

Излучение молекулы метанола на частоте 84.5 ГГц в тёмных молекулярных облаках

С. П. Созинова,^{1*} Н. Н. Шахворостова^{2†}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, факультет космических исследований
Россия, 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 52

²Астрокосмический центр Физического Института РАН имени П. Н. Лебедева
Россия, 119991, Москва, Ленинский пр-т, д. 53

(Поступила в редакцию 09.06.2025; подписана в печать 15.09.2025)

В работе представлены результаты наблюдений излучения метанола в линии $5_{-1}-4_0E$ на частоте 84.5 ГГц в направлении на 32 источника — темные молекулярные облака (Infrared Dark Clouds – IRDC) на разных стадиях эволюции. Из 32 источников, наблюдавшихся на 20-метровом радиотелескопе в Онсале в 2019 и 2020 гг., в 24 обнаружено излучение метанола на частоте 84.5 ГГц. Все обнаружения являются новыми. В 5 источниках излучение имеет мазерную природу. Проведено сравнение излучения на 84.5 ГГц с ранее наблюдавшимся излучением на 44 ГГц в направлении на те же источники. Установлено, что между излучением на частоте 44 ГГц и 84.5 ГГц есть корреляция, а профили линий имеют заметное сходство.

PACS: 95.85.Bh, 33.20.Bx, 95.75.Fg, 97.10.Bt

УДК: 520, 524.527.7

Ключевые слова: метанольные мазеры I класса, молекулярные облака, звездообразование.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных задач современной астрофизики является исследование процессов формирования и ранней эволюции массивных звёзд. Начальные условия их образования остаются недостаточно изученными. Известно, что массивные звёзды формируются в темных молекулярных облаках — Infrared Dark Clouds (IRDC), для которых характерна высокая экстинкция света. В связи с этим ранние стадии звездообразования исследуются преимущественно в инфракрасном и радиодиапазонах, а одним из основных инструментов являются космические мазеры.

Космический мазер (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) — это нетепловой источник радиоизлучения, характеризующийся очень высокой яркостной температурой (10^{10} – 10^{12} К) и узкими спектральными линиями (порядка 0.1 км/с). Механизм мазерного излучения связан с усилением излучения линии вследствие индуцированного испускания резонансных фотонов возбуждёнными молекулами среды при инверсной населённости уровней. Важно, что температура возбуждения мазерного перехода и оптическая толщина в соответствующей линии являются отрицательными величинами [1, 2].

Мазерное излучение наблюдается в областях звездообразования, оболочках звёзд и ядрах галактик, а источниками являются молекула метанола CH_3OH и другие.

Молекула CH_3OH широко распространена в Галактике и является важным компонентом межзвёздной среды. Её излучение регистрируется в молекулярных облаках, областях звездообразования и протозвёздных

дисках. Молекула метанола обладает сложной структурой и более чем 200 спектральными переходами [3], среди которых наиболее часто наблюдаются линии на частотах 6.7, 12.2, 36, 44, 84.5, 95 и 96.7 ГГц.

Мазерное излучение метанола часто наблюдается в различных переходах, возникающих при отличающихся физических условиях среды [4, 5]. Это делает метанольные мазеры важными индикаторами процессов в молекулярных облаках и в зонах формирования звёзд, позволяющими определять временные рамки эволюции протозвёзд [6].

Метанольные мазеры, как правило, встречаются в областях образования массивных звёзд. Согласно классификации [7], различают мазеры I и II классов. Мазеры I класса (сИММ) возбуждаются при столкновениях с молекулярным водородом, тогда как мазеры II класса (сПММ) — посредством радиационной накачки [8]. Поэтому сИММ локализуются в зонах с ударными волнами и истечениями, тогда как сПММ непосредственно связаны с протозвёздами.

Из мазеров I класса наиболее изучены линии на частотах 36, 44 и 95 ГГц. Для них выполнено несколько обзорных исследований [9, 10]. Мазеры на частоте 84.5 ГГц исследованы значительно меньше. В литературе представлены лишь отдельные обзоры и работы по конкретным источникам [11–16].

В настоящей работе была поставлена цель — исследовать излучение метанола на частоте 84.5 ГГц в выборке источников, являющихся областями звездообразования на различных стадиях эволюции, в которых ранее излучение на этой частоте не наблюдалось. Также были поставлены задачи сравнить излучение метанола на частоте 84.5 ГГц с излучением на другой хорошо описанной в литературе частоте и идентифицировать метанольные мазеры в анализируемых объектах.

* p.sozinova@lebedev.ru

† shahvorostovann@lebedev.ru

1. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

1.1. Наблюдения

Наблюдательный материал, который использован в данной работе, был получен в процессе наблюдений на 20-метровом телескопе миллиметрового диапазона в Онсальской радиоастрономической обсерватории (Швеция), в течение двух периодов: с 7 по 16 июня 2019 г. и с 5 по 9 марта 2020 г. [17].

Наблюдения проводились в двух частотных диапазонах (полосах) шириной 2.5 ГГц, разнесенных по частоте на 12 ГГц. Нижняя частотная полоса была настроена так, что ее центр соответствовал частоте 85.5 ГГц, а верхняя полоса была центрирована на 97.5 ГГц. Такая настройка позволила охватить намного большее количество молекулярных линий, в том числе линий метилацетилена CH_3CCN и интересующего нас метанола CH_3OH . Эффективность главного луча диаграммы направленности телескопа и полная ширина диаграммы на половинной мощности на частоте 85 ГГц составили 0.6 и 43'', а на частоте 97.5 ГГц – 0.6 и 38''.

