

УДК 524.5

Р. Л. Сороченко, А. П. Цивилев

Пушчинская радиоастрономическая обсерватория Астрокосмического центра Физического института им. П. Н. Лебедева РАН
142290 Россия, Московская обл., г. Пушкино

Обнаружение и использование рекомбинационных линий углерода в миллиметровом диапазоне

В миллиметровом диапазоне были проведены наблюдения рекомбинационных радиолиний углерода от областей фотодиссоциации (ОФД). Их сопоставление с данными наблюдений этих же объектов в ИК-линиях тонкой структуры углерода C II и кислорода O I позволяет определять физические условия ОФД (плотность, температуру, толщину области), что и было сделано для ряда ОФД, связанных с областями H II. Показано, что рекомбинационные радиолинии позволяют также исследовать кинематику комплекса ОФД — область H II.

ВІДКРИТТЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ РЕКОМБІНАЦІЙНИХ ЛІНІЙ ВУГЛЕЦЮ У МІЛІМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ, Сороченко Р. Л., Цивілев А. П. — У міліметровому діапазоні проведено спостереження рекомбінаційних радіоліній вуглецю від областей фотодиссоціації (ОФД). Їхнє порівняння з даними спостережень цих же об'єктів у ІК-лініях тонкої структури вуглецю C II і кисню O I дозволяє визначати фізичні умови ОФД (густину, температуру, товщину області), що і було зроблено для ряду ОФД, пов'язаних з областями H II. Показано, що рекомбінаційні радіолінії дозволяють також досліджувати кинематику комплексу ОФД — область H II.

THE DETECTION AND USE OF CARBON RECOMBINATION LINES IN MILLIMETRE REGION, by Sorochenko R. L., Tsivilev A. P. — Some observations of recombination radio lines (RRL) of carbon from photo dissociation regions (PDR) at millimetre wavelengths were carried out. Combination of the RRL data with observations of the same objects in IR fine-structure lines of carbon (C II) and oxygen (O I) allows one to determine physical conditions in the PDR (density, temperature, region thickness), that was performed for a number of PDR related with H II

regions. It is shown that RRLs allow also to investigate the kinematics of a complex of PDR — H II region.

Введение. В межзвездной среде в процессе рекомбинации электронов и ионов с определенной вероятностью образуются атомы с высоким уровнем возбуждения. При последующих квантовых переходах между высоковозбужденными уровнями в силу малой разницы энергии между ними происходит излучение спектральных линий в радиодиапазоне. Такие линии в силу их рекомбинационной природы и принадлежности к радиодиапазону получили название рекомбинационные радиолнии (РРЛ).

Частоты РРЛ в соответствии с квантовой теорией строения атома Бора [5] определяются выражением

$$\nu_{n_1 n_2} = R \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} = \frac{2}{n_1^3} nR, \quad (1)$$

где n — номер уровня (или главное квантовое число), на который происходит переход, n — разница уровней при переходе, R — постоянная Ридберга. Для различных элементов действуют одни и те же переходы, частоты которых несколько смещены друг относительно друга из-за разницы постоянных Ридберга, определяемых выражением $R = R_\infty (1 - m_e/M_a)$, где m_e — масса электрона, M_a — масса атома, $R_\infty = 3.2898422 \cdot 10^{15}$ Гц.

Обнаруженные более 40 лет тому назад в СССР рекомбинационные радиолнии стали эффективным средством в астрофизических исследованиях [1]. Они уникальны как по количеству переходов, так и по ширине диапазона, в котором могут наблюдаться — от миллиметровых до декаметровых волн. Это позволяет исследовать астрономические объекты, существенно отличающиеся по своим физическим свойствам. Наиболее обильную информацию РРЛ поставляют о межзвездной среде.

В настоящее время РРЛ приняты от четырех элементов: водорода, гелия, углерода и серы. По линиям водорода была получено распределение ионизованного водорода в Галактике и определены основные физические условия в областях H II. По РРЛ гелия, соотношению их интенсивностей с интенсивностями РРЛ водорода были получены независимые и весьма точные данные о содержании гелия в МЗС, что является важным для космологии [4].

