.01	4.40 ± 0.41	36 ± 1	–5.8	JPL	2
CH_3CCH	15 ₃ –14 ₃	256 292.630	163.44	0.70 ± 0.03	4.32 ± 0.19	153 ± 2	–5.4	JPL	2
CH_3OCHO	21 ₁₅ –21 ₁₄	256 299.660	473.26	0.37 ± 0.01	4.07 ± 0.15	86 ± 2	–6.8	JPL	1
CH_3CCH	15 ₂ –14 ₂	256 317.071	127.32	0.77 ± 0.02	4.17 ± 0.12	173 ± 2	–5.4	JPL	2
CH_3CCH	15 ₁ –14 ₁	256 331.739	105.65	2.16 ± 0.41	7.71 ± 1.68	263 ± 12	–5.2	JPL	2
CH_3CCH	15 ₀ –14 ₀	256 336.629	98.42	1.44 ± 0.03	4.15 ± 0.10	325 ± 3	–5.4	JPL	2
CH_3OCHO	41–40	256 390.970	751.90	0.04 ± 0.02	2.94 ± 1.73	12 ± 3	–8.8	JPL	1
$\text{CH}_3\text{O}^{13}\text{CHO}$	21 ₁₂ –21 ₁₁	256 565.363	229.87	0.22 ± 0.01	3.85 ± 0.18	53 ± 1	–6.6	CDMS	3
HDCO	4–3	256 585.538	30.85	0.69 ± 0.02	4.41 ± 0.12	147 ± 1	–5.5	JPL	2
$^{13}\text{CH}_3\text{OH}$	9–8	256 671.817	114.93	0.12 ± 0.03	5.64 ± 1.75	20 ± 2	–6.3	CDMS	3
^{34}SO	6 ₇ –5 ₆	256 877.456	46.71	0.47 ± 0.02	4.83 ± 0.25	92 ± 2	–6.0	JPL	2
CH_3OCHO	18–17	256 985.710	112.06	0.06 ± 0.02	3.65 ± 1.59	14 ± 2	–5.3	JPL	1

B6

SO_2	7 _{3,5} –7 _{2,6}	257 099.966	47.84	0.24 ± 0.02	4.73 ± 0.34	47 ± 1	–6.7	JPL	2
^{29}SiO	6–5	257 254.227	43.21	0.37 ± 0.04	6.96 ± 0.78	50 ± 1	–6.8	JPL	2
CH_3CHO	29 _{2,27} –29 _{1,28} E	257 309.963	418.65	0.10 ± 0.02	4.81 ± 1.25	19 ± 2	–7.2	JPL	1
$^{33}\text{SO}_2$	24–23	257 346.055	292.36	0.22 ± 0.05	5.65 ± 1.46	36 ± 3	–8.7	JPL	2
CH_3CN	14 ₅ –13 ₅	257 403.584	271.22	0.47 ± 0.04	6.49 ± 0.60	68 ± 1	–6.0	JPL	2
CH_3CN	14 ₄ –13 ₄	257 448.128	206.98	0.47 ± 0.05	5.96 ± 0.66	74 ± 2	–6.3	JPL	2
CH_3CN	14 ₃ –13 _{–3}	257 482.791	156.99	0.90 ± 0.03	5.18 ± 0.16	163 ± 2	–6.5	JPL	2
CH_3CN	14 ₂ –13 ₂	257 507.561	121.28	0.72 ± 0.03	4.87 ± 0.19	140 ± 2	–6.4	JPL	2
CH_3CN	14 ₁ –13 ₁	257 522.427	99.85	1.19 ± 0.06	5.84 ± 0.32	192 ± 4	–6.8	JPL	2
CH_3CN	14 ₀ –13 ₀	257 527.383	92.70	1.11 ± 0.03	4.97 ± 0.14	210 ± 2	–6.4	JPL	2
HDCO	4–3	257 748.701	62.77	0.12 ± 0.01	2.59 ± 0.22	43 ± 3	–6.7	JPL	2
CH_3OCHO	21 ₁₆ –21 ₁₅	257 910.566	306.01	0.17 ± 0.14	9.72 ± 9.42	16 ± 2	–8.7	JPL	1
SO^{18}O	29–28	258 050.809	417.39	0.09 ± 0.03	5.31 ± 2.15	16 ± 2	–8.7	JPL	2

(Продолжение)