1.2. Источники

В настоящей работе исследовались 32 источника — молекулярные ядра в темных плотных облаках межзвёздной среды на разных эволюционных стадиях. Эти облака получили название Infrared Dark Clouds (IRDCs), так как они были впервые открыты как темные области высокой контрастности на ярком инфракрасном фоне Галактики на космическом телескопе ISO (Infrared Space Observatory). По современным представлениям, холодные и плотные темные облака считаются предшественниками звездных скоплений и поэтому подходят для исследования самых ранних стадий образования звезд, в особенности массивных звезд. Типичные размеры IRDC составляют 1–10 пк, а масса от нескольких сотен до нескольких тысяч солнечных масс. Компактные молекулярные ядра в IRDC находятся на ранней стадии звездообразования, и их можно идентифицировать по миллиметровому и субмиллиметровому излучению нагретой пыли. Эти ядра имеют типичный размер 0.02–0.8 пк, массу $10\text{--}10^3$ солнечных масс, температуру 15–30 К и плотность $n(\text{H}_2) \sim 10^3\text{--}10^7\text{ см}^{-3}$.

В выбранных для анализа источниках уже исследовалось излучение метанола на частоте 44 ГГц (переход $7_0\text{--}6_1A+$) в работе [17]. Ни в одном из этих источников ранее не наблюдалась линия метанола на частоте 84.5 ГГц (переход $5_{-1}\text{--}4_0E$), поэтому все полученные результаты являются уникальными для нашей выборки.

1.3. Обработка данных

Данные для 32 исследуемых источников были обработаны с помощью программы CLASS — Continuum and Line Analysis Single-dish Software, предназначенной для обработки спектроскопических данных, полученных с помощью однозеркального радиотелескопа [23]. Для каждой обнаруженной молекулы в источнике были построены профили линий её излучения и получены характеристики этих линий: положение пика линии (скорость пика), ширина линии на полувысоте, амплитуда пика линии и полный поток излучения в линии.

Из 32 источников в 24 были обнаружены линии излучения метанола на частоте 84.5 ГГц. Полученные параметры представлены в табл. 1. Были построены профили линий для этого излучения (см. рис. 1).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Сравнение излучения метанола на частотах 84.5 ГГц и 44 ГГц

Мы сравнили профили линий излучения на частоте 44 ГГц, полученные в работе [17], с профилями, полученными в настоящей работе (см. рис. 2). Профили линий излучения на двух частотах оказались весьма похожи, поэтому был проведен анализ по поиску корреляции между параметрами излучения на этих двух частотах.

Сравнивались параметры полного потока излучения в линии $\int T_{\text{MB}}dV$ на двух частотах для 22 источников (источники G034.77-00.55 и G094.60-01.80 были исключены, так как в них не наблюдалось излучение метанола на частоте 44 ГГц), а так же лучевые скорости источников V_{peak} .

Был рассчитан коэффициент корреляции между параметрами $\int T_{\text{MB}}dV$ для 21 источника на двух частотах и применен метод линейной регрессии для анализа отношения между $\int T_{\text{MB}}dV$ на 84.5 ГГц и $\int T_{\text{MB}}dV$ на 44 ГГц, для оценки значимости и проверки гипотезы об отсутствии зависимости между параметрами излучения для двух частот. Из начальной выборки 22 источников был исключен G024.33+00.11, так как мазерное излучение на 44 ГГц в нём является переменным вследствие вспышек аккреции вещества на протозвезду и сильно отличается от остальных и требует отдельного исследования. Соотношение между $\int T_{\text{MB}}dV$ на частоте 84.5 ГГц и на частоте 44 ГГц представлено на рис. 3.

Значение p-value оказалось близко к нулю, а значение коэффициента корреляции получилось равным 0.87, из-чего был сделан вывод о том, что между излучениями на двух частотах есть корреляция и можно отвергнуть гипотезу об отсутствии зависимости.

Линии переходов на частоте 44 ГГц и 95 ГГц ($7_0\text{--}6_1A+$ и $8_0\text{--}7_1A+$) принадлежат к одной лесенке пере-