РРЛ углерода, в свою очередь, оказались ценнейшим источником информации о холодной МЗС, вне зон H II. Исторически РРЛ углерода были обнаружены в направлении областей H II NGC2024 и W3 [11]. Скоро выяснилось, однако, что линии углерода формируются не в областях H II, а в холодных молекулярных облаках, из которых области H II образовались [21]. Под воздействием выходящего из области H II УФ-излучения с $\lambda > 91.2$ нм на поверхности молекулярного облака образуется пограничный с областью H II слой, так называемая область

фотодиссоциации (ОФД), где происходит диссоциация молекул и ионизация атомов с потенциалом ионизации V_{ion} , меньшим, чем у водорода. Наиболее обильные из них — атомы углерода с $V_{ion} = 11.3$ эВ. Поэтому ОФД являются также областями С II. В некоторых из ОФД приняты также существенно более слабые РРЛ серы.

Исследования ОФД важны для изучения процессов звездообразования, так как они дают ценные сведения о воздействии УФ-излучения от молодой, вновь образовавшейся звезды на родительское молекулярное облако.

Целью настоящей работы было исследование физических условий в ОФД с помощью РРЛ. По сравнению с более ранними исследованиями, мы сделали два новых важных шага. Во-первых, наблюдения РРЛ углерода, проводившиеся ранее на сантиметровых и более длинных волнах, были распространены на мм-диапазон, где имеется ряд преимуществ. Во-вторых, анализ результатов по РРЛ был построен на сравнении их с данными наблюдений ИК-линий тонкой структуры углерода С II 158 мкм и кислорода O I 63 и O I 146 мкм, которые формируются в тех же ОФД [3].

НАБЛЮДЕНИЯ РЕКОМБИНАЦИОННЫХ РАДИОЛИНИЙ УГЛЕРОДА В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ВОЛН

Первые успешные наблюдения РРЛ углерода в мм-диапазоне волн были проведены в 1993—1994 гг. Использовался 22-метровый радиотелескоп Физического института им П. Н. Лебедева, оснащенный охлаждаемым твердотельным усилителем на волну 8 мм. Шумовая температура системы составляла 220 К. Полоса приема усилителя позволяла принимать две РРЛ углерода — C56* (36484.43 МГц) и C57 (34613.627 МГц). Анализ спектра осуществлялся 128-канальным фильтровым анализатором с разрешением по частоте 500 кГц. Ширина диаграммы направленности РТ-22 в диапазоне 8 мм составляла 2°. Наблюдения проводились методом симметричной диа-

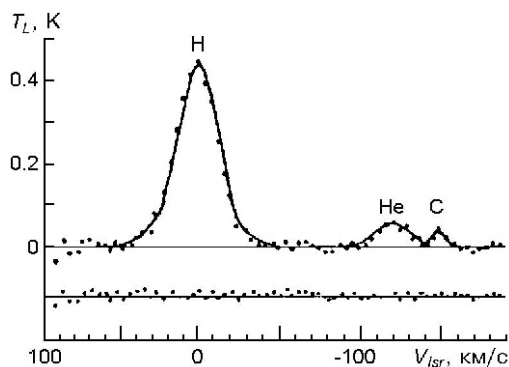


Рис. 1. Спектрограмма РРЛ 56 в источнике W3A. Под спектрограммой — разность между наблюдаемым спектром и его аппроксимацией

* Используется принятое для РРЛ обозначение: символ элемента, главное квантовое число нижнего уровня, порядок линии — греческой буквой.

