

Обработка спектров метанольных мазеров, полученных на 100-метровом радиотелескопе в Эффельсберге

Ю. С. Воротынцева^{1,2}

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
yuvorotynceva@yandex.ru

Аннотация. Мазеры на переходах 25, 36 и 44 ГГц в молекуле метанола CH_3OH наблюдались в 22 объектах Млечного Пути, расположенных на галактоцентрических расстояниях от 4 до 13 килопарсек (кпс). Спектроскопические наблюдения проводились в январе 2022 г. на 100-метровом радиотелескопе в Эффельсберге (Германия). Проведена калибровка полученных спектров по энергиям. Для обнаружения слабых эмиссионных линий использовалась процедура сложения отдельных экспозиций. В результате такой обработки в 12 источниках обнаружены переходы в линиях 2₂-2₁E, 3₂-3₁E, 4₂-4₁E, 5₂-5₁E, 6₂-6₁E, 7₂-7₁E, 4₁-3₀E и 7₀-6₁A⁺.

Ключевые слова: межзвездная среда; мазеры; методы; эксперимент; спектроскопия

I. ВВЕДЕНИЕ

Космические мазеры – это вынужденное когерентное микроволновое излучение, генерируемое в различных астрономических объектах. Обычно мазерные эффекты дает эмиссия, возникающая в результате переходов между вращательно-колебательными уровнями энергии в таких молекулах, как H_2 , OH, H_2O , NH_3 , SiO, CH_3OH . Мазерное излучение чрезвычайно чувствительно к физическим параметрам среды, поэтому его наблюдение является важным источником сведений о магнитных полях, плотности и температуре газа в зоне генерации. С развитием прецизионных методов наблюдения (высокое спектральное и пространственное разрешение, высокое отношение сигнала к шуму) появилась возможность использовать космические мазеры в фундаментальных физических исследованиях таких, как обнаружение гравитационных волн, оценка значения постоянной Хаббла или измерение вариаций отношения массы электрона к массе протона (m_e/m_p) на космических масштабах. В частности, для решения этой последней задачи особенно эффективными оказались мазеры на переходах в молекуле метанола CH_3OH благодаря высокой чувствительности энергии переходов именно к значениям m_e/m_p . Однако недавние квантово-механические расчеты [1] и наблюдения [2] показали, что для мазерной генерации в метаноле решающее

значение имеет сверхтонкая структура молекулы CH_3OH и механизм этой генерации пока не понятен. Для изучения данной проблемы в январе 2022 г. были проведены обширные наблюдения на 100-метровом радиотелескопе в Эффельсберге, а обработка и анализ наблюдений выполняется в настоящее время в рамках проекта Российского научного фонда.

В данном докладе представлены первые результаты обработки спектральных наблюдений с радиотелескопа в Эффельсберге. Были проведены наблюдения 22 мазерных источников (список источников с их галактоцентрическими расстояниями R и значениями радиальных скоростей V_{LSR} на частоте 44 ГГц представлен в табл. 1). Схема расположения этих источников на галактической плоскости показана на рис. 1.

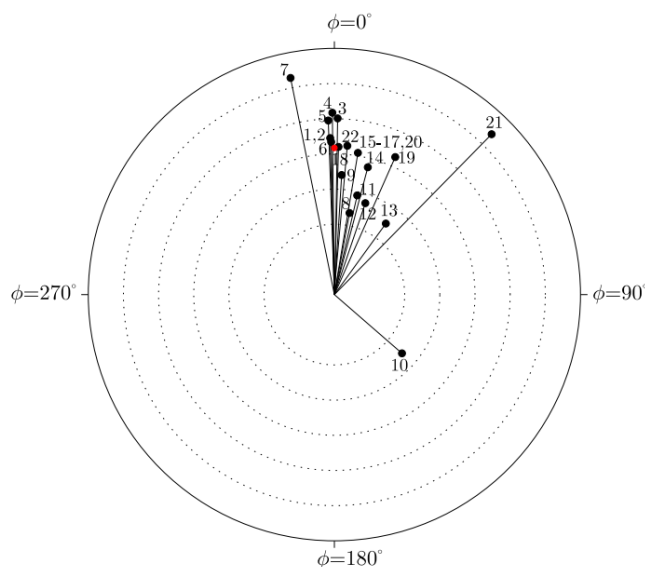


Рис. 1. Схема расположения метанольных мазеров (обозначены цифрами в соответствии с табл. 1) в проекции на плоскость Галактики. Концентрические круги дают галактоцентрические расстояния, начинающиеся с 4 кпс с приращением 2 кпс. Центр Галактики соответствует координатам $(R, \phi) = (0, 0)$, а Солнце (обозначено красным цветом) находится в координатах $(R, \phi) = (8,34 \text{ кпс}, 0)$

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ, №23-22-00124.

