

УДК 524.527-36+544.522.14-76

НАБЛЮДЕНИЯ ОБЛАСТЕЙ ФОТОДИССОЦИИИ S 255, S 257, NGC 7538 И S 140 В БЛИЖНЕМ ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ

© 2023 М. С. Кирсанова^{1*}, А. М. Татарников², П. Э. Боли¹,
Д. З. Вибе¹, Н. А. Масленникова², А. А. Татарников²

¹Институт астрономии Российской академии наук, Москва, 119017 Россия

²Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

Поступила в редакцию 16 мая 2023 года; после доработки 30 мая 2023 года; принята к публикации 1 июня 2023 года

Мы провели фотометрические наблюдения областей фотодиссоциации S 255, S 257, S 140, NGC 7538 и Барьера Ориона на длине волны 2 мкм с использованием узкополосных фильтров, центрированных на линии $\text{Br}\gamma$, H_2 и $[\text{Fe II}]$, а также узкополосного фильтра K_{cont} и широкополосного H-фильтра для вычитания континуума. Наблюдения были выполнены на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ, оснащенной камерой-спектрографом ближнего инфракрасного диапазона ASTRONIRCAM. На изображениях ионизованного газа в линиях $\text{Br}\gamma$ и $[\text{Fe II}]$ в NGC 7538 мы обнаружили несколько дугообразных структур высокой плотности, а также протяженные оболочки и дуги, видимые в линии излучения H_2 . Фронт ионизации H и фронт диссоциации H_2 в NGC 7538 сливаются. В S 255 и S 257 обнаружены только эмиссия $\text{Br}\gamma$ из областей H II и яркое излучение H_2 от областей фотодиссоциации (ФДО). Расстояние в проекции между фронтом ионизации H и фронтом диссоциации H_2 составляет приблизительно 0.3–0.4 пк, что не может быть объяснено с помощью моделей однородной среды. Скорее всего, ионизованный и нейтральный газ в этих ФДО является клочковатым. Переходы от H I к H_2 в ФДО NGC 7538, S 255, S 257 и S 140 постепенные, без резких границ. Этот вывод также согласуется с предположением о клочковатой среде.

Ключевые слова: МЗС: обилия химических элементов — области фотодиссоциации

1. ВВЕДЕНИЕ

Нейтральные окрестности областей H II вокруг молодых массивных звезд проявляются на инфракрасном (ИК) небе в виде кольцеобразных оболочек (см., например, Churchwell et al. (2006); Deharveng et al. (2010); Topchieva et al. (2018); Watson et al. (2008) и многие другие статьи). Эти оболочки представляют собой области фотодиссоциации (ФДО), создаваемые фотонами дальнего ультрафиолета с $h\nu < 13.6$ эВ, которые вызывают диссоциацию H_2 , CO, O_2 и других молекул, а также нагревают межзвездную пыль (см., например, Tielens and Hollenbach, 1985a; Sternberg and Dalgarno, 1995). ИК-оболочки напоминают проекции сфер на плоскость неба, но многие из них на самом деле являются двумерными структурами, похожими на торы (см., например, Beaumont и Williams, 2010). В некоторых случаях различные индикаторы, такие как излучение пыли, молекулярные или атомарные линии, из-за неоднородного распределения газа и условий возбуждения

демонстрируют разную геометрию оболочки (см., например, серию работ об H II-области RCW 120 в статьях Deharveng et al. (2009); Pavlyuchenkov et al. (2013); Anderson et al. (2015); Kirsanova et al. (2019); Marsh and Whitworth (2019); Luisi et al. (2021); Kabanovic et al. (2022)).

В ранних исследованиях (например, Tielens and Hollenbach, 1985b) области фотодиссоциации, разделяющие область H II и молекулярное облако, рассматривались как равновесные структуры. Однако последующее моделирование показало, что динамические эффекты могут быть ответственны за такие явления, как слияние фронта ионизации H (ФИ) и фронта диссоциации H_2 (ФД), а также слияние фронтов диссоциации H_2 и CO (см., например, Hosokawa and Inutsuka (2005)). Последнее было успешно продемонстрировано для ФДО Барьер Ориона в работах Goicoechea et al. (2016) и Kirsanova and Wiebe (2019). Нестационарные ФДО, часто напоминающие оболочки, создают сплошную сеть пузырей и дуг в дальнем ИК-диапазоне, в то время как об их виде в ближнем ИК-диапазоне известно немного, за ис-

*E-mail: kirsanova@inasan.ru

Таблица 1. Свойства областей Н II в направлении исследуемых ФДО

	S 255	S 257	NGC 7538	S 140
Ионизирующая звезда	LS 19, O9.5 V [1]	HD 253327, B0.5 V [1]	IRS 6, O5–O6 [2]	HD 211880, B0 V
Расстояние, пк	2060^{+2181}_{-1951} [3]	2500 [4]	2500 [4]	921 ± 16 [3]
Размер, угл. сек.	210 [5]	190 [5]	150	376 [6]
n_e , см^{-3}	≈ 100 [5]	≈ 100 [5]	100–1000 [7]	диффузная

Примечания: [1] — Ojha et al. (2011), [2] — Ojha et al. (2004), [3] — Brown et al. (2021), [4] — см. раздел 1, [5] — Kirsanova et al. (2023), [6] — кратчайшее расстояние между источником ионизации и границей ФДО, [7] — Balsaer and Bania (2018).

ключением нескольких ярких объектов. Например, Walmsley et al. (2000) изучали геометрию ФДО Барьер Ориона, используя яркие эмиссионные линии H_2 и линии различных атомов и ионов в ближнем ИК-диапазоне. При достигнутом пространственном разрешении $0''.6$, которое соответствует 0.0012 пк (или 240 а.е.) на расстоянии 414 пк (Menten et al., 2007), они нашли, что расстояние между фронтами ионизации H и диссоциации H_2 составляет $17''\text{--}20''$ в зависимости от конкретной позиции в ФДО (см. также van der Werf et al., 1996; O'Dell and Yusef-Zadeh, 2000). Этот результат был недавно подтвержден Habart et al. (2023).

Вдохновленные недавним вводом в эксплуатацию Кавказской горной обсерватории (КГО) ГАИШ МГУ мы провели фотометрические наблюдения в ближнем ИК-диапазоне ФДО S 255, S 257, NGC 7538, S 140 и Барьера Ориона, чтобы изучить их геометрию и физические условия. Мы выбрали фильтры, соответствующие линиям $\text{Br}\gamma$, [Fe II] ионизованного газа и линиям H_2 , возбуждаемым в ФДО фотонами дальнего ультрафиолета (Magconi et al., 1998; Walmsley et al., 2000). В то время как линии $\text{Br}\gamma$ и H_2 позволили локализовать сами ФИ и ФД, линию [Fe II] мы использовали для выявления наиболее плотных частей фронта ионизации, так как линии [Fe II] возбуждаются столкновениями. До недавнего времени в ближнем ИК-диапазоне широко изучались только отдельные компактные области этих ФДО, связанные с яркими пиками в ИК-диапазоне или излучением молекул от находящихся в ФДО массивных протозвезд. Структуре выбранных нами ФДО и физическим условиям в них уделялось мало внимания. Все эти ФДО мы включили в обширное исследование трехмерной структуры, которое было начато в статье Kirsanova et al. (2020).