Молекула	Переход	ν , МГц	E_u , К	$\int T_{\text{mb}} dV$, К км с $^{-1}$	ΔV , км с $^{-1}$	T_{mb} , мК	v_{LSR} , км с $^{-1}$	Каталог	Код
HDCO	4–3	258 082.574	102.56	0.12±0.07	7.11±4.74	17±2	−5.3	JPL	2
HC 13 N	3–2	258 156.996	24.78	1.01±0.02	4.02±0.09	237±3	−6.6	JPL	2
SO	6 $_6$ –5 $_5$	258 255.813	56.50	4.61±0.07	4.32±0.07	1004±8	−6.4	JPL	2
CH $_3$ CHO	19 $_{14,16}$ –20 $_{1,19}$ A	258 260.173	212.13	0.91±0.16	4.40±0.83	193±13	−5.3	JPL	1
c-HCOOH	9–8	258 551.581	61.90	0.30±0.05	4.44±0.88	63±5	−5.3	CDMS	3
CH $_3$ OH	11–0,11–10 $_{2,8}$ E	258 726.170	166.05	0.20±0.06	6.35±2.16	30±3	−7.0	JPL	2
CH $_3$ OH	19 $_{3,17}$ –19 $_{2,18}$ E	258 780.248	490.58	0.24±0.04	5.72±1.04	40±2	−6.9	JPL	2
SO $_2$	9 $_{3,7}$ –9 $_{2,8}$	258 942.199	63.47	0.30±0.02	5.24±0.32	55±1	−6.3	JPL	2
H 13 CN	3–2	259 011.798	24.86	5.21±0.07	4.28±0.06	1144±8	−6.6	JPL	2
HDCO	4–3	259 034.910	62.86	0.19±0.02	3.77±0.43	48±3	−6.5	JPL	2
33 SO	6 $_{7,8}$ –5 $_{6,8}$	259 229.024	47.12	0.04±0.01	3.14±0.90	13±2	−7.6	CDMS	3
CH $_3$ OH	17 $_{2,15}$ –16 $_{1,15}$ A	259 273.686	652.67	0.09±0.05	6.48±3.78	13±2	−6.7	JPL	2
CH $_3$ OCH $_3$	17–16	259 314.279	174.54	0.14±0.08	7.36±4.49	18±2	−5.9	JPL	2
CH $_3$ OCHO	24–23	259 343.004	158.22	0.38±0.04	5.85±0.65	61±2	−5.7	JPL	1
CH $_3$ OCH $_3$	6–5	259 486.616	31.77	0.41±0.14	9.31±3.58	42±2	−8.1	JPL	2
CH $_3$ OCHO	20–19	259 521.812	138.67	0.18±0.07	8.18±3.59	21±2	−8.7	JPL	1
34 SO $_2$	13–12	259 617.203	104.91	0.12±0.05	5.94±2.85	19±3	−8.7	JPL	2
CH $_3$ OCHO	21–20	259 647.705	190.29	0.22±0.13	10.32±6.88	20±2	−6.9	JPL	1
CH $_3$ O 13 CHO	21–20	259 846.303	168.21	0.09±0.03	5.06±1.93	17±3	−6.9	CDMS	3
CH $_3$ O 13 CHO	21–20	259 920.407	348.29	0.05±0.03	4.15±2.84	11±3	−5.3	CDMS	3
CH $_3$ OCH $_3$	20–19	259 986.265	226.58	0.29±0.04	6.00±1.01	46±2	−6.3	JPL	2
CH $_3$ CHO	44 $_{2,42}$ –45 $_{0,45}$ E	260 022.541	998.88	0.07±0.03	3.66±1.88	18±4	−8.7	JPL	1
HCO	3 $_{0,3}$ –2 $_{0,2}$, $F = 4$ –3	260 060.329	24.98	0.22±0.01	2.41±0.10	84±3	−6.9	JPL	1
HCO	3 $_{0,3}$ –2 $_{0,2}$, $J = 7/2$ –5/2, $F = 3$ –2	260 082.192	24.97	0.14±0.01	2.35±0.18	57±4	−6.8	JPL	1
HCO	3 $_{0,3}$ –2 $_{0,2}$, $J = 5/2$ –3/2, $F = 3$ –2	260 133.586	24.99	0.15±0.01	2.39±0.15	57±3	−6.8	JPL	1
HCO	3 $_{0,3}$ –2 $_{0,2}$, $J = 5/2$ –3/2, $F = 2$ –1	260 155.769	25.00	0.11±0.01	2.77±0.21	36±2	−7.1	JPL	1
CH $_3$ C $_3$ N	63–62	260 189.411	399.66	0.41±0.05	3.86±0.52	99±5	−8.7	CDMS	3
H 13 CO+	3–2	260 255.339	24.98	6.37±0.14	3.07±0.06	1948±28	−6.8	JPL	2
CH $_2$ DCN	15–14	260 384.626	100.00	0.13±0.03	3.79±0.92	33±3	−5.3	JPL	2
CH $_2$ DCN	15–14	260 406.709	186.27	0.10±0.03	5.21±1.78	19±2	−5.3	JPL	2
SO 18 O	17–16	260 479.508	141.34	0.11±0.04	6.52±2.64	16±2	−6.9	JPL	2
SiO	6–5	260 518.020	43.76	4.43±0.09	5.87±0.14	710±5	−6.4	JPL	2
CH $_3$ CHO	14 $_{1,14}$ –13 $_{1,13}$ A	260 544.019	96.32	0.22±0.03	4.51±0.64	46±2	−5.8	JPL	1
CH $_3$ OCHO	20 $_{10}$ –20 $_9$	260 682.101	190.34	0.02±0.01	1.53±0.55	11±3	−5.8	JPL	1
HCOCN	30–29	260 726.884	290.84	0.27±0.26	11.37±2.25	22±3	−8.7	CDMS	3
H $_2$ NCO+	13–12	260 755.903	102.47	0.36±0.04	5.61±0.75	60±2	−8.7	CDMS	3
OC 34 S	22–21	260 991.808	144.06	0.09±0.03	4.30±1.33	20±3	−6.2	CDMS	3

В спектрах YSO S2 было отождествлено 407 линий 79 молекул (см. таблицу 4). Источником спектроскопических данных для 78% линий была база данных JPL. Среди всех диапазонов частот линии метанола (CH $_3$ OH) обнаружаются наи-

более часто. Количество линий CH $_3$ OH равно 55 и соответствует 14% от общего числа линий. Линии метилформиата (CH $_3$ OCHO) составляют 10% (42 линии) от общего числа и являются вторыми по распространенности, линии CH $_3$ OCH $_3$ — 6%

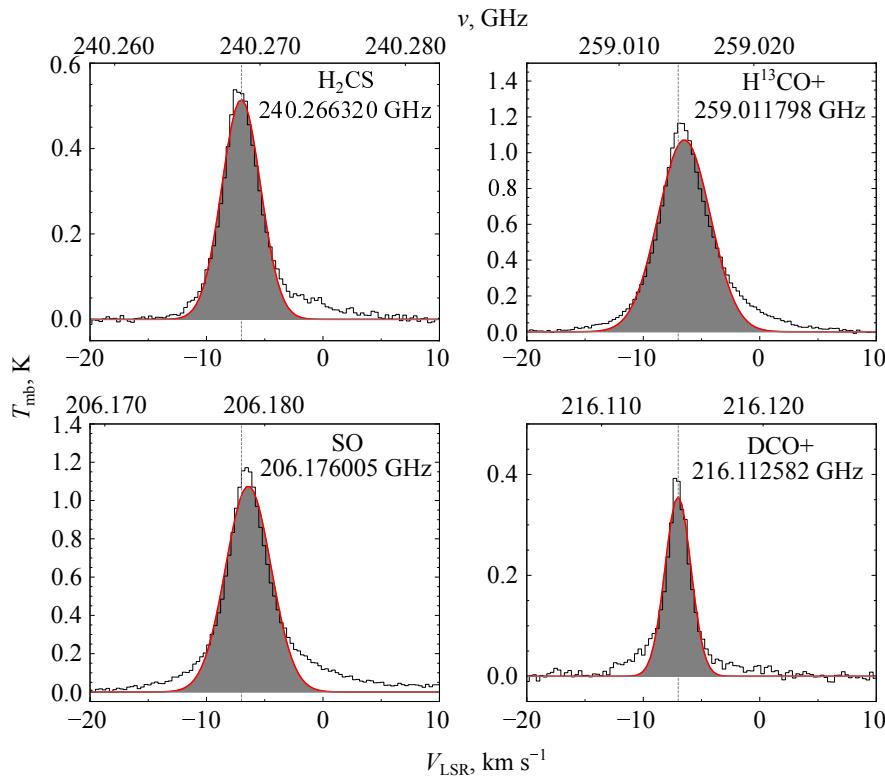


Рис. 2. Примеры приближения профилей линий для источника YSO S2. Функция Гаусса показана красным цветом. Соответствующая ей площадь под гауссианой обозначена серым цветом.