ТАБЛИЦА I. СПИСОК НАБЛЮДАЕМЫХ МАЗЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

№	Источник	V_{LSR} , км/с	Галактоцентрическое расстояние, кпс
1	Orion-KL	8,41	8,7
2	G208	11,10	8,7
3	G173	-16,8	10,0
4	G183	-10,38	10,3
5	BGPS7501	10,92	9,9
6	RMS149	7,12	8,9
7	RMS153	44,55	12,6
8	G013	43,62	4,7
9	BGPS2147	18,91	6,8
10	G018	45,77	5,1
11	RMS2879	41,64	5,8
12	G029	60,01	5,5
13	BGPS4518	91,49	5,0
14	RMS3659	22,41	7,5
15	RMS3749	8,71	8,2
16	BGPS6815	13,58	8,2
17	BGPS6820	16,24	8,2
18	G102	0,28	8,4
19	BGPS6863	-6,63	8,6
20	RMS3865	10,19	8,3
21	G095	-85,59	12,8
22	G099	6,24	8,5

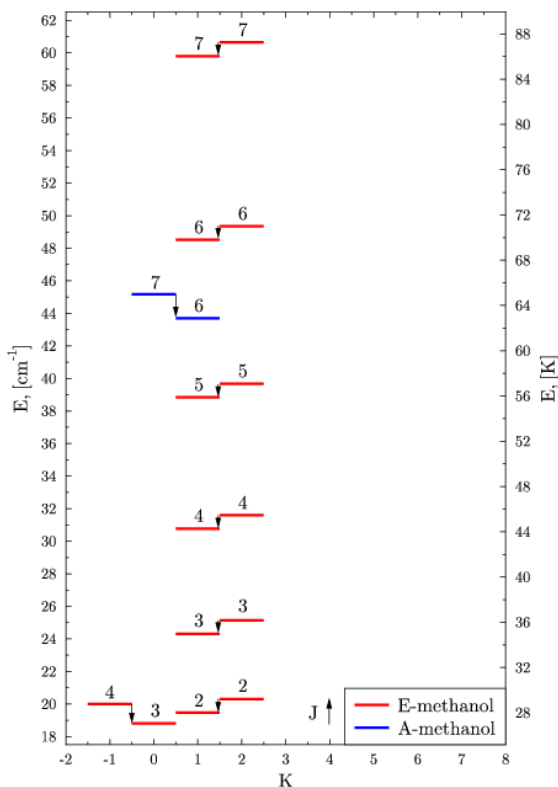


Рис. 2. Наблюдаемые мазерные переходы в метаноле CH_3OH E- и A⁺-типов. Левая ось ординат соответствует энергии перехода в см^{-1} , правая ось ординат – энергии в Кельвинах. На оси абсцисс приведены значения проекции K полного углового момента J на главную ось молекулы

Наблюдения проводились в K-диапазоне на частотах 25 ГГц, 36 ГГц и 44 ГГц (при ширине полосы 300 МГц) с целью обнаружения мазерных переходов в линиях 2_2-2_1E , 3_2-3_1E , 4_2-4_1E , 5_2-5_1E , 6_2-6_1E , 7_2-7_1E , $4_{-1}-3_0\text{E}$, 7_0-6_1A^+ . Указанные переходы отображены на рис. 2. Число каналов спектрометра $l = 65536$, ширина одного

канала $\Delta_{ch} = 4,578$ кГц, что соответствует ширине канала в шкале скоростей 55 м/с на 25 ГГц, 38 м/с на 36 ГГц и 31 м/с на 44 ГГц. Использовался режим наблюдений «Объект–фон» («Position–switching») с периодом переключения, равным 2,5 мин, при этом фон неба из экспозиций вычитался. Результирующее отношение сигнал–шум было $S/N \geq 100$, что для объектов, удаленных на расстояния нескольких кпс, считается очень высоким.