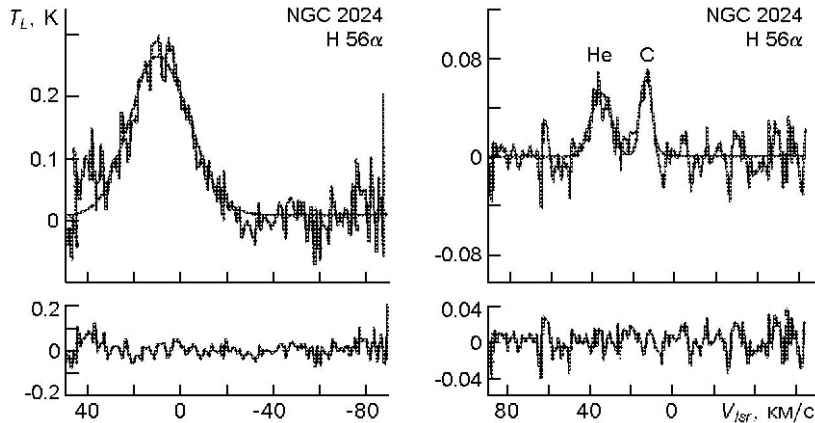


Рис. 2. Спектрограмма РРЛ Н (а) и He, С (б) 56 в источнике NGC2024. Под спектрограммой — разность между наблюдаемым спектром и его аппроксимацией

граммной модуляции: радиотелескоп попеременно наводился на источник одним и другим направлением приема, разнесенными на 23 . На рис. 1 показана спектрограмма РРЛ C56 в направлении источника W3A [2]. Это первая в мире спектрограмма с отчетливо видимой РРЛ углерода миллиметрового диапазона. Она была получена при очень большом времени накопления 152 ч. Одновременно с линией углерода принимается также линия водорода H56 и гелия He56 . Частоты линий Н, He и С смещены друг относительно друга из-за различия постоянных Ридберга, согласно выражению (1).

После усовершенствования радиоспектрометра, увеличения его разрешения до 125 кГц (1 км/с) на радиотелескопе РТ-22 были проведены более обширные наблюдения РРЛ 56 . Кроме области W3, излучение линии углерода C56 наблюдалось также от ОФД в направлении туманностей Ориона, NGC2024 и M17. На рис. 2 приведены спектрограммы, полученные в направлении NGC2024. В связи с недостаточной шириной полосы анализа линия водорода наблюдалась отдельно от линий углерода. Полученные результаты приведены в табл. 1. В ее графах даны наименование источника, его координаты, обозначение РРЛ, время накопления, яркостная температура, полная ширина линий по половине интенсивности в шкалах скорости, лучевая скорость для линии, отнесенная к местному стандарту покоя. Как видно из табл. 1 в источниках Orion Bar, Orion (центр) и NGC2024 лучевые скорости, измеренные по линиям углерода, отличаются от лучевых скоростей для линий водорода и гелия. Это весьма ценные данные о природе формирования наблюдаемых РРЛ, которые подтверждают предположение о выходе областей III из родительского молекулярного облака в процессе звездной эволюции (фазе «шампанского»). В источнике W3 различие скоростей углерода и водорода находится в пределах ошибки измерений.

Таблица 1. Полученные из наблюдений параметры РРЛ

Источник	$\begin{matrix} 1950^{\circ} \\ 1950 \end{matrix}$	Линия	t , ч	T_L , К	V , км/с	V_{lsr} , км/с
Orion Bar	$05^h32^m55^s$ 5 26 30	H56	4	0.800(0.030)	27.5(1.0)	0.65(0.4)
		He56	31.5	0.137(0.011)	20.9(2.0)	0.47(0.6)
		C56	31.5	0.081(0.014)	3.4(0.9)	10.54(0.3)
NGC 2024	$05^h39^m13^s$ 1°57 00	H56	15.3	0.291(0.011)	28.8(1.3)	7.0(0.5)
		He56	54.4	0.051(0.006)	11.4(1.7)	5.7(0.6)
		C56	54.4	0.069(0.007)	6.1(1.1)	11.2(0.4)
W3	$02^h21^m52^s$ 61°52 39	H56	22.1	0.331(0.017)	27.6(1.3)	42.3(0.4)
		He56	94.7	0.058(0.006)	14.6(1.9)	43.4(0.7)
		C56	94.7	0.038(0.007)	6.7(1.6)	41.9(0.6)
M17	$18^h17^m34^s$ 16°14 00	H56	8.0	1.104(.022)	32.4(0.8)	17.8(0.3)
		He56	71.0	0.133(.006)	29.5(2.6)	20.1(0.9)
		C56	71.0	0.056(.011)	12.4(2.8)	21.6(1.2)
Orion* (центр)	$05^h32^m49^s$ 5°25 16 $05^h32^m47^s$ 5°24 20	H56	16.2	1.400(0.066)	26.5(0.96)	1.3 (0.5)
		He56	184.1	0.172(0.016)	22.5(1.46)	1.57(0.5)
		C56	184.1	0.060 (0.015)	3.4(1.06)	+10.0(0.7)