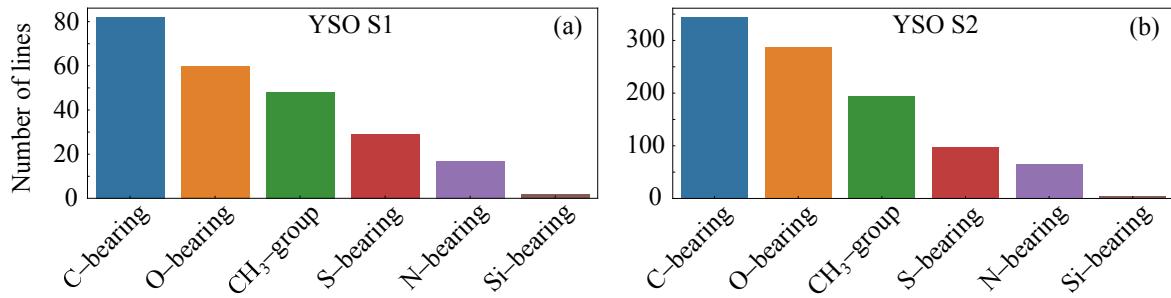


Рис. 3. Классификация по группам соединений для YSO S1 (a) и YSO S2 (b).

(23 линии), а CH₃CHO — 5% (19 линий) от общего числа отождествленных линий. Число отождествленных линий метилацетилена (CH₃CCH) составляет 4% (18 линий), H₂CS, CH₃CN и диоксида серы (SO₂) — 4.2% (17 линий), 3.7% (15 линий) и 3.4% (14 линий) соответственно. Изотополог ¹³CH₃OH занимает 3.4% среди всех отождествленных молекул, присутствие SO¹⁸O составляет 2.7% (11 линий). Дейтерированные соединения CH₂DCN составляют 1.5% (6 линий), HDCO — 1.0% (4 линии), CH₂DCHO — 0.7% (3 линии), HDO — 0.5% (2 линии) от общего числа молекул.

Классификация по группам соединений (см. рис. 3) выявляет большое количество углеродсо-

держащих молекул, составляющих 84.5% от общего числа линий. Кислородосодержащим соединениям соответствует 70.8%, CH₃-группа присутствует в 47.7% от общего числа найденных линий. Серосодержащие соединения — H₂CS, SO₂, OCS, HSCN и их изотопологи — составляют 23.8%. Азотосодержащие соединения составляют 16%. Монооксид кремния (SiO) и его изотопологи ²⁹SiO, ³⁰SiO составляют 1% или 4 линии.

В наблюдаемых спектрах YSO S1 с помощью разработанного алгоритма было выделено 100 линий 41 молекулы (см. таблицу 3). Среди всех молекул наиболее распространенной является молекула CH₃OH, у которой отождествлено 15 линий, что в 3.6 раза меньше, чем количество отождествленных

Таблица 5. Отождествленные молекулы в YSO S1 и YSO S2

Количество атомов в молекулах								
2	3	4	5	6	7	8	9	
YSO S2								
SO	SO ₂	HNCO	H ₂ CCO	CH ₃ OH	CH ₃ CHO	CH ₃ COOH		CH ₃ OCH ₃
NS	HDO	H ₂ CS	H ₂ NCO ⁺	CH ₃ CN	CH ₃ CCH	CH ₃ O ¹³ CHO		C ₂ H ₅ CN
SiO	H ₂ S	H ₂ CO	c-C ₃ H ₂	¹³ CH ₃ OH	HOCH ₂ CN	CH ₃ C ₃ N		
SO ⁺	HCO	HDCO	HCOOH	CH ₂ DCN	CH ₂ DCHO	CH ₃ OCHO		
³³ SO	CCH	HSCN	HCC ¹³ CN	CHD ₂ OH	C ₂ H ₃ CN			
³⁴ SO	DCO ⁺	HDCS	l-CC ¹³ CH ₂	CH ₃ CN, <i>v</i> ₈ =1	CHD ₂ CHO			
C ³⁴ S	HSO	H ₂ C ³⁴ S	HCC ¹³ CN	l-HC ₄ N				
²⁹ SiO	CCD	H ₂ C ³³ S	CCC ¹³ CH	H ₂ CNCN				
³⁰ SiO	SO ¹⁷ O	c-C ₃ H	C ₄ H					
	SO ¹⁸ O		HCCS	H ₂ CCC ¹⁵ N				
	³³ SO ₂		H ₂ ¹³ CO	c-HCOOH				
	³⁴ SO ₂		HNSO	c-HC ¹³ CCH				
	O ¹³ CS			H ₂ CNH				
	HC ¹⁸ O ⁺							
	H ¹³ CO ⁺							
	OC ³⁴ S							
	HCN							
	H ¹³ CN							
	HC ¹⁵ N							
	OCS							
YSO S1								
SO	SO ₂	HNCO	H ₂ CCO	CH ₃ OH	CH ₃ CHO	CH ₃ COOH		
NS	H ₂ S	H ₂ CS	c-C ₃ H ₂	CH ₃ CN	CH ₃ CCH	CH ₃ O ¹³ CHO		
SiO	HCO	H ₂ CO	H ₂ CNH	CH ₂ DCN				
³³ SO	DCO ⁺	HDCO						
³⁴ SO	SO ¹⁷ O	c-C ₃ H						
C ³⁴ S	³³ SO ₂	H ₂ ¹³ CO						
	HC ¹⁸ O ⁺	HN ¹³ CO						
	H ¹³ CO ⁺							
	H ¹³ CN							
	HC ¹⁵ N							
	OCS							

линий CH₃OH в YSO S2. Второй по распространенности является молекула CH₃CCH, у которой отождествлено 13 линий.

В наблюдательных спектрах было выделено семь линий молекулы CH₃CN, шесть линий молекулы H₂CS, пять линий молекулы CH₃CHO. Количество линий таких молекул, как SO₂ и OCS, равно четырем. Среди молекул SO, H₂CO и с-C₃H₂ отождествлено по три линии для каждой молекулы.

В итоговой классификации по группам (см. рис. 3) выделяются 82% углеродосодержащих молекул, 60% кислородосодержащих, 29% серосодержащих и 17% азотосодержащих. Кроме того, 48% всех отождествленных линий включают CH₃-

группу. Наименьшее количество линий (2%) приходится на молекулы, содержащие кремний.