II. КАЛИБРОВКА РАДИОСПЕКТРОВ

Исходные радиоспектры, получаемые на телескопе, не калиброваны по энергиям, поэтому для получения физических характеристик излучения необходима дополнительная обработка.

Поток излучения, принимаемый радиотелескопом, характеризуется антенной температурой T , измеряемой в Кельвинах (К). Общепринятой единицей измерения спектральной плотности потока в радиоастрономии является «янский», $1 \text{ Ян} = 10^{-26} \text{ Вт/м}^2\text{Гц}$. Чтобы перейти от величины антенной температуры к величине спектральной плотности потока, выполняется процедура калибровки, кратко описанная в [5]. Эту процедуру можно разделить на два этапа.

Первый этап заключается в вычислении корректировочного коэффициента K_l , который позволяет учесть следующие факторы. При радиоизмерениях излучение частично поглощается атмосферой, причем для каждой полосы частот степень поглощения различна, а характеризуется она возвышением объекта над горизонтом El и параметром τ , который определен для каждой частоты f , на которой проводятся наблюдения для данного радиотелескопа [6]. Поправка, учитывающая атмосферное поглощение, определяется выражением:

$$\exp\left(\frac{\tau}{\sin El}\right). \quad (1)$$

Помимо этого, необходимо внести еще одну поправку, обусловленную коэффициентом эффективности антенны. Этот коэффициент учитывает, что апертура радиотелескопа получает наибольшую величину потока при возвышении источника над горизонтом около 30 градусов. Для вычисления данной поправки известны формулы, зависящие от частоты принимаемого излучения и от возвышения источника над горизонтом [6]:

$$\begin{cases} f = 25 \text{ ГГц}: \\ G(El) = 0,9540 + 0,00319El - 0,0000542El^2; \\ f = 36 \text{ ГГц}: \\ G(El) = 0,8349 + 0,00831El - 0,0001046El^2; \\ f = 44 \text{ ГГц}: \\ G(El) = 0,7852 + 0,01126El - 0,0001475El^2. \end{cases} \quad (2)$$

Таким образом, корректировочный коэффициент K_l будет определяться отношением величин (1) и (2):

$$K_l = \frac{\exp\left(\frac{\tau}{\sin El}\right)}{G(El)}. \quad (3)$$

Второй этап состоит в определении потока от стандартного источника (т. е., источника радиоизлучения с постоянными и известными величинами потоков). Радиоастрономические стандарты являются источниками континуума. Калибровочный коэффициент K_2 можно определить по соотношению измеренной антенной температуры, которую еще необходимо умножить на корректировочный коэффициент K_1 , и величины потока радиоизлучения от стандартного источника для данной частоты:

$$K_2 = \frac{S_c}{T_c}, \quad (4)$$

где T_c – антенная температура радиоастрономического стандарта (с поправкой на атмосферное поглощение и коэффициент эффективности антенны), а S_c – известная величина спектральной плотности потока излучения стандарта, определяемая по известным формулам, приведенным в работе [7].

Таким образом, чтобы откалибровать радиоспектр данного источника (т.е. получить величину спектральной плотности потока S), необходимо наблюдаемую антенную температуру T умножить на корректировочный коэффициент, определяемый формулой (3), и на калибровочный коэффициент, определяемый формулой (4):

$$S = T \cdot K_1 \cdot K_2 = T \frac{\exp\left(\frac{\tau}{\sin El}\right) \cdot S_c}{G(El)} \cdot \frac{S_c}{T_c}. \quad (5)$$

Значение, полученное по формуле (5), является откалиброванным в физической шкале.

III. СЛОЖЕНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ЦИФРОВЫХ СПЕКТРОВ

Помимо ярких мазерных линий, молекула метанола дает большое количество слабых линий, которые имеют большое практическое значение с точки зрения оценки физических параметров газа в зоне генерации излучения.

Существует несколько подходов для обнаружения слабых молекулярных линий в радиодиапазоне:

- метод спектрально-согласованной фильтрации [3];
- метод МСМС (Монте-Карло на основе цепей Маркова) и методы согласованной фильтрации и сложения спектров [4];
- метод сложения отдельных цифровых спектров.