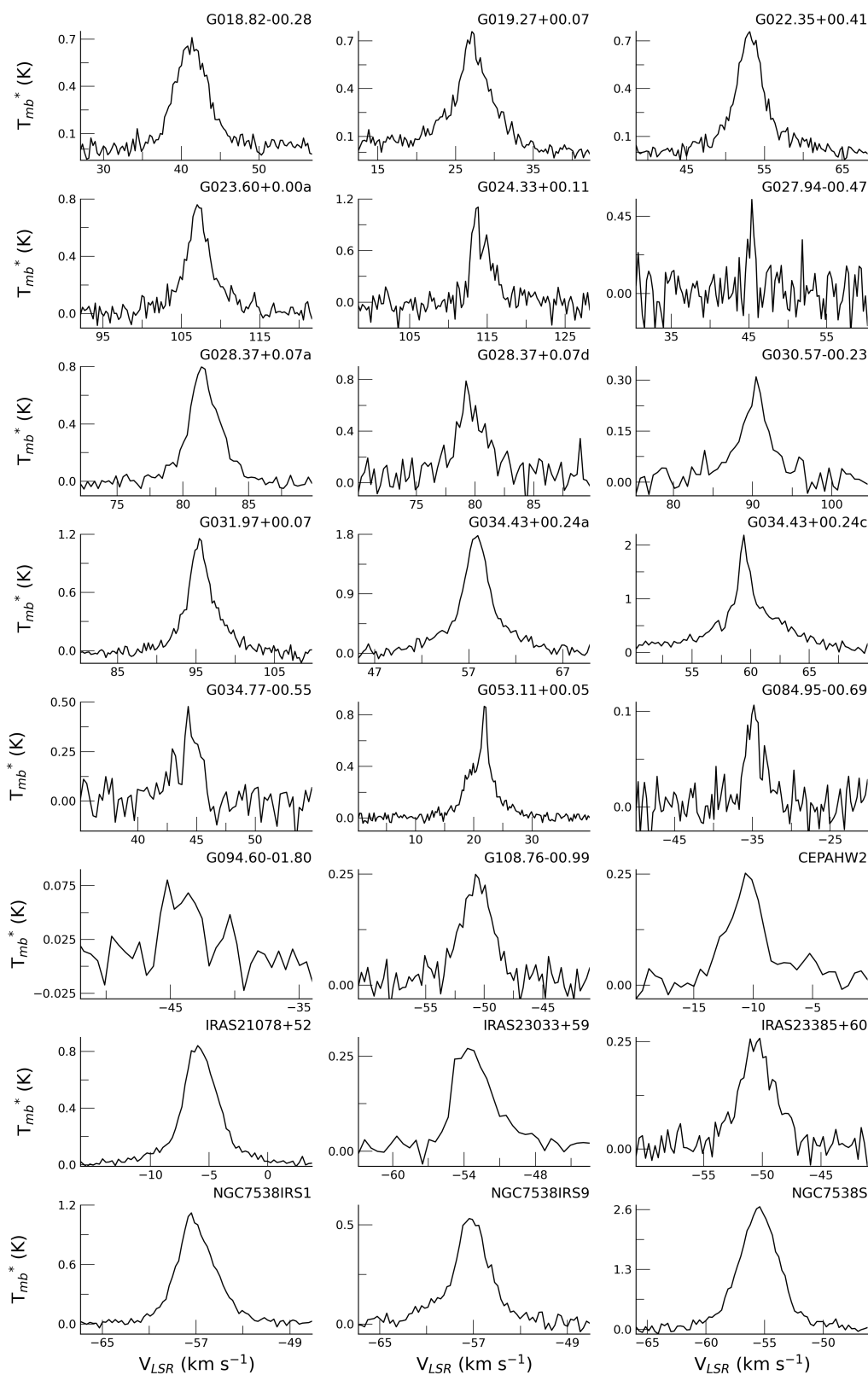


Рис. 1. Профили линий излучения молекулы метанола на частоте 84.5 ГГц

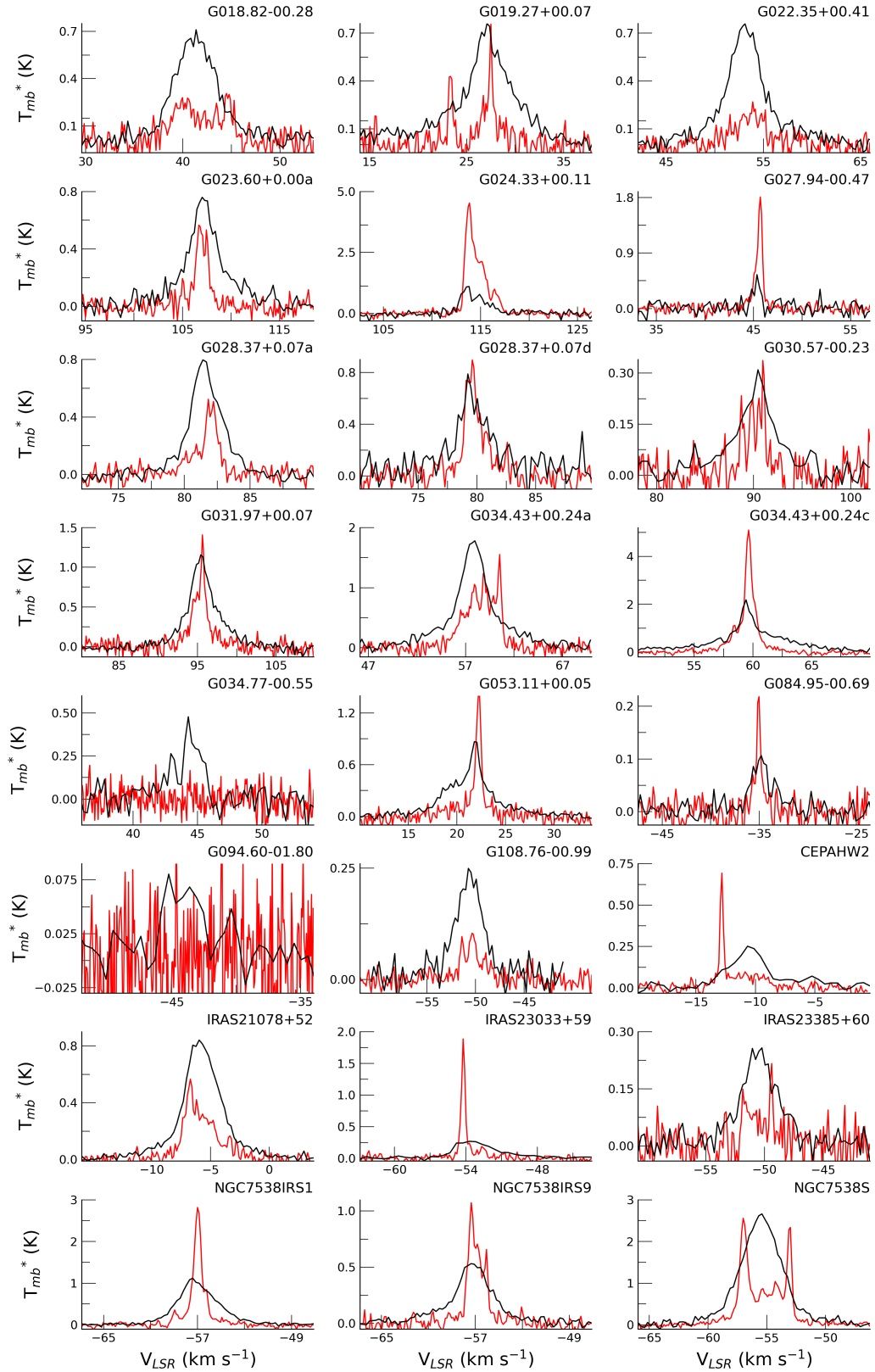


Рис. 2. Сравнение профилей линий излучения метанола на частотах 84.5 ГГц (черные) и 44 ГГц (красные)

Таблица 1. Параметры молекулярных линий метанола $5_{-1}-4_0E$

N	Источник	RA (ч м с)	Dec. (° угл.м угл.с)	$\int T_{MB}dV$ К км с ⁻¹	V_{peak} км с ⁻¹	ΔV км с ⁻¹	T_{peak} К
1	G018.82-00.28	18:25:56.09	-12:42:47.80	3.60 (0.08)	41.29 (0.05)	5.18 (0.14)	0.65
2	G019.27+00.07	18:25:58.48	-12:03:59.10	2.42 (0.13)	27.34 (0.03)	4.35 (0.16)	0.52
				2.53 (0.12)	25.03 (0.41)	16.32 (0.97)	0.15
3	G022.35+00.41	18:30:24.23	-09:10:39.80	2.03 (0.10)	53.08 (0.03)	3.27 (0.10)	0.58
				1.86 (0.10)	53.59 (0.18)	10.61 (0.56)	0.16
4	G023.60+00.00	18:34:11.41	-08:19:08.90	2.90 (0.08)	107.17 (0.05)	4.12 (0.16)	0.66
5	G024.33+00.11	18:35:07.90	-07:35:04.00	2.71 (0.14)	114.09 (0.08)	2.98 (0.19)	0.85
6	G027.94-00.47	18:44:03.60	-04:37:59.80	0.38 (0.07)	45.35 (0.08)	0.82 (0.16)	0.43
7	G028.37+0.07a	18:42:37.59	-04:02:04.90	2.17 (0.04)	81.59 (0.02)	2.78 (0.06)	0.73
8	G028.37+0.07d	18:42:53.98	-04:02:37.40	2.26 (0.20)	79.63 (0.15)	3.81 (0.47)	0.55
9	G030.57-00.23	18:47:59.69	-02:07:27.20	1.25 (0.09)	90.31 (0.15)	4.90 (0.49)	0.24
10	G031.97+00.07	18:49:36.55	-00:45:47.10	4.34 (0.08)	95.53 (0.04)	4.08 (0.10)	1.00