Достоверность отождествления линий молекул зависит от принятого порога чувствительности. Так, для спектров RCW 120 YSO S2 при разрешении 0.3 км с⁻¹ отождествились все линии, амплитуды которых начинаются от уровня 5–7 σ , указанного в таблице 1 для каждого диапазона. В спектрах присутствует большое количество спектральных компонент, поэтому в диапазоне 3–5 σ невозможно однозначно отождествить перекрывающиеся между собой линии некоторых молекул, частоты которых близки. Так, например, происходит около частоты 258 726 МГц, где линия CH₃OH с частотой 258 726.17 МГц и энергией 166 К перекрывается с линией CH₃OCH₃ с частотой 258 726.56 МГц и

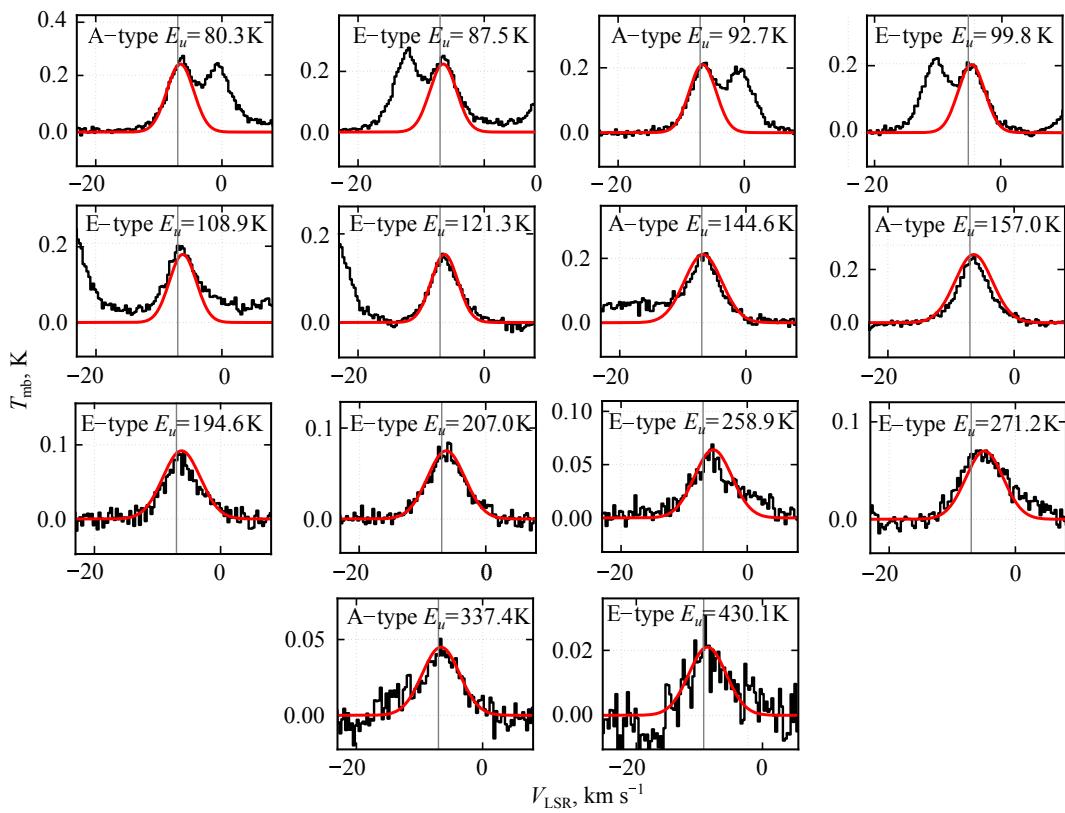


Рис. 4. Профили линий CH₃CN для YSO S2. Системная скорость, равная -7 км с^{-1} , обозначена вертикальной сплошной серой линией. При приближении с помощью функции Гаусса (красный цвет) для линий с $E_u \leq 157 \text{ К}$ ширина линии была фиксирована значением $\Delta v = 5 \text{ км с}^{-1}$. Для линий с $E_u > 157 \text{ К}$ — $\Delta v = 7 \text{ км с}^{-1}$.

энергией 88 К. В подобном случае мы считаем, что только моделирование спектров для заданных параметров межзвездного газа позволяет сделать обоснованный выбор в пользу одной из двух линий или предположить наличие бленды из двух линий.

4.3. Линии высокого возбуждения в RCW 120 YSO S2

Как уже отмечалось выше, наибольшее количество линий в наблюдавшемся диапазоне принадлежит молекулам CH₃CN, CH₃CCH и CH₃OH. Для них мы выявили различия в наблюдаемых спектральных профилях в зависимости от E_u . Переходы с энергиями, не превышающими пороговые значения: $E_u \leq 157 \text{ К}$ для CH₃CN, $E_u \leq 201.3 \text{ К}$ для CH₃CCH, $E_u \leq 122.7 \text{ К}$ для CH₃OH, демонстрируют выраженный центральный максимум. Напротив, переходы с E_u , превышающими указанные значения, характеризуются заметным уширением профилей. Например, профили линий молекулы CH₃CN вместе с гауссовым приближением изображены на рис. 4. При приближении с помощью функции Гаусса для линий с $E_u \leq 157 \text{ К}$ ширина линии была фиксирована значением $\Delta v = 5 \text{ км с}^{-1}$,

для линий с $E_u > 157 \text{ К}$ — $\Delta v = 7 \text{ км с}^{-1}$. Профили линий молекулы CH₃OH (см. рис. 5) демонстрируют подобное разделение, однако ширины линий и пороговое значение E_u отличаются от значений для CH₃CN. При приближении профилей линий с $E_u \leq 122.7 \text{ К}$ использовалось значение $\Delta v = 4.5 \text{ км с}^{-1}$, для переходов с более высокими энергиями — $\Delta v = 8 \text{ км с}^{-1}$. Переходы молекулы CH₃CCH были аналогично разделены по виду профилей линий (см. рис. 6). Переходы с $E_u \leq 201.3 \text{ К}$ были приближены с $\Delta v = 3 \text{ км с}^{-1}$, а для линий с $E_u > 201.3 \text{ К}$ использовалось значение $\Delta v = 5 \text{ км с}^{-1}$.

Для определения температуры возбуждения (T_{ex}) и лучевой концентрации применялся метод построения вращательных диаграмм. При использовании метода были взяты интегральные интенсивности, рассчитанные при вышеприведенных ширинах линий. Вращательные диаграммы для CH₃OH, CH₃CN и CH₃CCH представлены на рис. 7. Ввиду того что на диаграммах есть визуальное разделение точек на группы, каждая из групп была приближена отдельно. Полученные оценки температуры возбуждения демонстрируют разделение на две различные компоненты: горячую

