

ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРОВ МОЛЕКУЛ В ОБЛАСТИ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ S255IR-SMA1

А. А. Фарафонтова, С. В. Салий

Уральский федеральный университет

В работе исследуются спектры области S255IR-SMA1, полученные на телескопе IRAM30m. В спектрах были отождествлены линии некоторых органических молекул с помощью программных пакетов GILDAS CLASS и MADCUBA. Для выделенных переходов молекул были рассчитаны температуры возбуждения и оценены лучевые концентрации. По значениям яркостных температур линий молекулы CH_3CN , полученных из приближения спектров в программе CLASS, была построена вращательная диаграмма и оценены вращательная температура (63 K) и лучевая концентрация CH_3CN ($1.2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$). И в пакете MADCUBA оценены температуры возбуждения и лучевые концентрации отдельных переходов ряда молекул. Получено, что наблюдаемое излучение молекул HNO_3 , CH_3CN , CH_3OH соответствует горячему ядру с температурой более 300 K, излучение C_2H , HNO , HNCO , HCCO — более холодной молекулярной оболочке с температурами около 50 K.

AN INVESTIGATION OF MOLECULAR SPECTRA IN STAR FORMATION REGION S255IR-SMA1

A. A. Farafontova, S. V. Salii

Ural Federal University

In this paper we study the spectra of the S255IR-SMA1 region observed at the IRAM30m telescope. The lines of some organic molecules were identified in the spectra using the CLASS and MADCUBA software packages. Excitation temperatures and column densities were calculated for the detected molecules. Rotational diagrams were plotted for the lines of CH_3CN molecules using the obtained brightness temperatures from the CLASS program. Estimates of the rotation temperature of 63 K and the column density of the molecule that equals $1.2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ were obtained. In this work we show that the emission of such molecules as HNO_3 , CH_3CN , CH_3OH is excited in hot region of the core with temperatures above 300 K. Emission of molecules C_2H , HNO , HNCO , HCCO is excited in colder part of the outer shell region with temperatures near 50 K.

Характерным этапом образования массивных звезд является фаза горячего ядра, в которой высокие обилия молекул встречаются в газе и в ледяных мантиях пылевых частиц, находящихся в более холодной оболочке, расположенной вокруг молодого звездного объекта. В спектрах горячих ядер наблюдаются органические молекулы, такие как CH_3OH , C_2H , CH_3CN , CH_4 , HCOOH , OCN^- , HC_3N и др. Одни молекулы, например, CH_3CN , HNCO , CH_3OCH_3 , $\text{C}^{13}\text{H}_3\text{OH}$, считаются индикаторами температуры и плотности газа в плотной и горячей части ядра [1]. Другие молекулы, например, C_2H [2], HCOOH , CH_2CHO , наблюдаются в более холодных частях оболочки. Следовательно, из анализа излучения линий можно получить представление о распределении молекул по температуре и о том, в какой части объекта они могут наблюдаться.

S255IR является известной областью образования массивных звезд. Особенно выделяется вращающееся плотное ядро S255IR-SMA1, которое предположительно является диском

вокруг массивного (около $20 M_{\odot}$) молодого звездного объекта [3]. Наблюдения S255IR-SMA1, используемые в работе, проводились в 2019 г. на телескопе IRAM 30-м автором работы [4].

В работе было проведено исследование спектров с помощью двух программ: GILDAS CLASS² и MADCUBA [5]. В программе CLASS были идентифицированы молекулы C_2H , CH_3CN , HNO_3 , CH_3OH , $C^{13}H_3OH$, $HNCO$ и с помощью гауссового приближения оценены лучевые скорости, интенсивности и ширины линий этих молекул. В программе MADCUBA отождествление линий молекул выполняется автоматически (см. пример отождествления линий CH_3CN , C_2H , CH_3OH , $HCCO$ в MADCUBA на рис. 1). С помощью приближения ЛТР в программе MADCUBA были оценены температуры возбуждения переходов, соответствующих наблюдавшимся линиям, и лучевые концентрации молекул (см. таблицу). Примеры того, как модельные профили при полученных параметрах описывают наблюдаемые спектры, приведены на рис. 2 и 3. На рис. 2 видно, что не все линии в модели (в программе MADCUBA) приближаются одинаково хорошо, поскольку при построении модельного спектра задается одинаковая ширина линии для всех линий, а это не всегда соответствует наблюдениям.