11	G034.43+0.24a	18:53:17.93	+01:25:25.20	4.90 (0.27)	57.96 (0.16)	9.39 (0.51)	0.49
				3.42 (0.21)	57.81 (0.03)	2.48 (0.09)	1.30
12	G034.43+0.24c	18:53:19.93	+01:28:26.40	6.70 (0.34)	60.04 (0.22)	8.76 (0.69)	0.72
				1.59 (0.19)	59.45 (0.04)	1.12 (0.13)	1.33
13	G034.77-00.55	18:56:48.19	+01:18:46.90	0.83 (0.09)	44.35 (0.13)	2.30 (0.30)	0.34
14	G053.11+00.05	19:29:17.20	+17:56:20.90	0.47 (0.03)	21.88 (0.02)	0.90 (0.05)	0.49
				2.73 (0.05)	21.10 (0.06)	6.18 (0.15)	0.42
15	G084.95-00.69	20:55:32.47	+44:06:10.10	0.26 (0.02)	-34.77 (0.11)	2.76 (0.32)	0.09
16	G094.60-01.80	21:39:58.25	+50:14:20.90	0.28 (0.04)	-44.07 (0.25)	4.03 (0.89)	0.07
17	G108.76-00.99	22:58:47.24	+58:45:01.60	0.81 (0.04)	-50.66 (0.08)	3.34 (0.21)	0.23
18	CEPAHW2	22:56:17.97	+62:01:49.50	0.91 (0.07)	-10.63 (0.13)	3.81 (0.38)	0.23
19	IRAS21078+52	21:09:21.64	+52:22:37.50	2.54 (0.03)	-5.77 (0.02)	3.17 (0.04)	0.75
				0.96 (0.06)	-5.58 (0.40)	11.43 (0.89)	0.08
20	IRAS23033+59	23:05:25.00	+60:08:15.40	1.13 (0.05)	-53.30 (0.09)	3.97 (0.24)	0.27
21	IRAS23385+60	23:40:54.40	+61:10:28.20	0.94 (0.04)	-50.46 (0.07)	3.77 (0.19)	0.23
22	NGC7538IRS1	23:13:45.36	+61:28:10.50	4.24 (0.05)	-57.07 (0.02)	3.95 (0.05)	1.01
23	NGC7538IRS9	23:14:01.67	+61:27:19.10	2.01 (0.06)	-57.18 (0.05)	3.77 (0.14)	0.50
24	NGC7538S	23:13:44.86	+61:26:48.10	10.94 (0.15)	-55.48 (0.03)	4.05 (0.07)	2.54