* Взят средний спектр по направлениям Orion A и Orion KL

Рис. 3. Схема зоны ОФД, связанной с областью Н II NGC2024: расположение и динамика ионизованного (пузырь), частично ионизованного (штриховые линии) и молекулярного (штриховка) газа в звездообразующем комплексе NGC2024. Более частая штриховка обозначает уплотнение ядра молекулярного облака, где предположительно образуются протозвезды. Возбуждающая звезда обозначена звездочкой

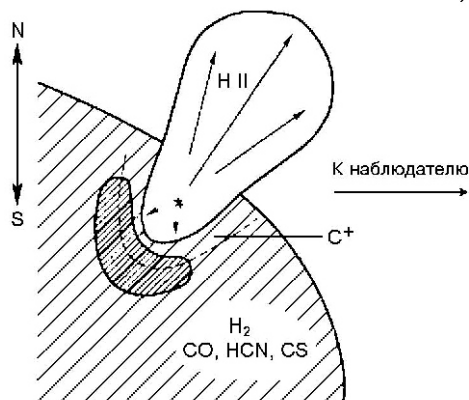


Рис. 3 иллюстрирует возможную модель комплекса область Н II молекулярное облако, построенную на основании наблюдений РРЛ в NGC2024. ОФД, где формируются РРЛ углерода, образуется в молекулярном облаке на границе с областью Н II. Об этом свидетельствует совпадение лучевой скорости 11.2 ± 0.4 км/с, измеренной по линии C56, со скоростями, измеренными по молекулярным линиям: 11.5 км/с по HCN и 10.9 км/с по CS [6].

Выход области Н II происходит из обращенной к нам стороне молекулярного облака под большим углом, что вытекает из картирования NGC2024 в РРЛ водорода и углерода [9] и лучевых скоростей, измеренных по РРЛ. Наиболее коротковолновая линия H56а, которой соответствует малая оптическая толщина, определяет скорость центра области Н II. Скорости в линиях водорода, которые наблюдались от

H56 до H166 [12], уменьшаются с номером перехода соответственно от 7.0 ± 0.5 до 4.1 ± 0.1 км/с. Это свидетельствует о расширении области H II: на более длинных волнах из-за увеличения ее оптической толщины излучение линий принимается от все более внешних, т. е. более близких по отношению к наблюдателю слоев.

Используя все имеющиеся данные о радиальных скоростях можно определить общую динамику NGC2024. Распространение области H II происходит в основном к северу, в направлении более разреженной МЗС. В противоположном направлении, у основания области H II в пограничном слое молекулярного облака (в ОФД) происходит сжатие газа. При этом могут образовываться конденсации газа и пыли — будущие протозвезды. Для исследования происходящих процессов важно знать физические условия в ОФД. И здесь также эффективным средством могут быть РРЛ, в первую очередь линии углерода мм диапазона.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В ОБЛАСТИ ФОТОДИССОЦИАЦИИ

Определить физические условия в ОФД только по наблюдениям РРЛ углерода трудно. Для этого необходимо получить данные по многим линиям в широком диапазоне частот. Задача существенно облегчится, если совместить данные по РРЛ углерода с результатами наблюдений ИК-линии C II 158 мкм [14].