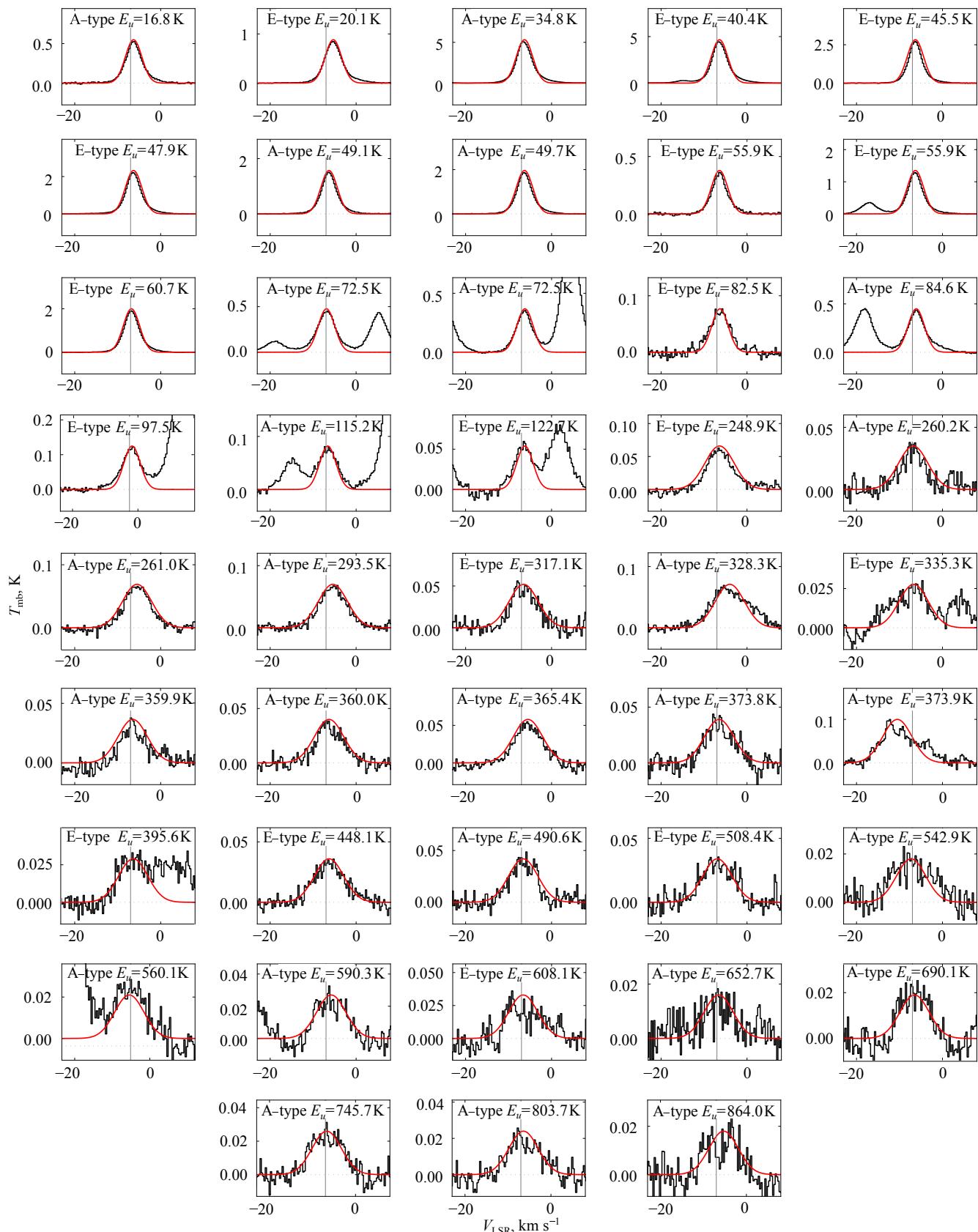


Рис. 5. Профили линий CH₃OH для YSO S2. Системная скорость, равная -7 км с⁻¹, обозначена вертикальной сплошной серой линией. При приближении с помощью функций Гаусса (красный цвет) для линий с $E_u \leq 122.7$ К ширина линии была фиксирована значением $\Delta v = 4.5$ км с⁻¹. Для линий с $E_u > 122.7$ К — $\Delta v = 8$ км с⁻¹.

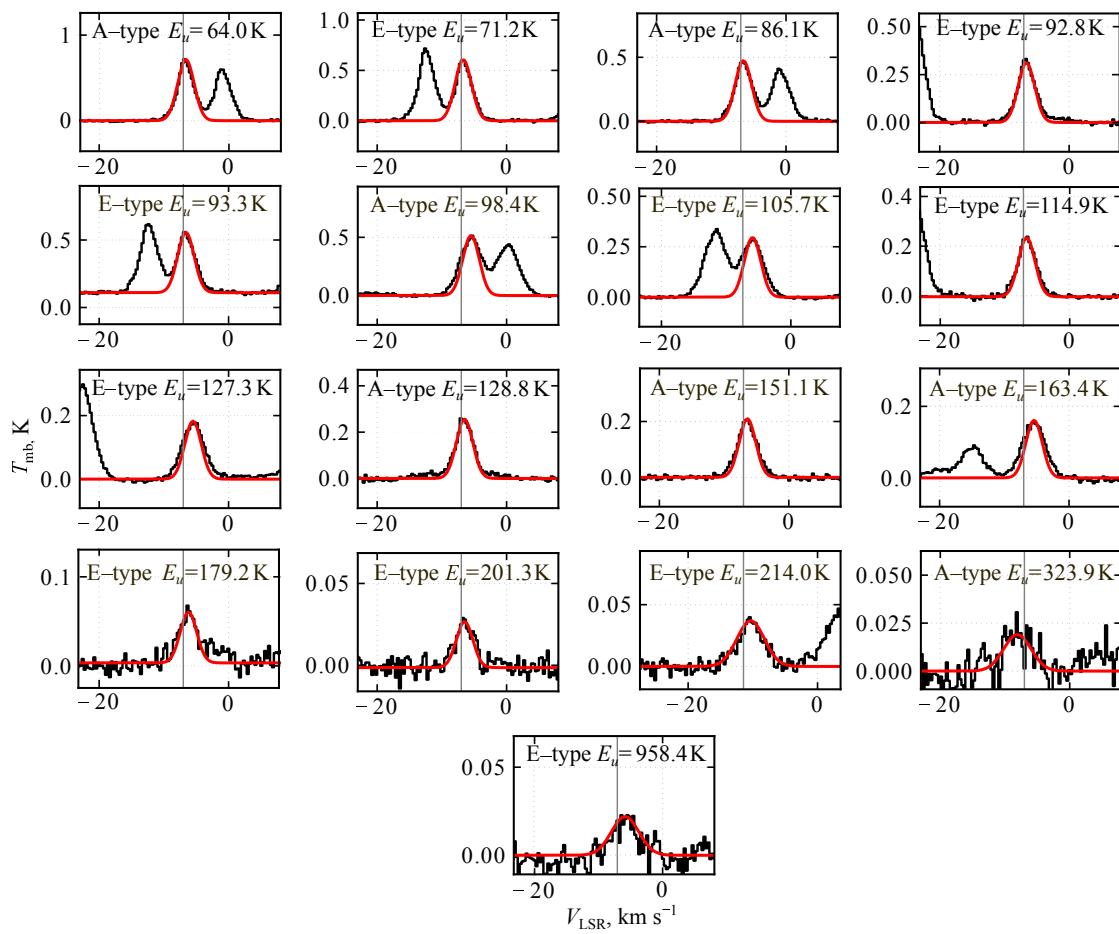


Рис. 6. Профили линий CH₃CCH для YSO S2. Системная скорость, равная -7 км с^{-1} , обозначена вертикальной сплошной серой линией. При приближении с помощью функции Гаусса (красный цвет) для линий с $E_u \leq 201.3 \text{ К}$ ширина линии была фиксирована значением $\Delta v = 3 \text{ км с}^{-1}$. Для линий с $E_u > 201.3 \text{ К} — \Delta v = 5 \text{ км с}^{-1}$.