Основные физические свойства областей Н II, относящихся к ФДО, приведены в таблице 1. Когда возможно, в качестве расстояний до ФДО мы используем оценки расстояния до ионизирующих звезд, основанные на параллаксах по данным GAIA DR3 (LS 19 в S 255 и HD 211880 в

S 140). Для S 257 качество фотометрического решения по данным Gaia все еще неудовлетворительно. Поэтому мы используем оценку расстояния 2.5 кпк на основании спектрофотометрического измерения 2.46 ± 0.16 кпк, полученного Russeil et al. (2007) (в этой работе объект обозначен как $192.50\text{--}0.10$), а также нескольких других измерений, обобщенных Chavarría et al. (2008). Спектрофотометрическое расстояние до NGC 7538 составляет 2.4 ± 0.14 кпк, согласно Russeil et al. (2007) (в данной работе объект обозначен как $111.50\text{--}0.80$). Это значение согласуется с оцененным по параллаксу расстоянием $2.65^{+0.12}_{-0.11}$ кпк до метанольного мазера в направлении на юго-восток от ионизирующей звезды (Moscadelli et al., 2009), а также с кинематическим расстоянием 2.44 ± 0.77 кпк из работы Foster и Brunt (2015) (в которой объект обозначен как S 158). Основываясь на этих измерениях, в настоящем исследовании в качестве расстояния до NGC 7538 мы используем величину 2.5 кпк.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Фотометрические наблюдения областей фотодиссоциации S 255, S 257, S 140, NGC 7538 и Барьер Ориона выполнялись на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ в течение двух сетов в ноябре 2020 г. и в январе 2021 г. с помощью камеры-спектрографа ближнего инфракрасного диапазона ASTRONIRCAM (Nadjir et al., 2017), обеспечивающей поле зрения $4''.6 \times 4''.6$ в одной экспозиции. Наблюдения проводились в ночи с качеством изображения $0''.7\text{--}1''$ (в видимом диапазоне длин волн) и высокой стабильностью пропускания атмосферы. Параметры астроклимата определялись с помощью прибора MASS-DIMM (Kornilov et al., 2007). В наблюдениях использовались узкополосные фильтры для линий $\text{Br}\gamma$ (2.1673 мкм, $FWHM = 21.2$ нм), H_2 (2.132 мкм, $FWHM = 46$ нм) и [Fe II] (1.6442 мкм, $FWHM = 26.2$ нм), а также узкополосный фильтр K_{cont} (2.2729 мкм, $FWHM = 39.4$ нм) и широкополосный H -фильтр ($1.4901\text{--}1.7829$ мкм) для

Таблица 2. Журнал наблюдений

Название	RA (J2000), hh:mm:ss	Dec (J2000), dd:mm:ss	Фильтр	Дата наблюдений	T_{exp} , с		Пространственное разрешение, угл. сек.
					общее	кадр	
NGC 7538	23:13:38	+61:29:49	H ₂	2020/11/27	788	29.170	1.09
			K_{cont}	2020/11/27	875	29.170	1.11
			Br γ	2021/01/02	492	9.120	1.19
			H ₂	2021/01/02	1575	29.170	1.35
			K_{cont}	2021/01/02	1575	29.170	1.22
			[Fe II]	2021/10/26	1113	9.120	1.09
			H	2021/10/26	153	3.646	1.19
Барьер Ориона	05:35:23	−05:25:01	Br γ	2020/12/07	875	14.590	1.13
			K_{cont}	2020/12/07	452	14.590	1.06
			[Fe II]	2020/12/27	1488	29.170	1.10
			H	2020/12/27	88	3.646	1.05
			H ₂	2021/02/21	939	9.120	1.30
			K_{cont}	2021/02/21	1459	14.590	1.17
			S 140	22:19:21	+63:18:56	Br γ	2020/11/27
H ₂	2020/11/27	1809	29.170			1.00	
K_{cont}	2020/11/27	1546	29.170			0.94	
[Fe II]	2020/11/29	1954	29.170			0.96	
H	2020/11/29	131	3.646			0.90	
Br γ	2020/12/01	447	9.120			1.01	
H ₂	2020/12/01	1021	29.170			0.89	
S 255-257	06:12:54	+17:59:23	K_{cont}	2020/12/01	700	29.170	0.94
			H ₂	2020/12/01	408	29.170	0.97
			Br γ	2021/01/02	447	9.120	1.04
			[Fe II]	2021/01/02	1575	29.170	1.11
			H	2021/01/02	443	5.470	1.16
			H ₂	2021/01/02	875	29.170	0.98
			K_{cont}	2021/01/02	554	29.170	0.97

вычитания континуума. Для каждого исследуемого поля в каждом фильтре мы делали серию коротких экспозиций (от 3 до 30 с в зависимости от яркости звезд в поле зрения) в режиме дизеринга со смещениями 3'' между последующими кадрами, чтобы свести к минимуму влияние плохих пикселей, используя сглаживание между отдельными экспозициями. Общие сведения о наблюдениях мы представляем в таблице 2, где также приводим данные об итоговом пространственном разрешении для каждого поля и фильтра, полученные по измерениям функции рассеяния точки (ФРТ).

Регистрация изображений отдельных кадров выполнялась с помощью модуля **Astroalign Python** (Beroiz et al., 2020), а вариации пропускания атмосферы во время наблюдений учитывались перед усреднением всех отдельных экспозиций добавлением к каждому изображению веса — обратного среднего фона неба. Следы космических лучей были удалены в процессе усреднения с помощью алгоритма “сигма-отсечения” (sigma-clipping). Астрометрическая привязка обработанных изображений была выполнена с использованием **Astrometry.net** (Lang et al., 2010) и индексных

файлов «4200-series» (на основании 2MASS), предоставленных командой Astrometry.net. Каждый кадр исправлялся за нелинейность, переполнение пикселей и плоское поле.

Калибровка изображений по потоку проводилась с помощью звезд поля из обзора 2MASS (Skrutskie et al., 2006), ее неопределенность мы оценивали с помощью процедуры Монте-Карло (bootstrapping). Мы отобрали звезды с лучшим фотометрическим качеством (“A”) во всех трех фильтрах (*JHK*) каталога точечных источников 2MASS Point Source Catalog и преобразовали звездные величины 2MASS в поток в полосе $F(\lambda)$ (в эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$) с помощью коэффициентов из таблицы 2 в работе Cohen et al. (2003). Для расчета ожидаемого потока от этих звезд в наших фильтрах мы предположили, что наблюдаемая плотность потока $F_\lambda(\lambda)$ звезд в ближнем инфракрасном диапазоне может быть описана как комбинация «хвоста» функции чернотельного излучения Рэлея–Джинса (степенной закон), умноженного на закон покраснения (тоже в форме степенного закона). На практике мы ограничились фильтрами *H* и *K*, так как более холодные звезды могут значительно отклоняться от закона Рэлея–Джинса в фильтре *J*. Таким образом, поток излучения от звезды, измеренный в *i*-м фильтре, может быть описан выражением

$$F_i = \int B\lambda^p T_i d\lambda,$$

где B и p — свободные параметры, определяемые подгонкой 2MASS-наблюдений, а T_i — кривая пропускания (или кривые RSR из работы Cohen et al. (2003) для фильтров 2MASS, или соответствующие кривые для фильтров КГО). С помощью метода итераций (до 100 повторений) при подгонке синтетических наблюдательных данных, нормально распределенных в пределах указанных неопределенностей 2MASS, мы можем вычислить и значение потока для звезд из каталога 2MASS в наших фильтрах, и ошибку этой оценки.

Затем мы сравнили эти результаты с измеренными для тех же звезд на наших изображениях величинами потока (в аналого-цифровых отсчетах, ADU), которые получили при помощи апертурной фотометрии с вычитанием фона, применяя модуль `Python photutils` (Bradley et al., 2022). Мы использовали апертуры с радиусом, равным $FWHM$ средней ФРТ на каждом изображении, тем самым эффективно учитывая 100% звездного потока, а значит, исключая необходимость поправки измеренного потока за апертуру. Неопределенность фотометрических данных оценивалась по дисперсии в каждом пикселе по отдельным экспозициям до

объединения и, следовательно, включает вклад детектора, статистики фотонов и вычитание фона. Окончательное соответствие между ADU и физическими единицами (эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$) было получено путем линейной подгонки к измеренным и ожидаемым звездным потокам, при этом неопределенность опять оценивалась путем генерации для каждой звезды синтетических значений обеих величин, нормально распределенных в пределах соответствующих погрешностей.

На последнем этапе мы выполнили вычитание континуума из калиброванных изображений, используя соответствующий узкополосный или широкополосный фильтр (K_{cont} для $\text{Br}\gamma$ и H_2 , H для $[\text{Fe II}]$). Вклад континуума в каждом фильтре мы оценивали, принимая, что фотометрические потоки всех (*JHK*) звезд с качеством “A” из каталога 2MASS в каждой паре фильтров после вычитания фона равны, должным образом масштабируя изображение в континуальном фильтре. Учет вклада от вычитания континуума в суммарную погрешность был сделан с помощью той же процедуры самонастройки, что и на предыдущих этапах. Мы проверили корректность нашего метода калибровки, воспользовавшись изображениями ФДО Барьер Ориона с континуумом и после его вычитания, полученными Habart et al. (2023), и нашли разумное согласие с их результатами. Мы также сравнили изображение с вычитанием континуума области звездообразования между S 255 и S 257 в фильтре H_2 с результатами Miralles et al. (1997) и получили, что усредненные измеренные потоки согласуются. Все итоговые откалиброванные изображения имеют размер пикселя $0''.27$.