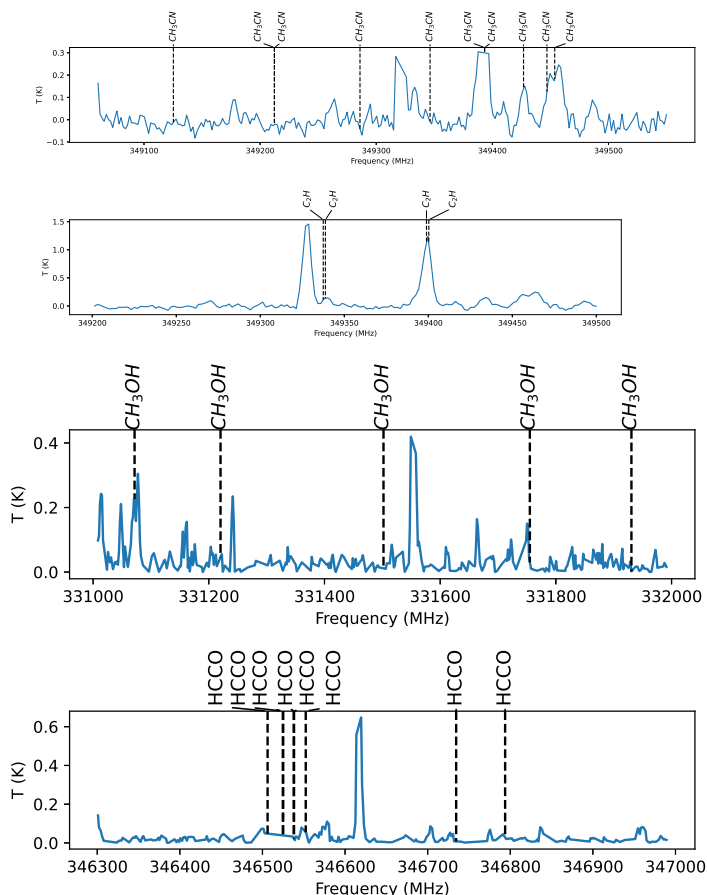


Рис. 1. Пример отождествления в программе MADCUBA линий CH_3CN , C_2H , CH_3OH , $HCCO$ в спектрах S255IR-SMA1

²<https://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS/>

Оценки температуры T_{ex} (среднее значение температур возбуждения наиболее ярких переходов) и лучевой концентрации N_{col} молекул, определенные в программе MADCUBA

Молекула	$\log_{10}(N_{col} \times 10^{14}, \text{см}^{-2})$	T_{ex}, K
C ₂ H	1.42	50
HNO	1.31	56
HNO ₃	1.54	362
HNCO	1.41	41
HCCO	1.41	84
CH ₃ CN	1.35	104
CH ₃ OH	1.54	70

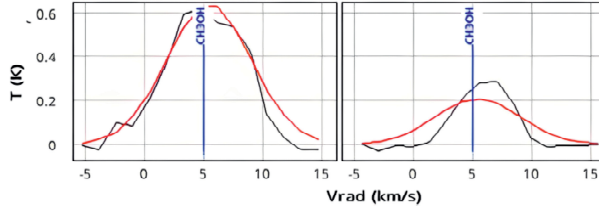


Рис. 2. Примеры приближения в программе MADCUBA наблюдаемых спектров линий CH₃OH гауссианами (красные линии), полученными в модели с параметрами, приведенными в таблице

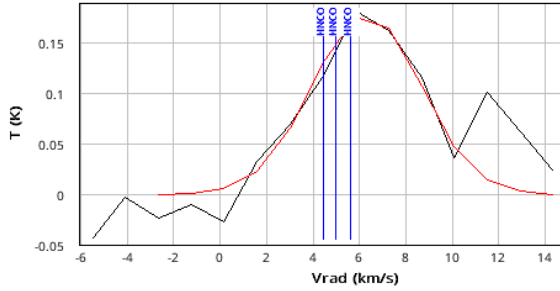


Рис. 3. Примеры приближения в программе MADCUBA наблюдаемых спектров линий HNCO гауссианами (красная линия), полученными в модели с параметрами, приведенными в таблице