Линии обоих типов формируются в одних и тех же областях, поскольку излучаются одними и теми же ионами углерода, которые при рекомбинации на возбужденные уровни и последующих переходах излучают РРЛ, а при переходах между уровнями тонкой структуры $^2P_{3/2} — ^2P_{1/2}$ — линию $\lambda = 158$ мкм. Однако интенсивность линий зависит от трех параметров: температуры T , плотности N среды и толщины L слоя, где формируется излучение. Двух приведенных выше измерений недостаточно. Для определения искомых величин нужна третья независимая связь между ними, которую могут дать измеряемые в ОФД ИК-линии тонкой структуры кислорода O I 63 мкм и 146 мкм. В ОФД кислород находится в атомарном состоянии. Молекулы, связывающие кислород, разрушены диссоциацией. В то же время ионизации кислорода не происходит, поскольку $V_{ion,O} > V_{ion,H}$.

Важным является вопрос соразмерности в ОФД глубины областей O I и C II. Согласно теории в пограничном с областью H II слое молекулярного облака, на глубине, соответствующей визуальному поглощению $A_V = 4...5$ ионы углерода переходят в нейтральные атомы, которые, вступая в реакцию с кислородом, образуют молекулы CO [18]. Поскольку кислород обильнее углерода, то при этой реакции связываются не все атомы кислорода, и можно ожидать несколько большую глубину области O I по сравнению с областью C II. Наблюдения в

линиях С II 158 мкм, O I 63 и 146 мкм в направлении Orion Bar показали, однако, очень хорошую пространственную корреляцию интенсивностей всех трех линий. На этой основе был сделан вывод об их формировании в одном и том же газе [16]. Соответственно представляется обоснованным совместный анализ ИК-линий кислорода с рекомбинационными радиолиниями углерода, пространственная корреляция которых с линией С II 158 мкм очевидна.

Уравнения, связывающие три искомым параметра ОФД с наблюдаемыми интенсивностями указанных линий, имеют вид

$$I(\text{C56}) = f_1(T, N_H, L), \quad (2)$$

$$I(\text{C II } 158) = f_2(T, N_H, L), \quad (3)$$

$$I(\text{O I } 146, \text{O I } 63) = f_3(T, N_H, L). \quad (4)$$

Исключая из уравнений (2) и (3) неизвестную величину L , можно по данным измерений интенсивностей линий C56 и С II 158 мкм [14] получить уравнение, связывающие температуру и плотность ОФД. Прodelывая аналогичную операцию с уравнениями (3) и (4), можно получить второе независимое уравнение для плотности в функции температуры по данным измерений линий С II 158 мкм и O I 146 мкм (или O I 63 мкм) [3].

Для расчетов использовались результаты наблюдений ИК-линий на Койперовской самолетной обсерватории [7, 16, 17] и из работы [10]. Принималось космическое содержание углерода $N_C = 3 \cdot 10^{-4} N_H$, а также предполагалось, что в ОФД углерод полностью ионизован и все электроны образовались при его ионизации $N_C = N_{C^+} = N_e$.

На рис. 4 приведены полученные функциональные зависимости плотности N_H от температуры T для источников NGC 2024 и W3.

Принципиальным моментом в проведенном анализе является использование спектральных линий с различной физической природой. РРЛ образуются в результате рекомбинации и их интенсивность пропорциональна квадрату плотности. Кроме того, поскольку населенность высоковозбужденных уровней также определяет рекомбинация, то интенсивность РРЛ быстро ($T^{-1.5}$) уменьшается с увеличением температуры. В тоже время населенность уровней тонкой структуры, определяемая соударениями с водородом, с увеличением температуры, наоборот, увеличивается. Поэтому кривая $N_H = F_1(T)$, полученная из измерений C56 / C II (158), имеет положительный градиент.

Отношение интенсивностей ИК-линий углерода и кислорода имеет другую зависимость. Обе линии имеют одну природу и характеризуются, как указывалось выше, ударным заселением уровней. По этой причине интенсивности обеих линий увеличиваются с температурой и плотностью, но с разной скоростью: для углерода медленнее, для кислорода — быстрее. Поэтому при постоянном отношении интенсивностей ИК-линий (полученном из измерений), гра-