3. АРХИВНЫЕ ДАННЫЕ

Интенсивность ультрафиолетового поля, нагревающего пыль, для радиуса частицы пыли 0.1 мкм можно оценить с помощью уравнения (5.44) из работы Tielens (2005):

$$T_{\text{sil}} \simeq 50 \left(\frac{1 \mu\text{m}}{a} \right)^{0.06} \left(\frac{G_0}{10^4} \right)^{1/6}, \quad (1)$$

где a — эталонный размер типичной межзвездной пылинки, G_0 — интенсивность поля излучения в единицах поля Хабинга (Хабинг, 1968). Мы использовали оценки температуры пыли из обзора ViaLactea (по данным Herschel Hi-GAL в полном диапазоне длин волн 70–500 мкм (Habing, 1968)). Фактор для перехода от единиц Хабинга к единицам Дрейна для поля УФ-излучения составляет $\chi = 1.71G_0$. Преобразование сделано для удобства сравнения с теоретическими моделями (см. ниже).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1–4 показаны калиброванные по потоку изображения изучаемых ФДО после вычитания континуума. Калиброванные изображения для тех же ФДО с излучением в континууме приведены на рисунках 1–4 Дополнительных материалов. После вычитания континуума мы получили остаточные изображения в линиях [Fe II] для ФДО Барьер Ориона и NGC 7538. В ФДО S 255–257 и S 140 эмиссия [Fe II] слишком слаба или отсутствует вовсе. Эмиссионных линий ни [Fe II], ни Br γ в S 140 не обнаружено. Используя карту поглощения в видимой области A_V , полученную в работе Kirsanova et al. (2023), и закон поглощения из работы Cardelli et al. (1989) для $R_V = 3.1$, мы обнаружили, что поглощение на луче зрения до S 255 и S 257 $\tau \approx 0.2–0.4$ на 2 мкм и близко к значениям, найденным Habart et al. (2023) в ФДО Барьер Ориона. Следовательно, вещество переднего фона слабо поглощает в ближнем ИК-диапазоне и мы не корректируем наши изображения за этот эффект. Хотя нам неизвестно значение τ в направлении S 140 и NGC 7538, мы считаем, что излучение оптически тонкое, как и у двух других ФДО.

4.1. Барьер Ориона

Барьер Ориона (Orion Bar) — это хорошо изученная ФДО, которая граничит со знаменитой H II-областью Ориона и освещается массивными звездами из Трапеции Ориона. На полученных нами изображениях ФДО Барьер Ориона в ближнем тбохИК-диапазоне мы находим все те же особенности, которые описаны Habart et al. (2023), Magconi et al. (1998), Walmsley et al. (2000), и используем наши данные в основном для самоконтроля. На изображениях в фильтрах Br γ и [Fe II] наблюдается ионизованный газ Туманности Ориона, а в полосе фильтра H $_2$ видны как задняя нейтральная стенка за главным фронтом ионизации, так и сам Барьер (яркая линия с проекцией θ^2 Ori на ее середину), см. рис. 1. По нашим оценкам, среднее расстояние между фронтами ионизации и диссоциации составляет 19'' для всех суммарных изображений в фильтрах Br γ и H $_2$. Это значение согласуется со значениями, полученными в других исследованиях (см. раздел 1). Расстояние между самой плотной частью фронта ионизации, видимой на изображении в [Fe II], и фронтом диссоциации H $_2$ равно 12''. Главная особенность, заметная на наших снимках, — неравномерность распределения газа, при том что пространственное разрешение наших данных ниже, чем в процитированных работах.

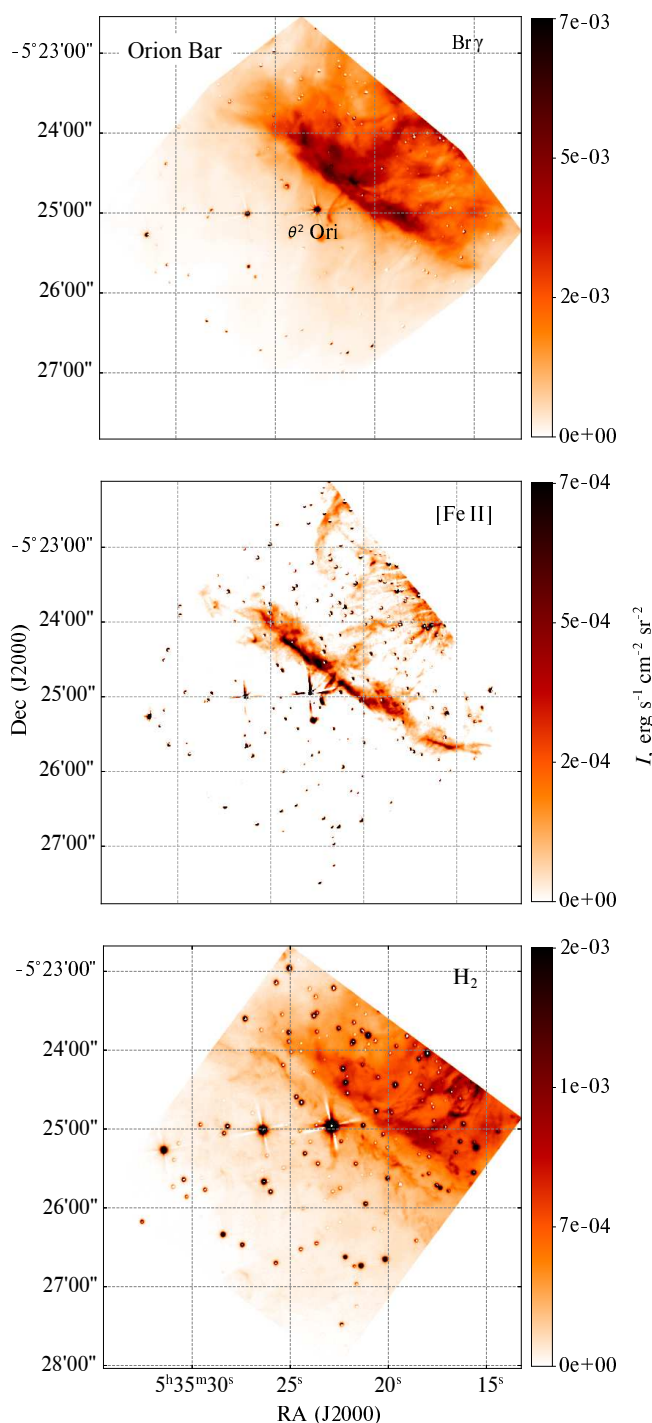


Рис. 1. Изображения ФДО Барьер Ориона в ближнем ИК-диапазоне после вычитания континуума.

4.2. NGC 7538

Яркая область H II в NGC 7538 является частью массивной области звездообразования в комплексе Cas OB2. Пространственное распределение излучения ионизованного газа NGC 7538 в линиях Br γ и [Fe II] показано на рис. 2. На разных