ходов (последовательности переходов с одинаковыми квантовыми числами) и между параметрами излучения на этих частотах наблюдается высокая корреляция [18]. Высокая корреляция так же наблюдается между излучением на частоте 36 ГГц, соответствующем переходу $4_{-1}-3_0E$, и на частоте 84.5 ГГц, переход $5_{-1}-4_0E$ [13]. Эти две линии принадлежат к одной лесенке переходов.

Мы же оценили корреляцию между интенсивностью линий в переходах из разных лесенок (44 и 84 ГГц) и подтвердили наличие такой связи и в этом случае.

Также было проведено сравнение лучевых скоростей пиков линий V_{peak} для двух частот. Были посчитаны медианы и средние значения для них. Медианы оказались равны 36.12 км/с для 44 ГГц и 34.31 км/с для

84 ГГц, а средние значения 22.87 км/с для 44 ГГц и 22.72 км/с для 84 ГГц. Соотношение между скоростями пиков на частотах 84.5 ГГц и 44 ГГц представлена на рис. 4.

Условия возбуждения мазеров на разных частотах немного разные, что означает, что мазеры 44 и 84.5 ГГц могут возникать в разных частях источника. Лучевые скорости тоже при этом будут различаться. Наши результаты согласуются с этим фактом.

2.2. Поиск метанольных мазеров 84.5 ГГц

Не во всех источниках, где наблюдалось метанольное излучение на 84.5 ГГц, оно является мазерным. Исходя из критерия ширины линий, который заклю-

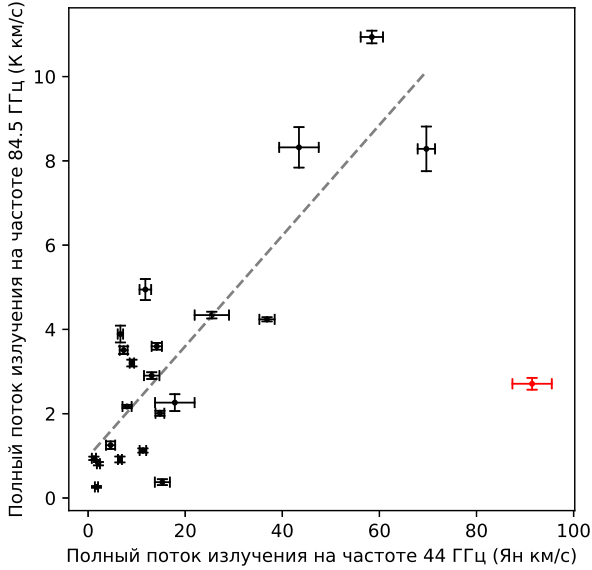


Рис. 3. Соотношение между значениями интегральной интенсивности на частотах 44 и 84.5 ГГц вида $y = kx + b$. Красная точка соответствует источнику G024.33+00.11

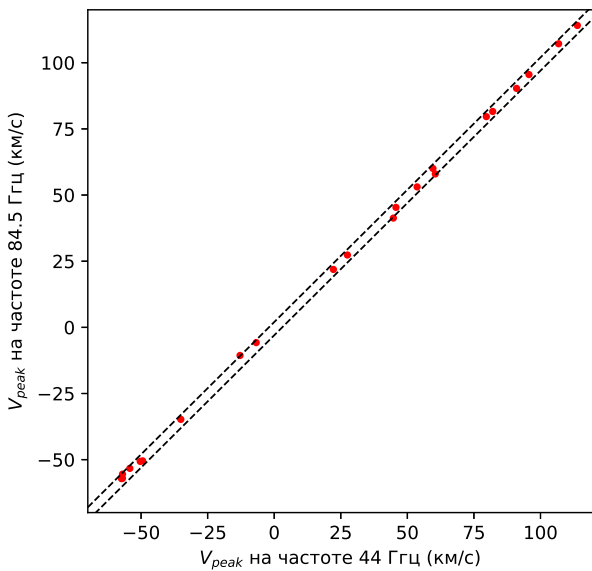


Рис. 4. Соотношение пиковых скоростей на частотах 84.5 ГГц и 44 ГГц. Пунктирными линиями обозначен разброс в 5 км/с

чается в том, что мазерные линии являются гораздо более узкими, чем тепловые, мы выделили следующие источники, в которых излучение на 84 ГГц может являться мазерным: G027.94-00.47, G030.57-00.23, G034.77-00.55, G053.11+00.0, G034.43+0.24с, G024.33+00.11 (см. рис. 5).