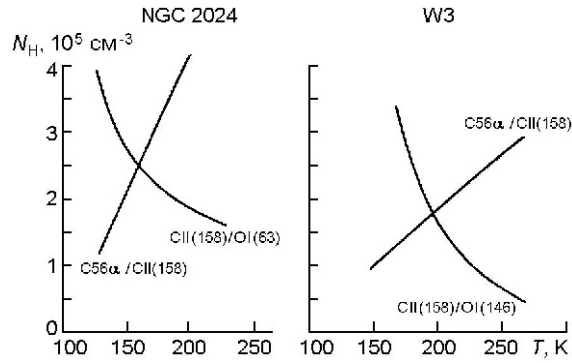


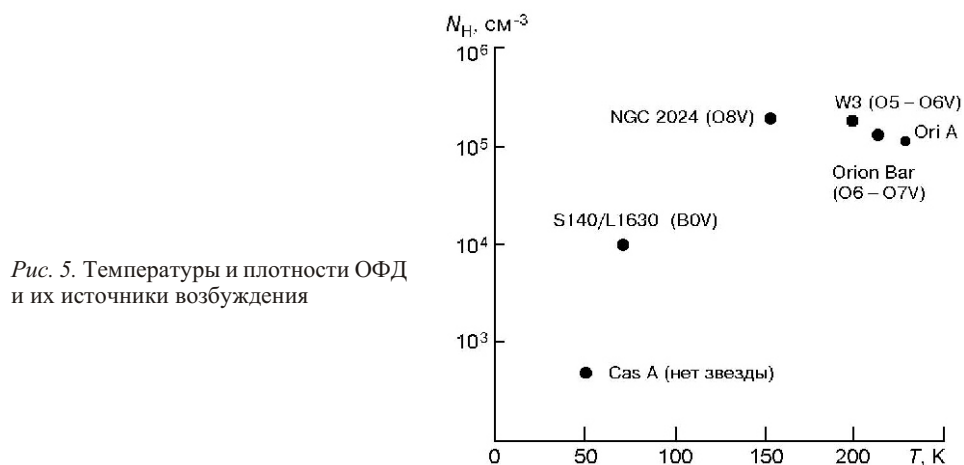
Рис. 4. Зависимости плотности N_H от температуры T , сформированные по отношению наблюдаемых интенсивностей РРЛ C56 и ИК-линий тонкой структуры C II (158 мкм), O I (146 мкм), O I (63 мкм). Точка пересечения определяет температуру и плотность ОФД в NGC2024 и W3

Таблица 2. Полученные параметры зон ОФД

Источник	T , К	N_H , 10^5 см^{-3}	L , пк	Ионизирующая звезда
Orion Bar	205	1.29	0.042	O6—O7V
W3	200	1.9	0.018	O5—O6V
NGC2024	156	2.5	0.010	O8V
M17	114	2.59	0.013	
Orion (центр)	228	1.12	0.044	O6—O7V
S140/L1204	67—85	~0.1		BOV
Cas A	50	0.005		Нет звезды

диент кривой $N_H = F_2(T)$ отрицателен: с увеличением температуры плотность уменьшается.

В силу указанных закономерностей кривые на рис. 4 пересекаются, позволяя по точке пересечения определить значение температуры и плотности ОФД. Подставляя найденные значения T и N_H в любое из уравнений (2)—(4), можно определить и третий искомый параметр ОФД — толщину излучающего слоя L . Поиск решения происходит итеративным путем. Метод совмещения данных по РРЛ и ИК-линиям для определения физических условий был применен для ряда ОФД, связанных с областями Н II. Полученные величины приведены в табл. 2. В ее столбцах после наименования источников последовательно даны: температура, плотность ОФД, толщина излучающего слоя, спектральный класс звезды, возбуждающей область Н II. Кроме наблюдавшихся в линии C56, в таблицу включено еще два источника, у которых физические условия были определены с помощью РРЛ. В источнике S140/L120 это было сделано описанным выше методом совмещения данных по РРЛ C165 — C166 с данными по ИК-линиям C II 158 мкм — O I 63 мкм [3]. Для другого источника — молекулярного облака в направлении Cas A — природа области ОФД отличается от природы остальных ОФД, включенных в табл. 2. В направлении Cas A нет областей Н II, и образование ОФД обусловлено фоновым УФ-излучением. Для этой ОФД не было наблюдений ИК-ли-