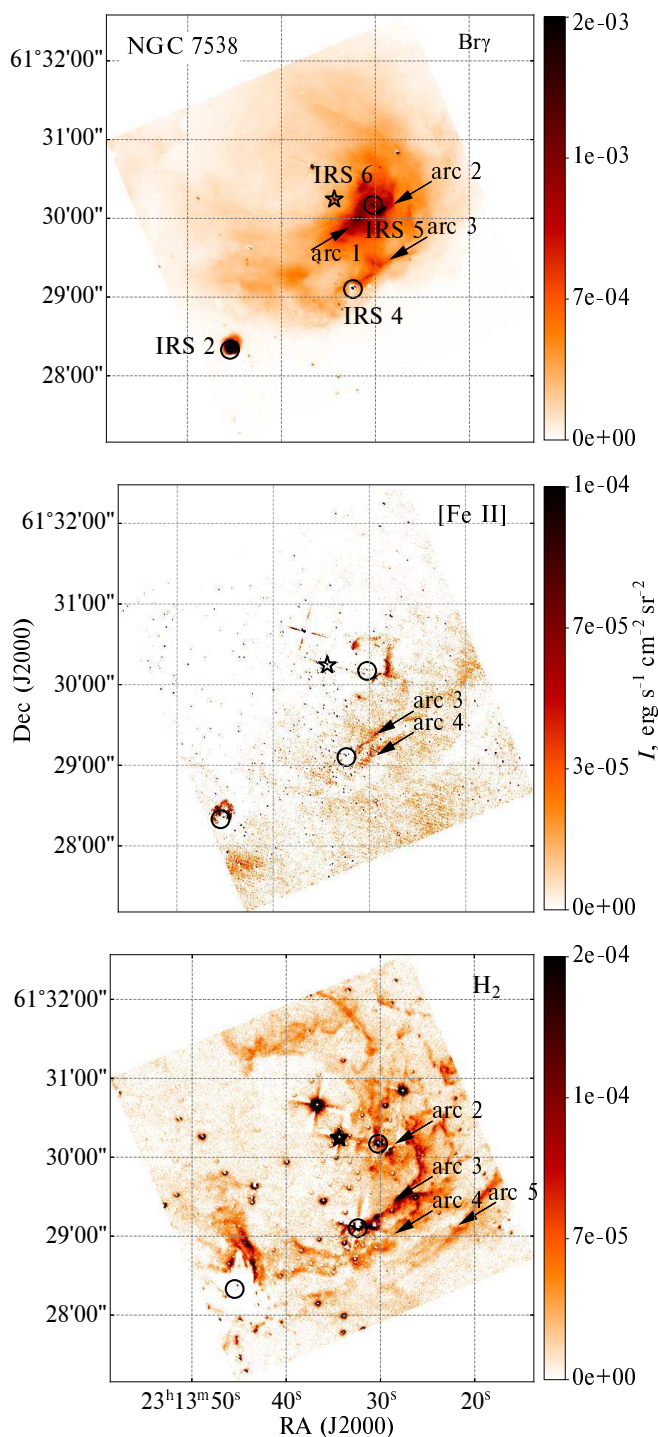


Рис. 2. Изображения ФДО NGC 7538 в ближнем ИК-диапазоне после вычитания континуума. Звездочка указывает на источник ионизации. Основные точечные ИК-источники отмечены кружками. Позиции всех объектов взяты из работы Ojha et al. (2004).

расстояниях от звезды NGC 7538 IRS 6 — источника ионизации — имеется много ярких структур, напоминающих дуги. Дуга 1 (arc 1 на рис. 2), которая видна на изображении в $\text{Br}\gamma$ на уровне

$(1-2) \times 10^{-3} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ стер}^{-1}$, находится на расстоянии в проекции $20''-30''$ ($0.24-0.36 \text{ пк}$) от IRS 6. Непосредственно за дугой на расстоянии $37''$ (0.45 пк) от IRS 6 в плоскости неба расположен точечный источник IRS 5. Дуга 2 (arc 2 на рис. 2) находится сразу за IRS 6. Дуга 3 (arc 3 на рис. 2), на которую проектируется точечный источник IRS 4, расположена на расстоянии $60''$ (0.73 пк) от IRS 6. Плотность потока $\text{Br}\gamma$ -излучения дуги 3 составляет $(7-9) \times 10^{-4} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ стер}^{-1}$.

Пространственное распределение эмиссии $[\text{Fe II}]$ в NGC 7538 выявляет ионизованные области высокой плотности, что обусловлено особыми условиями возбуждения линии. Хотя распределение эмиссии $[\text{Fe II}]$ похоже на распределение $\text{Br}\gamma$, очевидны некоторые отличия. Дуга 1, видимая в $\text{Br}\gamma$, неразличима на изображении в эмиссионной линии $[\text{Fe II}]$. Вокруг дуги 2 имеются яркие пятна эмиссии $[\text{Fe II}]$. Фронт ионизации совпадает с дугой 3, находящейся на расстоянии 0.75 пк от IRS 6 в плоскости неба. Эта плотная часть фронта ионизации имеет длину $10''$ с резкими границами, ширина которых составляет $2''-3''$ ($0.02-0.04 \text{ пк}$). Дуга 4 (arc 4 на рис. 2) видна параллельно дуге 3 и имеет такую же поверхностную яркость. На расстоянии нескольких угловых секунд позади IRS 5 имеется изогнутая вытянутая структура — дуга 2 с плотностью потока $(4-6) \times 10^{-5} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ стер}^{-1}$.

Колебательно-вращательное излучение в линии H_2 также распределено вокруг области H II в виде протяженных оболочек и дуг, вид которых отражает неравномерное распределение плотности нейтральной среды. Мы не видим дугу 1 в направлении IRS 5, которая есть на изображении в $\text{Br}\gamma$, но обнаруживаем яркие, $(1-2) \times 10^{-4} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ стер}^{-1}$, и компактные пятна в направлении этого источника вблизи положения дуги 2. Мы находим дугу 3, видимую и в линиях $\text{Br}\gamma$, и в линиях $[\text{Fe II}]$, как наиболее протяженную структуру на изображении в линии H_2 . Дуга состоит из нескольких соединенных между собой ярких волокон, одно из которых связано с IRS 4. Плотность потока излучения в H_2 в сгустках достигает $2 \times 10^{-4} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ стер}^{-1}$. Дуга 4 также видна на изображении в H_2 на уровне $7 \times 10^{-5} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ стер}^{-1}$. Если усреднить по азимуту изображение H_2 вокруг IRS 6, мы получим ширину излучающей H_2 -оболочки, равную примерно $15''$ (0.18 пк ширины в проекции). Расположение самой яркой части дуги 3 совпадает с дугами, обнаруженными на изображениях в линиях $\text{Br}\gamma$ и $[\text{Fe II}]$. То же верно и для изображений дуги 4 в линиях $[\text{Fe II}]$ и H_2 . Поэтому в плоскости неба ФИ и ФД сливаются в южной части NGC 7538. Мы обнаружили по крайней мере две объединенные

структуры ФИ + ФД в NGC 7538 (дуги 3 и 4), которые могут представлять собой несколько оболочек разного размера. На изображении в линии H_2 также видна еще одна дуга, которая не обнаруживается в линиях ионизованных элементов, — дуга 5. К северу от ионизирующей звезды мы находим дугообразные структуры на $77''$ – $96''$ (0.93 – 1.19 пк). Мы не наблюдаем яркого излучения $Br\gamma$ вблизи этих северных дуг, поэтому не можем сделать каких-либо выводов о расстоянии между фронтами в этом районе.

4.3. S 255 и S 257

S 255 и S 257 — это две соседние области Н II, разделенные молекулярным облаком и вместе известные как область S 255–257. Поскольку нашей главной целью были наблюдения наиболее плотной части ФДО S 255–257, полученные изображения охватывают только половину каждой области Н II к западу и востоку от ионизирующих звезд в S 255 и S 257 соответственно, а также молекулярное облако между двумя областями Н II (рис. 3). Изображения обеих ионизованных туманностей в полосе фильтра $Br\gamma$ напоминают круги, типичная плотность потока которых составляет около $(4$ – $6) \times 10^{-5}$ эрг s^{-1} cm^{-2} $ster^{-1}$ в S 255 и $(2$ – $3) \times 10^{-5}$ эрг s^{-1} cm^{-2} $ster^{-1}$ в S 257. В S 255 плотность потока имеет постоянное пространственное распределение к юго-западу и западу от ионизирующей звезды, но уменьшается почти линейно к северу. В S 257 $Br\gamma$ -эмиссия не имеет резкой границы и выглядит диффузной. Здесь и далее мы определяем положение фронта ионизации в том месте, где яркость излучения $Br\gamma$ становится в два раза меньше ее максимального уровня. Соответствующие радиусы в проекции S 255 равны $82''$ и $88''$ (или 0.81 пк и 0.87 пк при расстоянии до LS 19, указанном в таблице 1) к западу и юго-западу от S 255 соответственно. Визуальный осмотр изображения S 255 в $Br\gamma$ показывает, что фронт ионизации находится дальше от LS 19, к северу области Н II. В S 257 фронт ионизации расположен на $70''$ и $80''$ (0.84 пк и 0.97 пк на расстоянии до HD 253327, см. таблицу 1) на юге/юго-востоке и севере области соответственно.