и относительно холодную, что указывает на присутствие областей с разной температурой на луче зрения. Для CH₃OH температурное разделение наиболее выражено, так как у этой молекулы было отождествлено большее количество высокоэнергетических переходов, по сравнению с молекулами CH₃CN и CH₃CCH. Вращательная диаграмма для CH₃CN также демонстрирует разделение на два компонента. Наименее выраженное температурное разделение прослеживается у молекулы CH₃CCH, по вращательной диаграмме которой выделяется только низкоэнергетический компонент из-за малого количества линий (всего две) со значениями $E_u > 250 \text{ К}$. Оценки температуры возбуждения и лучевой концентрации для CH₃OH, CH₃CN и CH₃CCH представлены в таблице 6.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

В работах Plakitina et al. (2024, 2025) сообщается об обнаружении 65 линий 35 молекул в направлении на YSO S2 в практически перекрывающем спектральном диапазоне с чувствительностью

40 мК. В процитированных выше работах использовалось ручное отождествление. Отождествлять вручную линии в наших спектрах, чувствительность которых на порядок выше, не представляется возможным. Кроме того, ручной поиск занимает много времени и не учитывает условия возбуждения, поэтому выбор одной молекулы среди всех кандидатов может быть неоднозначным. В MOLLID многоуровневый поиск позволяет последовательно сопоставлять молекулы и отфильтровывать переходы с высокой энергией верхнего уровня ($E_u \geq \geq 1000 \text{ К}$), которые, предположительно, менее вероятны для спектров областей звездообразования и молекулярных облаков.

В некоторых случаях доля неопознанных линий может доходить до 25%, как, например, в работе Rolffs et al. (2011), или 20% в Allen et al. (2017). В других исследованиях количество неидентифицированных линий невелико: 5% (Beuther et al., 2006) и 1.8% (Zernickel et al., 2012). Все указанные работы используют XCLASS как основной пакет

Таблица 6. Оценки температуры возбуждения и лучевой концентрации, полученные для YSO S2 в ЛТР-приближении. Приведены значения для низкоэнергетического (*l*) и высокоэнергетического компонента (*h*)

Молекула	T_{ex}^l , К	T_{ex}^h , К	$N^l \times 10^{14}$, см $^{-2}$	$N^h \times 10^{14}$, см $^{-2}$
CH ₃ OH	27 ± 6	238 ± 7	13.20 ± 8.76	12.90 ± 7.23
CH ₃ CN	70 ± 5	232 ± 29	0.11 ± 0.01	0.29 ± 0.06
CH ₃ CCH	40 ± 3	—	2.96 ± 0.61	—

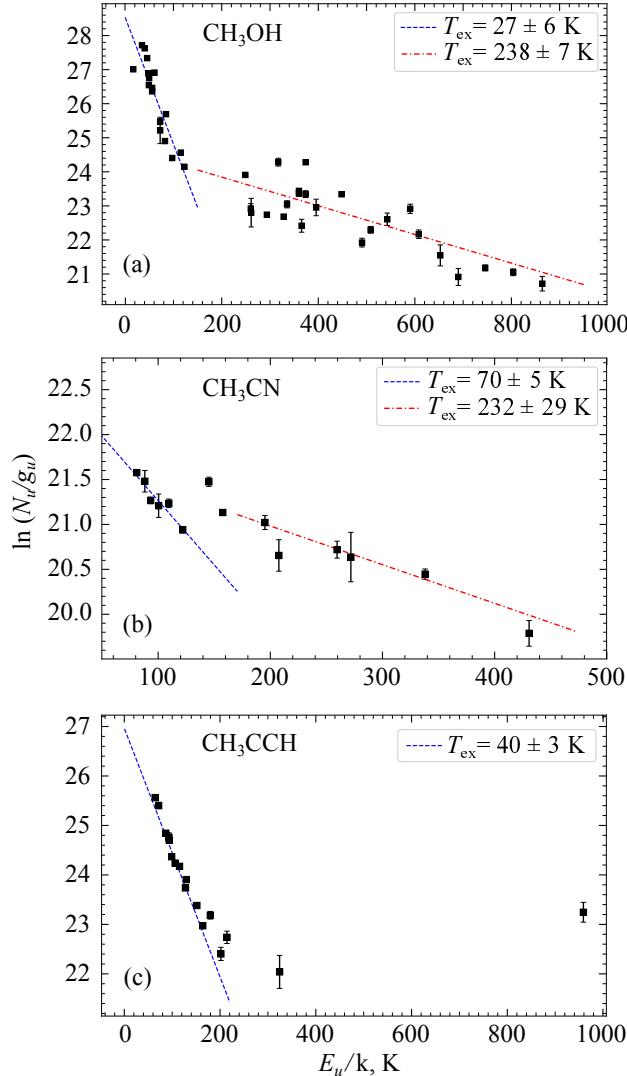


Рис. 7. Вращательные диаграммы для молекул CH₃OH (a), CH₃CN (b) и CH₃CCH (c) для источника RCW 120 YSO S2. Штриховая линия показывает приближение данных наблюдений линейной функцией.

для отождествления линий. Эффективность отождествления определяется алгоритмами, применяемыми в этом пакете, а также наличием и качеством спектроскопических данных. В то же время и кинематическая структура наблюдавшихся объектов может влиять на качество отождествления.

В отождествлении с помощью **MOLLIId** количество неотождествленных молекул для YSO S2 составляет 3 из 407 линий (0.7%), для YSO S1 — одна линия из ста. Мы предполагаем, что количество неотождествленных линий можно уменьшить за счет учета колебательных состояний различных молекул или изменения диапазонов поиска по энергии верхнего уровня или $\lg A_{ij}$. Последующее тестирование **MOLLIId** на спектрах различных источников позволит решить эту задачу.

Расчет в приближении ЛТР может значительно повысить точность процедуры отождествления. Например, в работах Hamedani Golshan et al. (2024) и Hernández-Hernández et al. (2014) сначала применяется ручной поиск, а после составления полного набора молекул, включая достоверные и предположительные обнаружения, проводится приближение спектров с использованием инструмента **XCLASS**. В работе Sewiło et al. (2018) программный пакет **MADCUBA** (Martín et al., 2019) используется для автоматического поиска переходов и наилучшего соответствия наблюдаемому спектру. Применение ЛТР-приближения в **MOLLIId** позволит разделить близкие переходы ($\Delta\nu \leq 0.0005$ ГГц) и блендируемые линии, а также точнее выбрать наиболее подходящий переход для конкретных физических условий. Эти дополнительные преобразования кода, которые не были нам необходимы для спектров YSO S1 и YSO S2, мы планируем совершить в дальнейшем, при анализе более сложных спектров, где вместо отдельных линий — перекрывающийся «лес».