ний С II и О I. Физические условия ОФД были определены по одним РРЛ, поскольку их наблюдения были проведены в широчайшем диапазоне волн от 21 см до 15 м [15]. Как видно, наблюдается определенная связь между физическими условиями областей С II и источником ионизации соседней области Н II. Более высокая температура наблюдается в областях С II, у которых соседствующая область Н II возбуждается звездой более раннего класса. Это иллюстрирует рис. 5. Важная информация содержится в полученных значениях плотности ОФД. Как следует из табл. 2, в области С II в направлении NGC2024 значение $N_H \approx 2.5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ существенно превосходит среднее значение плотности родительского молекулярного облака $\langle N(\text{H}_2) \rangle = 10^3 \text{ см}^{-3}$ [8]. Это свидетельствует об уплотнении материи в ОФД, где может начаться процесс образования сгустков и протозвезд с последующим звездообразованием.

Интересно отметить, что глубина слоя ОФД для всех источников оказалась весьма малой, меньше 0.05 пк с небольшим разбросом значения L при сильно различающихся источниках УФ-излучения от одиночной звезды для W3 до большого скопления в M17.

Помимо определения физических условий в ОФД наблюдения в линии C56 позволили получить ценные данные о заселенности возбужденных уровней углерода, значения коэффициента b_n , учитывающего отклонение заселенности от термодинамического равновесия, при котором $b_n = 1$. В холодной МЗС рекомбинация углерода на возбужденные уровни может сопровождаться одновременным возбуждением ядра C^+ при переходах между уровнями тонкой структуры $^2\text{P}_{3/2} \rightarrow ^2\text{P}_{1/2}$ — низкотемпературной диэлектронной рекомбинации (НТДР). За счет НТДР у углерода происходит дополнительное заселение возбужденных уровней, и их заселенность существенно отличается от аналогичных величин у водорода.

Как показали проведенные расчеты при физических условиях ОФД коэффициент b_n для углерода с уменьшением n от 100 до 60 уменьшается незначительно, оставаясь близким к единице. В тоже

время у водорода при тех же условиях значение b_n уменьшается сильно, примерно до 0.1 при $n = 60$ [19]. Измерения отношения интенсивностей линий $I(C65)/I(C91)$ в Orion Bar подтвердили эти расчеты [20]. Настоящие наблюдения линий C56 и C57 по источнику W3, где с близким угловым разрешением были проведены наблюдения линии C76 [13], подтверждают сильное влияние НТДР на заселенность возбужденных уровней углерода вплоть до $n = 56$. Сделанная оценка для ОФД в W3 дает значение $b_{56,57} = (0.97 \pm 0.18)b_{76}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совместный анализ результатов наблюдений РРЛ углерода с данными по ИК-линиям тонкой структуры C II 158 мкм, O I 146 и 63 мкм представляет эффективную возможность определения физических условий в областях фотодиссоциации, образующихся на поверхности молекулярных облаков на границе с областями H II. Полученная информация важна для исследования процессов звездообразования, в том числе возможности триггерного механизма, когда образовавшаяся молодая звезда индуцирует появление других звезд.

Для указанного совместного анализа лучше всего использовать РРЛ углерода мм-диапазона, которые обладают рядом преимуществ по сравнению с более длинноволновыми линиями — более высокое отношение яркости в линии к излучению в континууме, малая оптическая толщина и др.

Работа была поддержана программой Президиума РАН «Происхождение, строение и эволюция объектов Вселенной».