На изображении эмиссии H_2 выделяются два типа ярких структур. Первый тип соответствует крупномасштабным ФДО вокруг областей Н II в S 255 и S 257. Поверхностная яркость этих ФДО равна $(4$ – $6) \times 10^{-5}$ эрг s^{-1} cm^{-2} $ster^{-1}$, и выглядят они как изорванные границы ионизованных туманностей. Их протяженность с севера на юг составляет примерно $240''$ – $260''$ (2.3 – 3.03 пк). Следует отметить, что мы видим эмиссию H_2 не только в ФДО вокруг ионизованных областей, но также

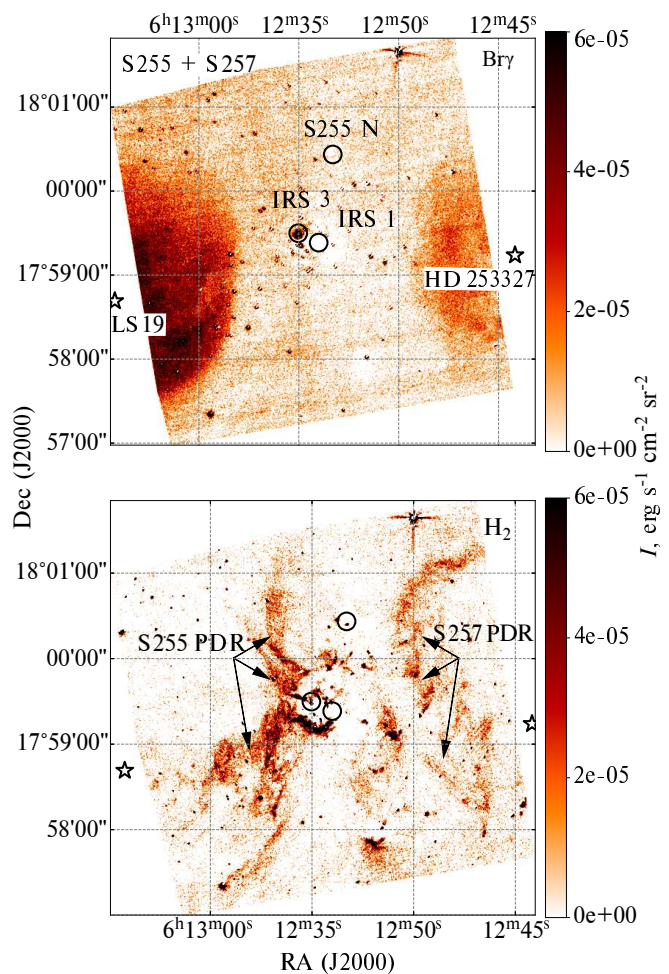


Рис. 3. Изображения ФДО S 255 и S 257 в ближнем ИК-диапазоне после вычитания континуума. Звездочками указаны источники ионизации. Основные точечные ИК-источники показаны кружками. Координаты S 255 IRS 1 и IRS 3 взяты из работы Howard et al. (1997a), положение S255 N — из работы Minier et al. (2005), в которой она фигурирует под названием G192.60-MM1.

и в направлении ярких областей на изображениях $Br\gamma$. На изображениях в H_2 эти рассеянные структуры связаны с передними или задними стенками областей Н II. Искривленный и рваный вид излучающих H_2 -слоев свидетельствует о неравномерном распределении нейтрального вещества в ФДО. Тем не менее, усредняя распределение потока H_2 по азимуту, мы находим пики на $110''$ и $116''$ (1.1 пк и 1.2 пк) от LS 19 к югу и юго-востоку S 255 соответственно. К северу от LS 19 область эмиссии H_2 расположена на расстоянии $120''$ – $150''$ (1.2 – 1.5 пк). Поэтому расстояние между фронтами ионизации и диссоциации составляет для южной и юго-западной частей S 255 0.3 – 0.4 пк в проекции. Для S 257 находим фронт диссоциации на расстоянии $110''$ и $96''$ (1.3 пк и 1.6 пк) от

ионизирующей звезды HD 253327 к югу и востоку соответственно. Таким образом, расстояние в проекции между фронтами ионизации и диссоциации в S 257 составляет 0.4–0.5 пк. Пространство между этими фронтами занято атомарным водородом, а ширина атомарного слоя составляет около трети или половины радиуса областей Н II. Принимая во внимание изорванный вид ФДО в H₂-эмиссии, мы предполагаем, что газ распределен в атомарной оболочке неоднородно и, возможно, содержит несколько слоев или волокон.

Самая яркая область эмиссии H₂, вплоть до $(1-2) \times 10^{-4}$ эрг с⁻¹ см⁻² стер⁻¹, выявляется между крупномасштабными ФДО и ассоциируется с молодыми звездными объектами (МЗО) в S 255 — IRS 1 и IRS 3, — где идет активное звездообразование (Howard et al., 1997a). Две дуги к северу и югу от МЗО напоминают прерывающуюся круглую оболочку с радиусом, примерно равным 11", с IRS 1 и IRS 3 внутри нее. Эти яркие структуры частично сливаются с ФДО S 255. Эмиссии H₂ в направлении S 255 N от погруженной сверхкомпактной области Н II (см. Minier et al., 2005) не наблюдается, как и эмиссии в линиях Brγ и [Fe II]. Этот объект находится слишком глубоко, чтобы его можно было обнаружить в полосах этих фильтров.

4.4. S 140

S 140 представляет собой область Н II, которая расположена на юго-западном крае темной туманности L1204, и источником энергии которой является В0.5 V-звезда HD 211880. Изображение S 140 и ее ФДО с калибровкой по потоку и вычитанием континуума было получено только в фильтре H₂. Излучение в фильтрах Brγ и [Fe II] для анализа слишком слабое. Пытаясь выделить излучение от ФДО, обусловленное HD 211880, мы исключили все излучение, связанное с другой ФДО — S 140 IRS, ионизирующая звезда которой также находится в этом родительском облаке (см. рис. 4 и соответствующий рис. 4 дополнительных материалов к данной статье). Поверхностная яркость излучения H₂ в направлении основной ФДО достигает $(0.8-1) \times 10^{-4}$ эрг с⁻¹ см⁻² стер⁻¹. Излучение H₂ на изображении выглядит как яркая линия в направлении с юга на запад. Ширина ФДО колеблется от 14" в самой яркой западной до 30" в более диффузной южной части ФДО, что соответствует 0.06–0.13 пк в плоскости неба. На самом деле эти значения могут быть меньше, если ФДО представляет собой структуру в виде стенки, расположенной под углом к плоскости неба.

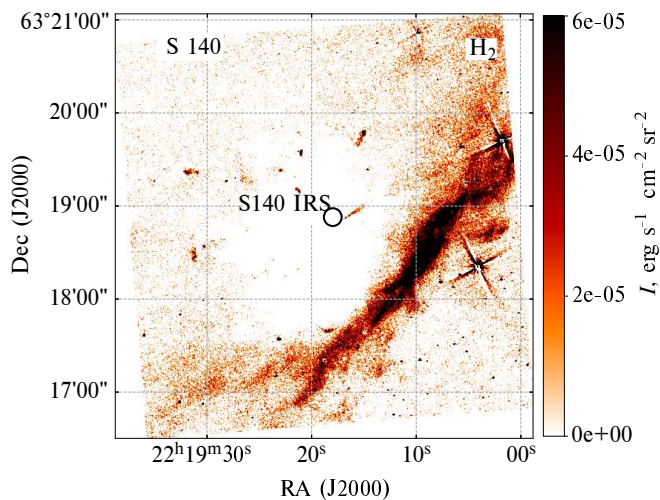


Рис. 4. Изображение в ближнем ИК-диапазоне с вычтенным континуумом. Точечный ИК-источник S 140 IRS выделен кружком. Координаты источника взяты из работы Minchin et al. (1993).

5. АНАЛИЗ

Сравнивая взаимное расположение фронтов ионизации и диссоциации в областях NGC 7538 и S 255–257, отметим, что их слияние и разделение могут быть следствием разных плотностей и скоростей расширения (см., например, Hosokawa и Inutsuka, 2005; Kirsanova et al., 2009; Bron et al., 2018; Kirsanova и Wiebe, 2019). В NGC 7538, где основным источником ионизации является звезда класса O5/O6, скорость расширения газа должна быть выше, чем у S 255–257, поскольку последние ионизируются только звездами класса В (см. таблицу 2). Действительно, в обеих областях Н II есть признаки выдуваемых звездным ветром пузырей и считается, что эти пузыри расширяются (например, Buslaeva et al., 2021; Beuther et al., 2022; Kirsanova et al., 2023), при этом скорость их расширения в NGC 7538 в несколько раз выше, чем в S 255.