Благодаря высокой чувствительности проведенных наблюдений была подтверждена гипотеза о том, что МЗО YSO S2 находится на стадии горячего ядра (Kirsanova et al., 2021), когда из-за повышения температуры пыли начинается испарение льдов пылинок и сложные органические молекулы появляются в газовой фазе. В то время как в работах Plakitina et al. (2024, 2025) не было обнаружено линий с высокими энергиями и был проведен анализ более холодной оболочки, где возникают сравнительно узкие линии с ширинами 4–5 км с $^{-1}$, в нашей работе убедительно доказано наличие горячего газа в YSO S2. О том, что в этом МЗО происходит испарение мантий пылинок, можно судить по наличию линий HDO в спектре

(см. таблицу 4), а в нашей работе (Kirsanova and Farafontova, 2025) было показано, что испарение началось относительно недавно.

Обнаруженное нами преобладание углеродсодержащих соединений и увеличенное обилие соединений серы встречается не во всех МЗО. Например, физические условия и химический состав горячих ядер были оценены в работе Duan et al. (2025), где авторы предполагают, что близкие (около 2'') источники ММ1 и ММ2 находятся на разных эволюционных стадиях, так как в одном из объектов наблюдаются сложные органические молекулы, а в другом — более простые соединения. Согласно результатам, полученным в нашей работе, источники YSO S1 и YSO S2 также могут находиться на разных эволюционных стадиях.

Наиболее распространенными в ММ1 и ММ2 оказались углеродсодержащие соединения, а наименее распространенными — серосодержащие. Азотсодержащих соединений было обнаружено в два раза меньше, чем кислородсодержащих. По результатам нашей работы количество отождествленных серосодержащих молекул значительно превышает количество азотсодержащих, что противоречит выводам Duan et al. (2025), но качественно соответствует увеличенному количеству серосодержащих молекул по сравнению с азотсодержащими в SgrB2(N3) и SgrB2(N5) (см. рис. 9 из Duan et al., 2025).

Индикаторами физических условий газа в горячем ядре выступают такие сложные органические соединения, например, такие как CH_3CN , CH_3OH , CH_3CCH . Вращательные переходы молекулы CH_3CN из-за особенностей строения состоят из близко расположенных K -компонент, которые трассируют увеличение энергии возбуждения переходов. CH_3CCH имеет низкую температуру возбуждения по сравнению с другими сложными органическими молекулами в межзвездной среде, например CH_3CN и CH_3OCH_3 . Calcutt et al. (2019) предположили, что CH_3CCH является молекулой, которая отслеживает границу между горячими ядрышками и более холодной оболочкой и распространяется дальше в оболочку. Обилие CH_3CCH в различных объектах (см. Lin et al., 2022) показывает, что эта молекула не чувствительна для отслеживания тепловой десорбции выше 100 К в областях горячих ядер. В нашей работе были отождествлены переходы CH_3CCH по большей части с $E_u < 300$ К. Найденное нами значение T_{ex} соответствует низкотемпературной (меньше 100 К) компоненте газа, что согласуется с результатами Lin et al. (2022).

Полученное в нашей работе разделение на низкоэнергетический и высокоэнергетический компоненты для молекул CH_3CN , CH_3OH было отмечено для других объектов и некоторых других мо-

лекул, например, в работах Bouscasse et al. (2024) для CH_3CN , CH_3OH и многих других сложных органических молекул, в Kalenskii and Mikheeva (2023) для CH_3OH , в Wang et al. (2013) для молекулы SO_2 . В основном обнаруженное разделение интерпретируется таким образом, что низкоэнергетические линии появляются в холодных областях, а высокоэнергетические — в горячих. Высокоэнергетические переходы, например, для CH_3OH могут быть оптически толстыми, что способно повлиять на оценки температуры возбуждения и полученное разделение на два компонента.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен программный пакет **MOLLID**, разработанный для упрощения анализа больших объемов спектральных данных и отождествления линий излучения молекул в суб- и миллиметровом диапазонах. Программный пакет применен к шести диапазонам наблюдательных спектров (от 202 до 260 ГГц) источников YSO S2 и YSO S1 из области звездообразования RCW 120. По результатам работы мы делаем следующие выводы.

- В спектрах YSO S2 мы отождествили около 407 линий, принадлежащих 79 молекулам. Среди найденных соединений встречаются как простые двухатомные молекулы (такие как SO , C^{34}S , NS), так и сложные органические молекулы с числом атомов до девяти (например, CH_3OCH_3). Наиболее распространенной молекулой среди всех является CH_3OH .
- Самой многочисленной группой молекул являются углеродсодержащие соединения. За ними следуют кислородсодержащие молекулы, CH_3 -группа, серосодержащие и азотсодержащие молекулы. Доля неидентифицированных линий составляет три линии, или 0.7% от общего числа спектральных линий на уровне больше 3–7 σ .
- В спектрах источника YSO S1 было идентифицировано 100 линий 40 молекул: от простых (например, C^{34}S , SO , OCS , H_2S , H_2CS , SiO) до сложных органических (например, $\text{CH}_3\text{O}^{13}\text{CHO}$, CH_3COOH , CH_3CHO , CH_3OH , CH_3CN , CH_3CCH).
- Неотождествленными осталось около 1% от общего числа линий.
- Обнаружение линий с высокими энергиями молекул CH_3OH , CH_3CN и CH_3CCH позволило подтвердить наличие горячего ядра в YSO S2, где происходит испарение мантий пылинок. В YSO S1 эти линии не были обнаружены, что говорит о более ранней стадии звездообразования в нем.

В дальнейшей работе мы планируем повысить точность отождествления, добавив приближение наблюдаемых спектров при условии ЛТР.