Для первичной поисковой работы самый простой из перечисленных методов – сложение отдельных цифровых спектров – является вполне адекватным. В частности, он удачно был применен при поиске слабых молекулярных линий на больших красных смещениях в работе [8]. Суть метода заключается в сложении отдельных сканов, полученных для данного источника в данном участке спектра, с целью увеличения величины отношения сигнала к шуму (S/N), обусловленного тем

обстоятельством, что счетные статистики подчиняются распределению Пуассона, для которого

$$S/N \propto \frac{1}{\sqrt{n}},$$

где n – число сканов. Если рассматривать каждый такой скан по отдельности, то слабые линии невозможно выделить на фоне шума (т.к. амплитуда сигнала не превышает 3σ шума), но после сложения сканов из-за результирующего уменьшения дисперсии шума они будут наблюдаться.

Сложение спектров можно проводить в шкале частот или скоростей. Перевод в шкалу скоростей осуществляется по принятой в радиоастрономии формуле:

$$v/c = 1 - \frac{f_{sky}}{f_0},$$

где v – скорость, f_0 – лабораторная частота линии, f_{sky} – измеренная частота в наблюдаемом спектре, c – скорость света.

В процедуре сложения сначала определялись среднее значение величины потока для каждого отдельного скана (путем сложения значений величин потока в каждом канале и делением полученной суммы на число каналов) и среднееквадратическое отклонение. Затем был получен спектр, состоящий из средневзвешенных значений потоков с весами, обратно пропорциональными квадратам среднееквадратических отклонений для каждого отдельного скана. Пример демонстрируется на рис.3.

На рис. 4 представлены спектры всех линий, отождествленных в источнике G173. Линии 3_2-3_1E , 4_2-4_1E и 7_2-7_1E были обнаружены после сложения отдельных спектров.

По результатам применения данного метода к полученным наблюдениям было обнаружено 7 новых слабых эмиссионных линий метанола для переходов 2_2-2_1E , 3_2-3_1E , 4_2-4_1E , 5_2-5_1E , 6_2-6_1E , 7_2-7_1E , $4_{1-}3_0E$ в 12 источниках. Значения полного потока излучения для этих источников в новых линиях представлены в табл. 2:

ТАБЛИЦА II. Полный поток в новых линиях

Источник	$\sum S, \text{ Ян}$						
	2_2-2_1	3_2-3_1	4_2-4_1	5_2-5_1	6_2-6_1	7_2-7_1	$4_{1-}3_0$
OKL	15,2	–	–	–	–	–	–
G173	–	0,5	0,43	–	–	0,34	–
B7501	–	0,3	0,14	0,1	0,04	0,15	–
R149	–	0,45	0,2	0,16	0,08	0,08	–
G013	–	–	–	–	–	0,2	–
R2879	–	0,34	–	–	–	–	–
B4518	1,05	–	–	–	–	–	–
R3659	–	0,26	0,21	0,15	0,05	0,08	–
B6820	–	0,15	0,15	0,2	–	–	–
B6863	–	0,07	–	–	–	–	–
R3865	–	0,13	0,23	–	–	–	–
G095	–	–	–	–	–	–	0,1

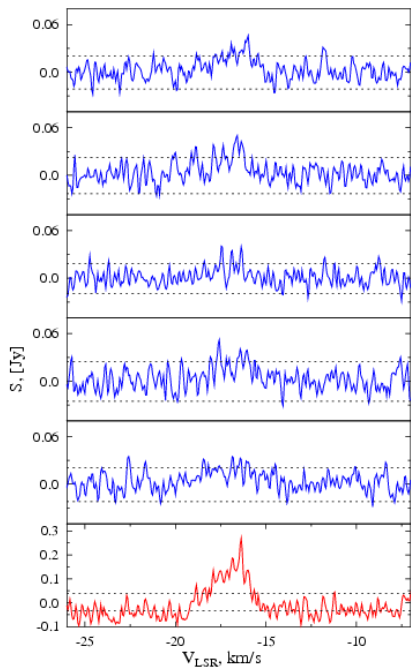


Рис. 3. Результат сложения отдельных цифровых сканов для мазерного источника G173. По оси абсцисс отложены радиальные скорости V_{LSR} в км/с, по оси ординат – плотность потока S в янских. На верхних 5 панелях показаны отдельные сканы, нижняя панель – результат после сложения, отображающий эмиссионную линию на $V_{LSR} = 16,8$ км/с. Пунктирной линией показаны уровни 3σ