Сравнение наблюдаемой поверхностной яркости излучения в фильтре H₂ с расчетными значениями в стационарных моделях ФДО (Sternberg and Dalgarno, 1989) дает нам оценки плотности молекулярного газа в ФДО. Рисунок 9 из указанной работы позволяет получить плотность, если известно УФ-поле в единицах поля Дрейна. Карты распределения УФ-поля в NGC 7538 и S255–257 показаны на рис. 5. Для района дуг 1 и 2 в NGC 7538 получаем $\chi = 170-350$ и, следовательно, плотность газа $10^{4.5} \leq n_{\text{H}_2} \leq 10^6$ см⁻³. Для дуг 3 и 4, где $\chi = 50-80$, имеем $n_{\text{H}_2} \leq 10^4$ см⁻³. Для крупномасштабных ФДО в S 255–257 $\chi = 30-70$, а значит, их плотность меньше, чем у ФДО NGC 7538, и составляет $10^3 \leq n_{\text{H}_2} \leq 10^4$ см⁻³.

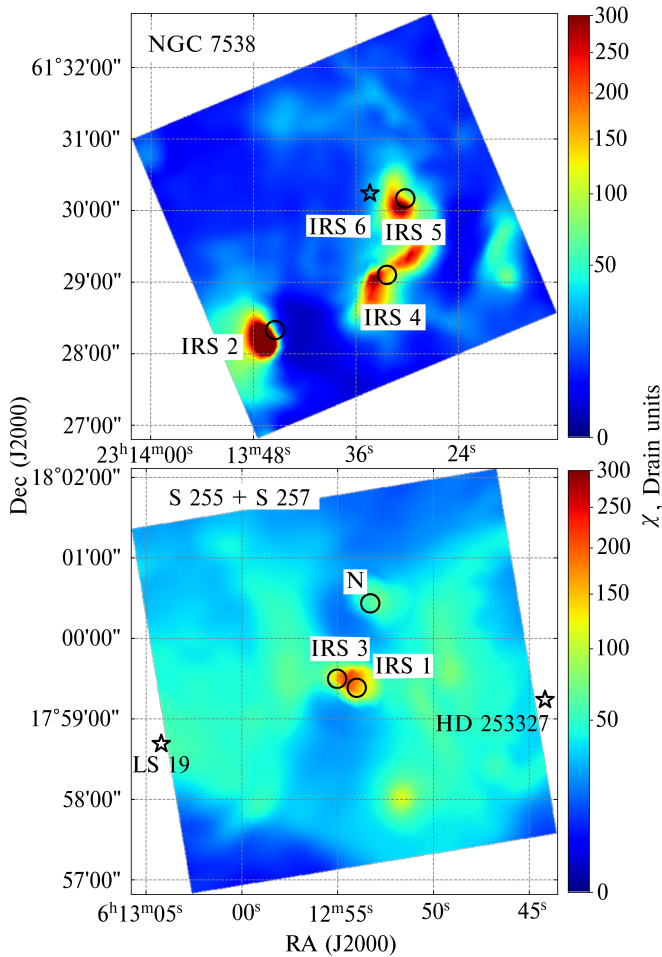


Рис. 5. Ультрафиолетовое поле χ в ФДО в единицах Дрейна.

Оценить плотность атомарного газа n_H в S 255 можно, используя лучевые концентрации газа между ФИ и ФД по данным ViaLactea: $N_H = (4-7) \times 10^{21} \text{ см}^{-1}$ (Marsh and Whitworth, 2019) или $N_H = (2-5) \times 10^{21} \text{ см}^{-1}$ (Ladeyschikov et al., 2021). Учитывая, что ширина атомарного слоя L составляет 0.3–0.4 пк, получаем $n_H = N_H/L \approx 10^4 \text{ см}^{-3}$. Мы не применяем такой же анализ к атомарному газу в NGC 7538, так как в этой области ФИ и ФД сливаются. Несмотря на это, слившиеся и разделенные фронты в NGC 7538 и S 255–257 можно объяснить различной плотностью и/или скоростью расширения, где обе эти величины в первой области выше, чем во второй. Небольшая яркая дуга в области между S 255 и S 257 имеет $\chi \approx 35$, тогда как во внутренней части дуги $\chi \approx 180$. Сравнивая с моделями для стационарного состояния, мы не находим подходящих значений n_{H_2} , которые соответствовали бы этим значениям χ и H_2 -потока одновременно. Таким

образом, высокий поток в ближнем ИК-диапазоне в центральной яркой дуге может быть связан с нестационарными процессами (см. обсуждение ниже).

При сравнении электронной плотности n_e в областях Н II и плотности молекулярного водорода n_{H_2} в окружающих ФДО видим, что в S 255–257 и в NGC 7538 первое всегда меньше второго, вплоть до 1–2 порядков величины. Следовательно, все три области Н II ограничены по плотности и могут увеличиваться в размерах только за счет ударных волн, предшествующих фронтам ионизации. Оценки УФ-поля в S 140 оказываются в диапазоне от $\chi = 200$ (Timmermann et al., 1996) до $\chi = 400$ (Poelman и Spaans, 2005). Учитывая эти значения, находим два диапазона плотностей: $10^3 \leq n_{H_2} \leq 10^{3.5} \text{ см}^{-3}$ и $10^{6.5} \leq n_{H_2} \leq 10^7 \text{ см}^{-3}$, которые могут отвечать как потоку H_2 , так и значениям χ . Первый диапазон ближе к оценкам плотности порядка 10^4 см^{-3} из вышеупомянутых исследований, а также к величине $2.5 \times 10^4 \text{ см}^{-3}$ из работы Ossenkopf et al. (2015), поэтому ниже мы используем 10^4 см^{-3} . Три упомянутые выше работы основаны на анализе спектральных линий, поэтому описание физических условий, которое в них дано, мы считаем более обоснованным.

Оценивая параметр диссоциации χ/n , определяющий большинство свойств ФДО, находим $10^{-4} \leq \chi/n \leq 6 \times 10^{-3} \text{ см}^3$ и $\chi/n \geq 5 \times 10^{-3} \text{ см}^3$ в области дуг 1 + 2 и 3 + 4 NGC 7538 соответственно. Для крупномасштабной ФДО S 255–257 мы имеем $0.002 \leq \chi/n \leq 0.04 \text{ см}^3$ и $0.006 \leq \chi/n \leq 0.04 \text{ см}^3$ для S 140. Относительно невысокие значения χ/n — существенно ниже, чем у ФДО Барьер Ориона (примерно 0.5 см^3 , согласно оценкам плотности в работе Marconi et al. (1998)) — для намного более массивной звезды O-типа в NGC 7538 (см. таблицу 1) могут быть связаны с неопределенностью значения n , которое мы получили, используя только фотометрические данные для одного изображения эмиссии H_2 . Спектры H_2 -излучения в ближнем ИК-диапазоне позволяют более точно оценить параметры газа. Кроме того, значение $\chi = 100-200$ в единицах Дрейна, найденное по температуре пыли, вероятно, представляет собой нижний предел χ , поскольку оно было получено на основе данных космической обсерватории Herschel, чувствительных только к умеренно теплой пыли.

Наши оценки значений УФ-поля и плотности газа позволяют анализировать ФДО с использованием теории переходов от Н I к H_2 , разработанной Sternberg et al. (2014). Переход определяется параметром $\alpha G/2$, который описывает либо распределение плотности газа, либо непрозрачность пыли. В NGC 7538 $\alpha G/2 < 1$, за исключением,

вероятно, внешних дуг, где параметр может быть больше единицы, если $n_{\text{H}} = 10^3 \text{ см}^{-3}$. То же верно и для области S 255-257, где $\alpha G/2 < 1$, но может быть и больше единицы в областях с низкой плотностью. Случай $\alpha G/2 < 1$ означает, что переходы из H I в H₂ в исследованных ФДО постепенны и резкие переходы, характерные для плотных ФДО в однородной среде, отсутствуют.

Применяя нестационарную модель области H II, окруженной ФДО (Kirsanova et al., 2009, 2019), к ионизирующим звездам областей S 255 и S 257 (см. таблицу 1) с тремя различными значениями начальной плотности молекулярного газа n_{H_2} : 10^3 см^{-3} , 10^4 см^{-3} и 10^5 см^{-3} , мы построили модель физической структуры областей H II и их ФДО. Полученные оценки интенсивности УФ-поля χ согласуются с модельными $10 \leq \chi \leq 170$. Для всех рассмотренных начальных значений n_{H_2} получаем ширину области H I, которая вплоть до 10–20 раз меньше наблюдаемой. Это несоответствие можно объяснить неоднородной (клочковатой) структурой ФДО, так как УФ-фотоны могут проникать через области с низкой плотностью и диссоциировать молекулы H₂ дальше от источников возбуждения.