Значения температур и лучевых концентраций, полученные в MADCUBA, были сопоставлены с аналогичными значениями, полученными из построения вращательных диаграмм. Для построения вращательных диаграмм были использованы определенные в пакете CLASS интегральные интенсивности уверенно зарегистрированных линий рассматриваемых молекул. Для каждой линии рассчитывалось соотношение

$$\ln \frac{3kW}{8\pi^3\nu_0 S\mu^2} = \ln \frac{N}{Q_{rot}} - \frac{E_u}{kT_{rot}}. \quad (1)$$

Величина $W = \int T_R dV$, где T_R — наблюдаемая интенсивность линии, умноженная на фактор заполнения ff ; $S\mu^2$ — произведение силы линии на квадрат постоянного дипольного момента, k — постоянная Больцмана; N — лучевая концентрация молекулы; ν_0 — центральная частота линии; E_u — энергия, соответствующая верхнему уровню; Q_{rot} — статистическая сумма. Значения статистической суммы, а также произведения силы линии на квадрат постоянного дипольного момента приводятся в каталогах молекулярных линий. Исходя из выражения 1 наклон графика зависимо-

сти $\ln \frac{3kW}{8\pi^3\nu_0 S \mu^2}$ от E_u/k будет обратно пропорционален $-T_{rot}$, а точка пересечения графика с осью ординат равна $\ln(N/Q_{rot})$.

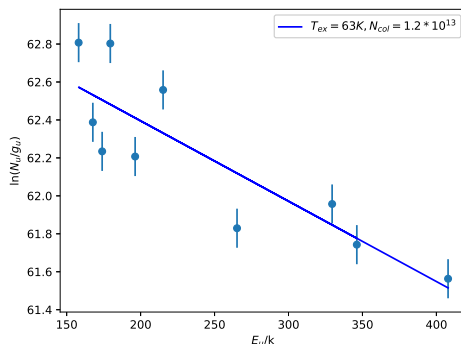


Рис. 4. Вращательная диаграмма, построенная по линиям молекулы CH_3CN , соответствующим переходам серий 19 – 18 и 18 – 17

По вращательной диаграмме (рис. 4) для линий, соответствующих переходам серий 19 – 18 и 18 – 17 молекулы CH_3CN , оценены вращательная температура, 63 K, и лучевая концентрация CH_3CN , $1.2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Очевидно, что температуры и лучевые концентрации, оцененные по вращательной диаграмме, ощутимо ниже значений, рассчитанных **MADCUBA**. Поскольку и в том и в другом методах используется приближение ЛТР, то расхождение в оценках, видимо, обусловлено использованием разной выборки линий: в методе вращательных диаграмм мы использовали лишь уверенно ($> 3 \sigma$) зарегистрированные линии, а в пакете **MADCUBA** в процесс оценки автоматически вовлекаются все переходы, присутствующие в рассматриваемом диапазоне частот. Но этот вывод предварительный, необходимо дальнейшее исследование.

По температурам, оцененным в пакете **MADCUBA** (см. таблицу), можно сделать вывод, что излучение молекул HNO_3 , CH_3CN , HCCO и CH_3OH возбуждается в горячем ($\geq 70 \text{ K}$) ядре, а излучение молекул C_2H , HNO , HNCO — в более холодной оболочке, что согласуется с выводами работы [1], сделанными для молекул CH_3CN , CH_3OH .

Работа С. В. Салий выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема FEUZ-2023-0019.

Библиографические ссылки

- [1] *Bisschop S., Jorgensen J., Dishoeck E., De Wachter E.* Testing grain-surface chemistry in massive hot-core regions // *Astronomy and Astrophysics*. — 2007. — Vol. 465.
- [2] *Beuther H., Semenov D., Henning Th., Linz H.* Ethynyl (C_2H) in Massive Star formation: Tracing the Initial Conditions? // *The Astrophysical Journal*. — 2008. — Vol. 675, № 1. — P. L33–L36.
- [3] *Zinchenko I., Liu S.-Y., Su Y.-N., Sobolev A. M.* Detection of a new methanol maser line with ALMA // *A&A*. — 2017. — Vol. 606. — P. L6.
- [4] *Салий С. В.* Оценка физических условий в области звездообразования S255IR-SMA1 // *Астрономия и исследование космического пространства*. (Екатеринбург, 2021). — С. 178–181.
- [5] *Martín S., Martín-Pintado J., Blanco-Sánchez C. et al.* Spectral Line Identification and Modelling (SLIM) in the MAdrid Data CUBe Analysis (MADCUBA) package - Interactive software for data cube analysis // *A&A*. — 2019. — Vol. 631. — P. A159.