Наше предположение состояло в том, что мы могли наблюдать мазерное излучение с наложенным на него тепловым, и профили таких линий будут многокомпонентными, но будут иметь заметные узкие элементы. Чтобы проверить это предположение, мы сравнили профили излучения кандидатов в метанольные мазеры на частоте 84.5 ГГц с профилями теплового излучения метанола на частоте 96.7 ГГц (см. рис. 6).

Визуальная оценка позволила отсеять источник G027.94-00.47, в котором наблюдалось обычное тепловое излучение. Так же мы смогли подтвердить, что в источнике G034.43+0.24с присутствует мазерный эффект. Для подтверждения кандидатуры оставшихся источников (G030.57-00.23, G034.77-00.55, G053.11+00.0, G024.33+00.11) был необходим дополнительный анализ.

Идентифицировать мазерное излучение по наблюдаемым данным можно с помощью оценки температуры возбуждения T_{ex} по формуле 1.

$$T_{ex} = \frac{h\nu}{k} \frac{1}{\ln\left(\frac{g_u N_l}{g_l N_u}\right)}. \quad (1)$$

$$N_{u,l} = \frac{8\pi}{h} \frac{1}{A_{ul}} \frac{\nu_0^3}{c^3} k \left(\int T_{MB} dV \right)_{ul}. \quad (2)$$

Здесь $N_{u,l}$ — лучевая концентрация молекул на верхнем уровне, выраженная через спектральные параметры линии (формула 2), $g_{u,l}$ — статистический вес верхнего/нижнего уровня, A_{ul} — коэффициент Эйнштейна вероятности спонтанного излучения, k — постоянная Больцмана, $\left(\int T_{MB} dV \right)_{ul}$ — полный поток излучения в линии, полученный из наблюдений.

Значение полного потока излучения в линии $\left(\int T_{MB} dV \right)_{ul}$ для перехода $4_{-1}-3_0E$ на частоте 36 ГГц можно получить только из наблюдений, а для источников G030.57-00.23, G034.77-00.55, G053.11+00.0, G024.33+00.11 наблюдения на данной частоте на данный момент не проводились.

В настоящей работе подтвердить кандидатуры источников мазерного излучения получилось с помощью моделирования параметров излучения по заданным параметрам среды. Для моделирования использовалась программа RADEX, описывающая одномерный перенос излучения при отсутствии локального термодинамического равновесия и в предположении об изотермической и однородной среде без крупномасштабных полей скорости [24].

Параметры, которые мы получали в результате моделирования: T_{ex} — температура возбуждения перехода, τ — оптическая толщина, T_R — расчетная температура излучения, величина соответствующая параметру T_{peak} , полученному из наблюдений. Параметры, которые необходимо было задать: T_K — кинетическая температура среды, $N(H_2)$ — объёмная концентрация молекул водорода в облаке (партнёров для столкновений), Column density $N(CH_3OH)$ — лучевая концентрация молекул метанола в среде.