Помимо неоднородной и клочковатой плотности газа в ФДО, проявление ФДО в NGC 7538 и S 255-257 в виде частично разорванных дуг или фрагментов может быть связано с динамическими явлениями. Beuther et al. (2022) предложили несколько пересекающихся расширяющихся пузырьвидных структур, выдуваемых ветром, для объяснения дуг, проявившихся в эмиссии [C II] на 158 мкм, подобных внутренней и внешней дугам на 2 мкм, о которых сообщается в настоящем исследовании. Основной движущий механизм образования дуг крупномасштабных ФДО в S 255-257 (либо тепловое расширение областей H II, либо звездный ветер) до сих пор неизвестен. Buslaeva et al. (2021) обнаружили двухпиковую эмиссию в линии CSH(1–0) в направлении S 255 и широкие профили линий в S 257, вероятно связанные с расширением соответствующих ФДО. Разность скоростей между пиками линии CSH(1–0) составляет $1\text{--}1.5 \text{ км с}^{-1}$ и соответствует медленному тепловому расширению области H II. Однако, поскольку источниками ионизации S 255 и S 257 служат звезды типа O–B, ожидается, что у этих звезд будет звездный ветер (Vink and Sander, 2021). Косвенным свидетельством воздействия звездного ветра может служить также подобное оболочечно-му распределение n_e в S 255 и S 257, найденное в работе Kirsanova et al. (2023). Однако этого недостаточно, чтобы утверждать, что именно ветер создает какие-либо расширяющиеся структуры в этих областях.

О яркой центральной дуге между S 255 и S 257 ранее сообщали Miralles et al. (1997) и Wang et al. (2011). Эти авторы также обнаружили джеты от молодых звездных объектов, которые мы наблюдаем в виде неоднородных структур в центральной части изображения. В первом исследовании выявлено, что за наблюдаемую яркость линий ответственен скорее ударный нагрев, а не высвечивание возбуждаемого ультрафиолетовым излучением H₂, и такой вывод согласуется с нашей интерпретацией (см. выше). Wang et al. (2011) оценили физические свойства газа H₂, получив $T_{\text{rot}} \approx 2400 \text{ K}$ для дуги, и отметили, что наблюдаемая лучевая концентрация $N_{\text{H}_2} = 2.6 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ не может объясняться однотемпературным газом, так как на вращательной диаграмме, по-видимому, имеются как минимум две компоненты. Приведенное выше значение T_{rot} , действительно, намного превышает температуру пыли 20–30 K и $N_{\text{H}_2} \leq 10^{22} \text{ см}^{-2}$, по данным обсерватории Herschel (Marsh et al., 2017; Ladeyschikov et al., 2021), поэтому у нас, предположительно, есть несколько структур с разными физическими параметрами на луче зрения. В некоторых из них пыль могла бы нагреваться ударными волнами, в отличие от крупномасштабных ФДО в области S 255-257, где пыль нагревается преимущественно УФ-фотонами ионизирующих звезд.

Убедительного объяснения происхождения центральной яркой дуги в литературных источниках мы не нашли, кроме гипотезы Miralles et al. (1997), что дуга может быть обусловлена выбросом (джетом). Howard et al. (1997b) связали яркую Br γ -эмиссию в области между S 255 и S 257 с возникшим из-за ветра джетом от молодого звездного объекта, а яркое диффузное H₂-излучение (разрешить дугу этим авторам не удалось) — с выдуваемой ветром полостью. Необходимы дополнительные исследования, чтобы прояснить происхождение этой яркой особенности.

6. ВЫВОДЫ

Проведены фотометрические наблюдения областей фотодиссоциации S 255, S 257, S 140, NGC 7358 и Барьер Ориона на длине волны 2 мкм с использованием узкополосных фильтров для линий Br γ , H₂ и [Fe II], а также узкополосного фильтра K_{cont} и широкополосного H-фильтра для вычитания континуума. Наблюдения проводились с помощью 2.5-м телескопа Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ, оснащенного камерой-спектрографом ASTRONIRCAM для ближнего ИК-диапазона. Главная цель наблюдений заключалась в изучении структуры ФДО, окружающих области H II, и оценке физических условий в них. Были получены следующие основные результаты:

- Обнаруженная нами эмиссия в линиях $B\gamma$ и $[Fe II]$ показывает различное пространственное распределение в NGC 7538, что связано с неоднородной структурой области H II с похожими на дуги участками высокой плотности. Несколько заметных дуг расположено на проекционном расстоянии около 0.3 пк и 0.7 пк (положение фронта ионизации) от ионизирующей звезды NGC 7538 — IRS 6. Неоднородный молекулярный газ, возбуждаемый фотонами дальнего ультрафиолета, проявляется в излучении H_2 в виде протяженных оболочек и дуг со средней шириной 0.18 пк. Фронты ионизации и диссоциации в NGC 7538 сливаются из-за высоких плотности газа и скорости расширения выдуваемого звездным ветром пузыря. Плотность молекулярного водорода составляет $10^{4.5} - 10^6 \text{ см}^{-3}$ в направлении фронта диссоциации H_2 и меньше 10^4 см^{-3} при удалении от молекулярного облака.
- В областях S 255 и S 257 мы обнаружили только эмиссию $B\gamma$, но из-за низкой плотности ионизованного газа не нашли излучения $[Fe II]$. Излучение ионизованного газа слабо поглощается пылью, оптическая толща переднего фона составляет $\tau = 0.2 - 0.4$. Фронты ионизации двух областей H II расположены на расстояниях 0.8–0.9 и 0.8–1.0 пк от ионизирующих звезд LS 19 в S 255 и HD 253327 в S 257 соответственно. На изображении H_2 выделяются два типа структур: крупномасштабные (около 1 пк) диффузные ФДО вокруг протяженных областей H II и локальные области звездообразования, расположенные в молекулярном облаке между S 255 и S 257 и наблюдаемые в виде ярких пятен и выраженной дуги. Проекционное расстояние между фронтами ионизации и диссоциации в S 255 и S 257 составляет около 0.3–0.4 пк. Эти значения выше в 10–20 раз по сравнению с предсказываемыми по данным численного моделирования для однородной плотности газа, но могут быть объяснены неоднородной клочковатой структурой ФДО, в которой фотоны дальнего УФ-излучения проникают в нейтральный газ глубже. Плотность газа в крупномасштабных ФДО составляет порядка $10^3 - 10^4 \text{ см}^{-3}$, что было установлено при сравнении с численными моделями этих ФДО. Мы обнаружили, что возбуждение фотонами дальнего ультрафиолета не может объяснить яркое H_2 -излучение дуги.
- Сравнение с теоретическими моделями областей фотодиссоциации показывает, что переходы H I в H_2 в ФДО NGC 7538, S 255, S 257 и S 140 являются плавными и не имеют резких границ. Этот вывод согласуется с высказанным выше предположением о клочковатой среде.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны А. П. Топчиевой, О. Л. Рябухиной, А. И. Буслаевой и А. В. Моисееву за обсуждения при подготовке статьи. Работа М. С. Кирсановой, П. Э. Боли и Д. З. Вибе поддержана Российским научным фондом, грант № 21-12-00373. Работа А. М. Татарникова поддержана Научно-образовательной школой МГУ имени М. В. Ломоносова «Фундаментальные и прикладные космические исследования».