БЛАГОДАРНОСТИ

В этом исследовании использовались данные с ресурса APEX (<https://www.apex-telescope.org/telescope/efficiency/index.php>), а также базы данных JPL и CDMS (<https://cdms.astro.uni-koeln.de>). Наблюдения проводились на телескопе APEX в рамках заявки E-0109.C-0623A-2022 (руководитель: М. С. Кирсанова), наблюдательное время ESO.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа была поддержана грантом Российского научного фонда № 24-22-00097.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. Allen, F. F. S. van der Tak, Á. Sánchez-Monge, et al., *Astron. and Astrophys.* **603**, id. A133 (2017). DOI:10.1051/0004-6361/201629118
2. V. Belitsky, M. Bylund, V. Desmaris, et al., *Astron. and Astrophys.* **611**, id. A98 (2018). DOI:10.1051/0004-6361/201731883
3. H. Beuther, Q. Zhang, T. K. Sridharan, et al., *Astron. and Astrophys.* **454** (1), 221 (2006). DOI:10.1051/0004-6361:20064887
4. L. Bouscasse, T. Csengeri, F. Wyrowski, et al., *Astron. and Astrophys.* **686**, id. A252 (2024). DOI:10.1051/0004-6361/202348803
5. H. Calcutt, E. R. Willis, J. K. Jørgensen, et al., *Astron. and Astrophys.* **631**, id. A137 (2019). DOI:10.1051/0004-6361/201936323
6. L. Deharveng, A. Zavagno, F. Schuller, et al., *Astron. and Astrophys.* **496** (1), 177 (2009). DOI:10.1051/0004-6361/200811337
7. C. Duan, Q. Gou, T. Liu, et al., *Astrophys. J.*, **988** (1), id. 95 (2025). DOI:10.3847/1538-4357/addbd6
8. D. Erb, Pybaselines: A Python Library of Algorithms for the Baseline Correction of Experimental Data. Version v1.1.0. (2024). DOI:10.5281/zenodo.10676584
9. M. Figueira, A. Zavagno, L. Deharveng, et al., *Astronomy and Astrophysics* **600**, A93 (2017). DOI:10.1051/0004-6361/201629379
10. C. Gieser, D. Semenov, H. Beuther, et al., *Astron. and Astrophys.* **631**, id. A142 (2019). DOI:10.1051/0004-6361/201935865
11. A. Ginsburg and J. Mirocha, PySpecKit: Python Spectroscopic Toolkit, *Astrophysics Source Code Library*, record ascl:1109.001 (2011).
12. R. Hamedani Golshan, Á. Sánchez-Monge, P. Schilke, et al., *Astron. and Astrophys.* **688**, id. A3 (2024). DOI:10.1051/0004-6361/202349077
13. R. Güsten, L. Å. Nyman, P. Schilke, et al., *Astron. and Astrophys.* **454** (2), L13 (2006). DOI:10.1051/0004-6361:20065420
14. U. Haud, *Astron. and Astrophys.* **364**, 83 (2000).
15. J. D. Henshaw, S. N. Longmore, J. M. D. Kruijssen, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **457** (3), 2675 (2016). DOI:10.1093/mnras/stw121
16. V. Hernández-Hernández, L. Zapata, S. Kurtz, and G. Garay, *Astrophys. J.* **786** (1), article id. 38 (2014). DOI:10.1088/0004-637X/786/1/38
17. M. Juvela and D. Tharakkal, *Astron. and Astrophys.* **685**, id. A164 (2024). DOI:10.1051/0004-6361/202349044
18. S. V. Kalenskii and E. A. Mikheeva, *Astronomy Reports* **67** (12), 1303 (2023). DOI:10.1134/s106377292312003x
19. M. S. Kirsanova and A. A. Farafontova, *Astronomy Letters* **51** (2), 111 (2025). DOI:10.1134/S1063773725700252
20. M. S. Kirsanova, S. V. Salii, S. V. Kalenskii, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **503** (1), 633 (2021). DOI:10.1093/mnras/stab499
21. Y. Lin, F. Wyrowski, H. B. Liu, et al., *Astron. and Astrophys.* **658**, id. A128 (2022). DOI:10.1051/0004-6361/202142023
22. R. R. Lindner, C. Vera-Ciro, C. E. Murray, et al., *Astron. J.* **149** (4), article id. 138 (2015). DOI:10.1088/0004-6256/149/4/138
23. S. Martín, J. Martín-Pintado, C. Blanco-Sánchez, et al., *Astron. and Astrophys.* **631**, id. A159 (2019). DOI:10.1051/0004-6361/201936144
24. T. Möller, C. Endres, and P. Schilke, *Astron. and Astrophys.* **598**, id. A7 (2017). DOI:10.1051/0004-6361/201527203
25. H. S. P. Müller, S. Thorwirth, D. A. Roth, and G. Winnewisser, *Astron. and Astrophys.* **370**, L49 (2001). DOI:10.1051/0004-6361:20010367
26. H. Pickett, R. Poynter, E. Cohen, et al., *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **60** (5), 883 (1998). DOI:10.1016/S0022-4073(98)00091-0
27. K. V. Plakitina, M. S. Kirsanova, and D. S. Wiebe, *Astrophysical Bulletin*, **80** (3), 348 (2025). DOI:10.1134/S1990341325600073
28. K. V. Plakitina, M. S. Kirsanova, S. V. Kalenskii, et al., *Astrophysical Bulletin* **79** (2), 235 (2024). DOI:10.1134/S1990341324600455
29. M. Riener, J. Kainulainen, J. D. Henshaw, et al., *Astron. and Astrophys.* **628**, id. A78 (2019). DOI:10.1051/0004-6361/201935519
30. R. Rolffs, P. Schilke, Q. Zhang, and L. Zapata, *Astron. and Astrophys.* **536**, id. A33 (2011). DOI:10.1051/0004-6361/201117112
31. M. Sewiło, R. Indebetouw, S. B. Charnley, et al., *Astrophys. J.* **853** (2), article id. L19 (2018). DOI:10.3847/2041-8213/aaa079

32. C. Vastel, S. Bottinelli, E. Caux, et al., in *Proc. Annual Meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics (SF2A-2015), Toulouse, France, 2015*, Ed. by F. Martins, S. Boissier, V. Buat, et al. (2015) pp. 313–316. online at <https://sf2a.eu/proceedings/2015/book.pdf>

33. K.-S. Wang, T. L. Bourke, M. R. Hogerheijde, et al., *Astron. and Astrophys.* **558**, A69 (2013).

DOI:10.1051/0004-6361/201322087

34. A. Zavagno, M. Pomarès, L. Deharveng, et al., *Astron. and Astrophys.* **472** (3), 835 (2007).
DOI:10.1051/0004-6361:20077474

35. A. Zernickel, P. Schilke, A. Schmiedeke, et al., *Astron. and Astrophys.* **546**, id. A87 (2012).
DOI:10.1051/0004-6361/201219803

MOLLIId: Software for Automatic Identification of Spectral Molecular Lines and Its Application to the Spectra of Protostars from the Region RCW 120

A. A. Farafontova¹, M. S. Kirsanova¹, and S. V. Salii²

¹Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, 119017 Russia

²Ural Federal University, Yekaterinburg, 620062 Russia

In this work, we present the program **MOLLIId** (MOlecular Line Identification) for automated molecular line approximation with a Gaussian profile. Molecular identification was performed using multi-level comparison of the lines' center frequencies and rest frequencies from the spectroscopic database. The program was tested in the identification of molecular lines in observational spectra of young stellar objects RCW 120 YSO S1 and RCW 120 YSO S2, located near the border of the RCW 120 PDR. In the spectra of the RCW 120 YSO S1 source, 100 lines of 41 molecules were identified over the level of $4-6\sigma$. In the spectra of the RCW 120 YSO S2 source, 407 lines of 79 molecules were identified over the $3-5\sigma$ level. Using Intel Core i7-12700K CPU, identification time is equal to 6 and 8 minutes per spectral range for the YSOs S1 and S2, respectively. From the analysis of CH₃OH, CH₃CN, CH₃CCH molecules identified in RCW 120 YSO S2 we found a two-component structure and estimated the physical parameters in the LTE approximation for each of the components.

Keywords: *lines: identification—stars: formation—ISM: molecules*