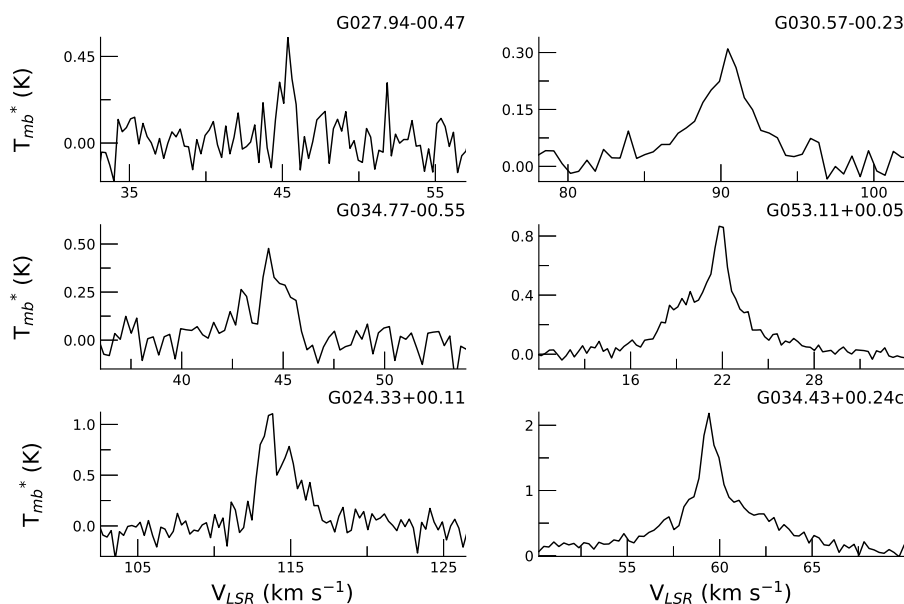


Рис. 5. Спектры излучения кандидатов в метанольные мазеры

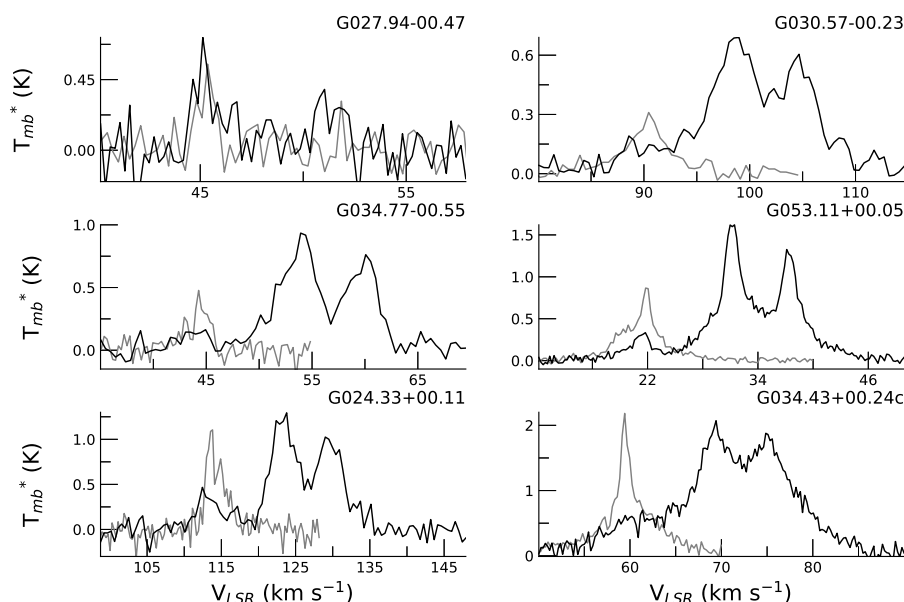


Рис. 6. Сравнение профилей излучения кандидатов в мазеры на частоте 84.5 ГГц (серые) с профилями теплового излучения на частоте 96.7 ГГц (черные)

T_K для 4 исследуемых источников была взята из работы [17], где была рассчитана благодаря наблюдавшейся в источниках серии переходов в молекуле метилацетелина CH_3CSH . Точное значение полной лучевой концентрации нам неизвестно, так как для её

нахождения недостаточно данных, как и для нахождения уточненного значения плотности водорода, но из литературы нам были известны диапазоны этих значений для молекулярных облаков. Поэтому моделирование параметров излучения T_{ex} , τ , T_R проводилось для

Таблица 2. Параметры, полученные с помощью моделирования

Названия источников	$T_{kinetic}$ К	T_{peak} К	$n(H_2)$ cm^{-3}	$N(CH_3OH)$ cm^{-2}	T_{ex} К	τ	T_r К
G024.33+00.11	124.23	0.85	10^4	9.5×10^{13}	-2.001	-0.1358	0.8521
			10^5	3.23×10^{13}	-1.807	-0.1386	0.8507
			10^6	5.65×10^{13}	-2.622	-0.1263	0.8538
G030.57-00.23	48.2	0.24	10^4	6.7×10^{13}	-2.183	-0.003953	0.2417
			10^5	1.33×10^{13}	-1.861	-0.04114	0.2419
			10^6	1.35×10^{13}	-2.854	-0.03644	0.2425
G034.77-00.50	25.78	0.34	10^4	1.37×10^{14}	-2.609	-0.05197	0.3377
			10^5	2.9×10^{13}	-2.151	-0.05494	0.3371
			10^6	2.9×10^{13}	-2.151	-0.05494	0.3371
G053.11+00.05	33.52	0.49	10^4	1.36×10^{14}	-2.398	-0.02398	0.4897
			10^5	3.2×10^{13}	-2.047	-0.07936	0.4867
			10^6	2.9×10^{13}	-3.378	-0.06759	0.4887

сетки параметров ($n(H_2)$, $N(CH_3OH)$), T_K , где $n(H_2)$ принимала значения от 10^4 до 10^6 cm^{-3} , а $N(CH_3OH)$ от 10^{13} до 10^{15} cm^{-2} . По параметру T_R , который можно было сравнить с T_{peak} , была возможность определить наиболее подходящие параметры смоделированного излучения и уточнить их, добившись равенства T_R и T_{peak} . Уточненные параметры представлены в табл. 2. По полученным параметрам, температуре возбуждения и оптической толщине можно сделать вывод о том, что во всех четырёх источниках наблюдались слабые мазеры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлены результаты наблюдения излучения молекулы метанола на частоте 84.5 ГГц в 24 источниках — темных молекулярных облаках и областях звездообразования. Определены параметры идентифицированных в этих источниках линий, соответствующих переходу $5_{-1}-4_0E$ на частоте 84.5 ГГц.

Проведено сравнение спектров излучения метанола на частотах 44 ГГц и 84.5 ГГц и показана корреляция между интегральной интенсивностью линий метанола на этих двух частотах, которые принадлежат к разным лесенкам переходов. Из этого можно сделать эмпири-

ческий вывод о том, что излучающие на этих частотах области имеют схожую кинематику.