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы объявляют об отсутствии конфликтов интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. L. D. Anderson, L. Deharveng, A. Zavagno, et al., *Astrophys. J.* **800**, article id. 101 (2015).
2. D. S. Balser and T. M. Bania, *Astron. J.* **156** (6), article id. 280 (2018).
3. C. N. Beaumont and J. P. Williams, *Astrophys. J.* **709**, 791 (2010).
4. M. Beroiz, J. Cabral, and B. Sanchez, *Astronomy and Computing* **32**, article id. 1100384 (2020).
5. H. Beuther, N. Schneider, R. Simon, et al., *Astron. and Astrophys.* **659**, id. A77 (2022).
6. L. Bradley, B. Sipöcz, T. Robitaille, et al., *astropy/photutils: 1.5.0* (2022).
7. E. Bron, M. Agúndez, J. R. Goicoechea, and J. Cernicharo, arXiv e-prints astro/ph:1801.01547 (2018).
8. A. G. A. Brown et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **649**, id. A1, 20 (2021).
9. A. I. Buslaeva, M. S. Kirsanova, and A. F. Punanova, *Astronomy Reports* **65** (6), 488 (2021).
10. J. A. Cardelli, G. C. Clayton, and J. S. Mathis, *Astrophys. J.* **345**, 245 (1989).
11. L. A. Chavarría, L. E. Allen, J. L. Hora, et al., *Astrophys. J.* **682** (1), 445 (2008).
12. E. Churchwell, M. S. Povich, D. Allen, et al., *Astrophys. J.* **649**, 759 (2006).
13. M. Cohen, W. A. Wheaton, and S. T. Megeath, *Astron. J.* **126** (2), 1090 (2003).
14. L. Deharveng, F. Schuller, L. D. Anderson, et al., *Astron. and Astrophys.* **523**, id. A6 (2010).
15. L. Deharveng, A. Zavagno, F. Schuller, et al., *Astron. and Astrophys.* **496**, 177 (2009).
16. T. Foster and C. M. Brunt, *Astron. J.* **150** (5), article id. 147 (2015).
17. J. R. Goicoechea, J. Pety, S. Cuadrado, et al., *Nature* **537** (7619), 207 (2016).
18. E. Habart, R. Le Gal, C. Alvarez, et al., *Astron. and Astrophys.* **673**, id. A149 (2023).
19. H. J. Habing, *Bull. Astron. Inst. Netherlands* **19**, 421 (1968).

20. T. Hosokawa and S.-i. Inutsuka, *Astrophys. J.* **623** (2), 917 (2005).
21. E. M. Howard, J. L. Pipher, and W. J. Forrest, *Astrophys. J.* **481** (1), 327 (1997a).
22. E. M. Howard, J. L. Pipher, and W. J. Forrest, *Astrophys. J.* **481** (1), 327 (1997b).
23. S. Kabanovic, N. Schneider, V. Ossenkopf-Okada, et al., *Astron. and Astrophys.* **659**, id. A36 (2022).
24. M. S. Kirsanova, P. A. Boley, A. V. Moiseev, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **497** (1), 1050 (2020).
25. M. S. Kirsanova, A. V. Moiseev, and P. A. Boley, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* (2023) [in press].
26. M. S. Kirsanova, Y. N. Pavlyuchenkov, D. S. Wiebe, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **488** (4), 5641 (2019).
27. M. S. Kirsanova and D. S. Wiebe, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **486** (2), 2525 (2019).
28. M. S. Kirsanova, D. S. Wiebe, and A. M. Sobolev, *Astronomy Reports* **53**, 611 (2009).
29. V. Kornilov, A. Tokovinin, N. Shatsky, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **382**, 1268 (2007).
30. D. A. Ladeyschikov, M. S. Kirsanova, A. M. Sobolev, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **506** (3), 4447 (2021).
31. D. Lang, D. W. Hogg, K. Mierle, et al., *Astron. J.* **137**, 1782 (2010).
32. M. Luisi, L. D. Anderson, N. Schneider, et al., *Science Advances* **7** (15), eabe9511 (2021).
33. A. Marconi, L. Testi, A. Natta, and C. M. Walmsley, *Astron. and Astrophys.* **330**, 696 (1998).
34. K. A. Marsh and A. P. Whitworth, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **483**, 352 (2019).
35. K. A. Marsh, A. P. Whitworth, O. Lomax, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **471** (3), 2730 (2017).
36. K. M. Menten, M. J. Reid, J. Forbrich, and A. Brunthaler, *Astron. and Astrophys.* **474** (2), 515 (2007).
37. N. R. Minchin, G. J. White, and R. Padman, *Astron. and Astrophys.* **277**, 595 (1993).
38. V. Minier, M. G. Burton, T. Hill, et al., *Astron. and Astrophys.* **429**, 945 (2005).
39. M. P. Miralles, L. Salas, I. Cruz-González, and S. Kurtz, *Astrophys. J.* **488** (2), 749 (1997).
40. L. Moscadelli, M. J. Reid, K. M. Menten, et al., *Astrophys. J.* **693** (1), 406 (2009).
41. A. E. Nadjip, A. M. Tatarnikov, D. W. Toomey, et al., *Astrophysical Bulletin* **72** (3), 349 (2017).
42. C. R. O'Dell and F. Yusef-Zadeh, *Astron. J.* **120** (1), 382 (2000).
43. D. K. Ojha, M. R. Samal, A. K. Pandey, et al., *Astrophys. J.* **738** (2), article id. 1156 (2011).
44. D. K. Ojha, M. Tamura, Y. Nakajima, et al., *Astrophys. J.* **616** (2), 1042 (2004).
45. V. Ossenkopf, E. Koumpia, Y. Okada, et al., *Astron. and Astrophys.* **580**, id. A83 (2015).
46. Y. N. Pavlyuchenkov, M. S. Kirsanova, and D. S. Wiebe, *Astronomy Reports* **57**, 573 (2013).
47. D. R. Poelman and M. Spaans, *Astron. and Astrophys.* **440** (2), 559 (2005).
48. D. Russeil, C. Adami, and Y. M. Georgelin, *Astron. and Astrophys.* **470** (1), 161 (2007).
49. M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening, et al., *Astron. J.* **131** (2), 1163 (2006).
50. A. Sternberg and A. Dalgarno, *Astrophys. J.* **338**, 197 (1989).
51. A. Sternberg and A. Dalgarno, *Astrophys. J. Suppl.* **99**, 565 (1995).
52. A. Sternberg, F. Le Petit, E. Roueff, and J. Le Bourlot, *Astrophys. J.* **790** (1), article id. 10 (2014).
53. A. G. G. M. Tielens, *The Physics and Chemistry of the Interstellar Medium* (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005).
54. A. G. G. M. Tielens and D. Hollenbach, *Astrophys. J.* **291**, 722 (1985a).
55. A. G. G. M. Tielens and D. Hollenbach, *Astrophys. J.* **291**, 747 (1985b).
56. R. Timmermann, F. Bertoldi, C. M. Wright, et al., *Astron. and Astrophys.* **315**, L281 (1996).
57. A. P. Topchieva, M. S. Kirsanova, and A. M. Sobolev, *Astronomy Reports* **62** (11), 764 (2018).
58. P. P. van der Werf, J. Stutzki, A. Sternberg, and A. Krabbe, *Astron. and Astrophys.* **313**, 633 (1996).
59. J. S. Vink and A. A. C. Sander, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **504** (2), 2051 (2021).
60. C. M. Walmsley, A. Natta, E. Oliva, and L. Testi, *Astron. and Astrophys.* **364**, 301 (2000).
61. Y. Wang, H. Beuther, A. Bik, et al., *Astron. and Astrophys.* **527**, id. A32 (2011).
62. C. Watson, M. S. Povich, E. B. Churchwell, et al., *Astrophys. J.* **681** (2), 1341 (2008).

Near infrared view on the photo-dissociation regions S 255, S 257, NGC 7538 and S 140**M. S. Kirsanova¹, A. M. Tatarnikov², P. A. Boley¹, D. S. Wiebe¹, N. M. Maslennikova², and A. A. Tatarnikov²**¹ Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia² Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

We performed photometric observations of the S 255, S 257, S 140, NGC 7538 and the Orion Bar photo-dissociation regions at $2\ \mu\text{m}$ using narrow-band filters centered on $\text{Br}\gamma$, H_2 and $[\text{Fe II}]$ lines as well as the narrow-band K_{cont} and the broad-band H filters for continuum subtraction. The observations were done with the 2.5-m telescope of the SAI Caucasian Mountain Observatory and the near-infrared camera and spectrograph ASTRONIRCAM. We find several high-density arc-like structures on the $\text{Br}\gamma$ and $[\text{Fe II}]$ images of the ionised gas in NGC 7538 and extended shells and arcs visible through the H_2 emission. The H ionisation front and H_2 dissociation front are merged in NGC 7538. In S 255 and S 257 we detected only $\text{Br}\gamma$ emission from the H II regions and bright H_2 emission from the PDRs. The projected distance between the H ionisation and H_2 dissociation fronts are about 0.3–0.4 pc, which cannot be explained using models of uniform medium. Most probably the ionised and neutral gas in these PDRs is clumpy. The HI-to- H_2 transitions in the NGC 7538, S 255, S 257 and S 140 PDRs are gradual with no sharp borders. This conclusion also agrees with the suggestion about clumpy medium.

Keywords: *ISM: abundances—photodissociation regions*