1. Сороченко Р. Л., Гордон М. А. Рекомбинационные радиолнии. Физика и астрономия. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.—391 с.
2. Сороченко Р. Л., Цивилев А. П. Обнаружение в источнике W3A радиолний C56 и C57 — первых рекомбинационных радиолний углерода в миллиметровом диапазоне волн // Доклады, представленные на годовую сессию Ученого совета АКЦ ФИАН: Сб. — М.: Физический ин-т им. П. Н. Лебедева, 1996.— С. 4—8.
3. Сороченко Р. Л., Цивилев А. П. Физические условия в областях фотодиссоциации по наблюдениям рекомбинационных радиолний углерода и ИК-линий тонкой структуры C II и O I // Астрон. журн.—2000.—77, № 7.—С. 488—498.
4. Цивилев А. П. Определение содержания Первичного гелия по наблюдениям рекомбинационных радиолний // Письма в Астрон. журн.—2009.—35, № 10.— С. 745—754.
5. Bohr N. Om brintspektret // Fisisk Tidsskrift.—1914.—12.—Р. 97—114.—(Пер: Бор Н. О спектре водорода // Нильс Бор. Избр. тр. — М.: Наука, 1971.— С. 152—167.
6. Evans N. J., Munday L. G., Davies J. H., Bout P. V. Submillimeter spectral line observations in very dense regions // Astrophys. J.—1987.—312.—Р. 344—350.

7. *Herrman F., Madden S. C., Nicola T., et al.* The Orion molecular clouds OMC-1 and OMC-2 mapped in the far-infrared fine-structure line emission of C⁺ and O⁰ // *Astrophys. J.*—1997.—**481**.—P. 343—354.
8. *Jaffe D. T., Zhou S., Howe J. E., et al.* Ultraviolet-illuminated molecular cloud boundaries: extended [C II] 158 micron emission toward L1630 // *Astrophys. J.*—1994.—**436**.—P. 203—215.
9. *Krugel E., Thum C., Martin-Pintado J.* Structure of Orion B (NGC2024): A recombination line and continuum map // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1982.—**48**.—P. 345—353.
10. *Mookerjee B., Ghosh S. K., Kaneda H., et al.* Mapping of large scale 158 μ m line emission: Orion A // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**404**.—P. 569—578.
11. *Palmer P., Zuckerman B., Lilley A. E., Mezger P. G.* Detection of a new microwave spectral line // *Nature*.—1967.—**215**.—P. 40—41.
12. *Pankonin V., Walmsley C. M., Wilson T. L., Thomasson P.* A study of the partially ionized medium in the vicinity of the H II region NGC 2024 and W3 // *Astron. and Astrophys.*—1977.—**57**.—P. 341—351.
13. *Ricard L. J., Zuckerman B., Palmer P., Turner B. E.* Observations of the high-frequency carbon recombination-line emission in NGC 2024 and IC 1795 // *Astrophys. J.*—1977.—**218**.—P. 659—667.
14. *Smirnov G. T., Sorochenko R. L., Walmsley C. N.* The S140/L1204 complex: recombination lines of hydrogen, carbon and sulfur // *Astron. and Astrophys.*—1995.—**300**.—P. 923—932.
15. *Sorochenko R. L.* Radio recombination lines of carbon as a tool for investigation of molecular clouds // *Astron. and Astrophys. Trans.*—1996.—**11**.—P. 199—214.
16. *Stacey G. T., Jaffe D. T., Geis N., et al.* 158 micron [C II] mapping of the Orion molecular cloud // *Astrophys. J.*—1993.—**404**.—P. 219—231.
17. *Stutzki J., Stacey G. J., Genzel R., et al.* Submillimeter and far-infrared line observation of M17 SW: a clumpy molecular cloud penetrated by ultraviolet radiation // *Astrophys. J.*—1988.—**332**.—P. 379—399.
18. *Tielens A. G. G. M., Hollenbach D.* Photodissociation regions. I. Basic model // *Astrophys. J.*—1985.—**291**.—P. 722—746.
19. *Walmsley C. M., Watson W. D.* The influence of dielectronic-line recombination at low temperature on the interpretation of interstellar, radio recombination lines of carbon // *Astrophys. J.*—1982.—**260**.—P. 317—325.
20. *Wyrowski F., Schlike P., Hofner P., Walmsley C. M.* Carbon radio recombination lines in the Orion Bar // *Astrophys. J.*—1997.—**487**.—P. L171—L174.
21. *Zuckerman B., Palmer P.* A new interpretation of the anomalous microwave recombination line // *Astrophys. J.*—1968.—**153**.—P. L145—149.

Поступила в редакцию 01.10.09