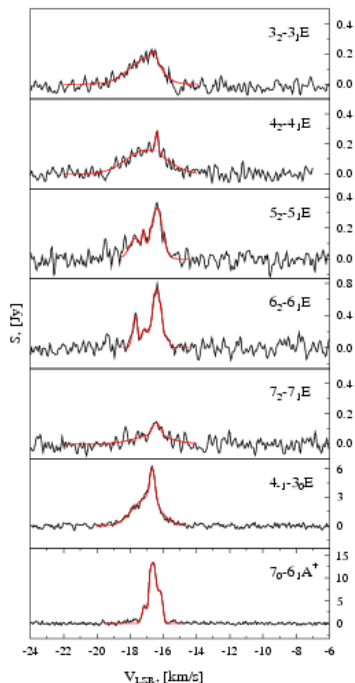


Рис. 4. Спектры линий в источнике G173. Синтетические профили (показаны красным цветом) получены методом минимизации χ^2 в работе [2]. По оси абсцисс отложены радиальные скорости V_{LSR} в км/с, по оси ординат – плотность потока S в янских

Физико-химические параметры в соответствующих молекулярных облаках (кинетическая температура, температура возбуждения, концентрация элементов, относительный химический состав) будут определены в дальнейшем анализе спектральных данных.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы были получены радиоспектры в физических единицах (янские) для мазерных эмиссионных линий, соответствующих переходам в молекуле метанола 2_2-2_1E , 3_2-3_1E , 4_2-4_1E , 5_2-5_1E , 6_2-6_1E , 7_2-7_1E , $4_{-1}-3_0E$, $7_0-6_1A^+$ для 22 мазерных источников. С помощью применения метода сложения отдельных цифровых спектров была обнаружена слабая эмиссия в линиях 2_2-2_1E , 3_2-3_1E , 4_2-4_1E , 5_2-5_1E , 6_2-6_1E , 7_2-7_1E , $4_{-1}-3_0E$ в 12 источниках.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор выражает благодарность своему руководителю профессору Левшакову С.А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Lankhaar, B. et al, “ Characterization of methanol as a magnetic field tracer in star-forming regions”, 2018, Nature Astronomy, 2, 145.
- [2] Levshakov S.A., Agafonova I.I., Bayandina O.S., Gong Y., Henkel C., Kim K.-T., Kozlov M.G., Lankhaar B., Menten K., Ubachs W.M.G., Vallts I.E., Vorotyntseva J.S., Yang W. “Probing the electron-to-proton mass ratio gradient in the Milky Way with class I methanol masers. II – Effelsberg observations”, 2023, MNRAS (in preparation).
- [3] Brett A. McGuire, Ryan A. Loomis, Andrew M. Burkhardt, Kin Long Kelvin Lee, Christopher N. Shingledecker, Steven B. Charnley, Ilsa R. Cooke, Martin A. Cordiner, Eric Herbst, Sergei Kalenskii, Mark A. Siebert, Eric R. Willis, Ci Xue, Anthony J. Remijan, Michael C. McCarthy. “Detection of Two Interstellar Polycyclic Aromatic Hydrocarbons via Spectral Matched Filtering”, 2021, Science, 371.1265M.
- [4] Ryan A. Loomis, Andrew M. Burkhardt, Christopher N. Shingledecker, Steven B. Charnley, Martin A. Cordiner, Eric Herbst, Sergei Kalenskii, Kin Long Kelvin Lee, Eric R. Willis, Ci Xue, Anthony J. Remijan, Michael C. McCarthy, and Brett A. McGuire. “An Investigation of Spectral Line Stacking Techniques and Application to the Detection of HC11N”, 2021, NatAs, 5, 188.
- [5] A. Kraus “Calibration of the Effelsberg 100m telescope”, 2007.
- [6] https://eff100mwiki.mpifr-bonn.mpg.de/doku.php?id=information_for_astronomers:rx_list, обращение от 17.02.2023.
- [7] M.Ott, A. Witzel, A. Quirrenbach, T.P. Krichbaum, K.J. Standke, C.J. Schalinski, and C.A. Hummel. “An updated list of radio flux density calibrators”, A&A, 284, 331-339, 1994.
- [8] Levshakov S.A., Foltz C.B., Chaffee F.H., Black J.H. “Molecules at high redshift. V. Improved limits on the column density of CO in two damped Lyman Alpha absorption systems”, 1989, AJ, 98, 2052.