Также были получены медианные и средние значения лучевых скоростей пиков линий V_{peak} для двух частот: медианы 36.12 км/с для 44 ГГц и 34.31 км/с для 84 ГГц, средние 22.87 км/с для 44 ГГц и 22.72 км/с для 84 ГГц. Полученные средние и медианные лучевые скорости немного различаются. Это согласуется с тем, что мазеры 44 и 84.5 ГГц могут возникать в разных частях источника из-за разных условий возбуждения мазеров на разных частотах.

Идентифицированы 5 источников (G034.43+0.24с, G030.57-00.23, G034.77-00.55, G053.11+00.0, G024.33+00.11), излучение в которых является мазерным на частоте 84.5 ГГц.

Благодарности

Мы выражаем благодарность Космической Обсерватории Онсала за предоставление её инструментов и поддержку наблюдений. Национальная исследовательская инфраструктура Космической обсерватории Онсала финансируется за счет гранта Шведского исследовательского совета № 2017-00648.

- [1] Соболев В.В. Курс теоретической астрофизики. М.: Наука, 1985.
- [2] Постнов К.А., Засов А.В. В кн.: Курс общей астрофизики / ред. В.Н. Семенцов. М.: Физический факультет МГУ, 2005.
- [3] Рудницкий Г.М. Конспект лекций по курсу «Радио-

астрономия». М.: CYGNUS, 2001.

- [4] Cragg D.M., Sobolev A.M., Godfrey P.D. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **360**, N 2. 533 (2005).
- [5] Leurini S., Menten K.M., Walmsley C.M. // *Astron. Astrophys.* **592**, A31 (2016).
- [6] Ellingsen S.P., Breen S.L., Voronkov M.A. et al. // *arXiv*

- preprint arXiv:1210.2139. (2012).
- [7] *Batrla W., Menten K.M.* // *Astrophys. J. Lett.* **329**, L117. (1988).
- [8] *Cragg D.M., Johns K.P., Godfrey P.D., Brown R.D.* // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **259**, N 1. 203 (1992).
- [9] *Cyganowski C.J., Brogan C.L., Hunter T.R., Churchwell E.* // *Astrophys. J.* **702**, N 2. 1615 (2009).
- [10] *Yang W., Xu Y., Chen X.* et al. // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **231**, N 2. 20 (2017).
- [11] *Kalenskii S.V., Slysh V.I., Val'tts I.E.* et al. // *Astronomy Reports.* **45**, N 1. 26 (2001).
- [12] *Kalenskii S.V., Promyslov V.G., Slysh V.I.* et al. // *Astronomy Reports.* **50**, N 4. 289 (2006).
- [13] *Breen S.L., Contreras Y., Dawson J.R.* et al. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **484**, N 4. 5072 (2019).
- [14] *Yang W., Gong Y., Menten K.M.* et al. // *Astron. Astrophys.* **675**, A112 (2023).
- [15] *Voronkov M.A., Brooks K.J., Sobolev A.M.* et al. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **373**, N 1. 411 (2006).
- [16] *Xue C., Remijan A., Faure A.* et al. // *Astrophys. J.* **967**, N 2. 164 (2024).
- [17] *Shakhvorostova N.N., Alakoz A.V., Bayandina O.S.* et al. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **526**, N 1. 1165 (2023).
- [18] *Val'tts I.E., Ellingsen S.P., Slysh V.I.* et al. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **317**, N 2. 315 (2000).
- [19] *Motte F., Bontemps S., Louvet F.* // *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **56**, 41 (2018).
- [20] *McEwen B.C., Pihlstrom Y.M., Sjouwerman L.O.* // *Astrophys. J.* **793**, N 2. 133 (2014).
- [21] *Voronkov M.A., Sobolev A.M., Ellingsen S.P., Ostrovskii A.B.* // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **362**, N 3. 995 (2005).
- [22] *Chen X., Ellingsen S.P., Shen Z.-Q.* et al. // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **196**, N 1. 9 (2011).
- [23] <https://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS>
- [24] <https://home.strw.leidenuniv.nl/~moldata/radex.html>

Methanol emission at 84.5 GHz in infrared dark clouds

P. S. Sozinova^{1,a}, N. N. Shakhvorostova²

¹*Department of Space Research, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia*

²*Astro Space Center, P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences
Moscow 119991, Russia*

E-mail: ^ap.sozinova@lebedev.ru, ^bshahvorostovann@lebedev.ru

We report observations of methanol emission at 84-GHz toward 32 infrared dark cloud (IRDC) sources at various evolutionary stages. Data were obtained using the 20-meter radiotelescope located in Onsala, Sweden, during 2019–2020. Among these 32 sources, the $5_{-1}-4_0E$ methanol emission was detected in 24. These objects do not overlap with any previously observed 84-GHz sources, making all our detections novel. Based on our findings, five sources were identified in which emission of class I methanol masers was observed. Additionally, we compare the 84-GHz observations with previous 44-GHz measurements toward the same sources, revealing a correlation between emission at both frequencies and notable similarities in their spectral profiles.

PACS: 95.85.Bh, 33.20.Bx, 95.75.Fg, 97.10.Bt

Keywords: methanol I class maser emission, infrared dark clouds (IRDC), star formation

Received 09 June 2025.

Сведения об авторах

1. Созинова Полина Сергеевна — лаборант; e-mail: p.sozinova@lebedev.ru.
2. Шахворостова Надежда Николаевна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 333-40-88, e-mail: shahvorostovann@lebedev.ru.