

УДК 524.74; 524.7-54; 524.7-52

## ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЕ В ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ (?) ГАЛАКТИКЕ NGC 5173

© 2022 О. К. Сильченко<sup>1\*</sup>, И. С. Прошина<sup>1\*\*</sup>, А. В. Моисеев<sup>1,2\*\*\*</sup>, Д. В. Опарин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

<sup>2</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 02 сентября 2021 года; после доработки 26 октября 2021 года;  
принята к публикации 26 октября 2021 года

С помощью фотометра с перестраиваемым фильтром MaNGaL на 2.5-метровом телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ мы исследовали звездообразование в богатой газом галактике раннего типа, которая до сих пор считалась эллиптической, — NGC 5173. Газ, вероятно, был в недавнем прошлом аккрецирован галактикой с наклонного к ее диску направления. Звездообразование, которое мы наблюдаем, привело в последние 400 млн. лет к формированию компактных массивных скоплений с ударным возбуждением газа вокруг них — режим звездообразования, соответствующий тому, что обычно наблюдается в сливающихся галактиках типа Антенн. В сочетании с почти солнечной металличностью газа это позволяет сделать вывод о том, что NGC 5173 поглотила очень богатый газом спутник массой не менее 10–20% от собственной звездной массы.

Ключевые слова: галактики: эллиптические и каникулярные — галактики: эволюция — галактики: звездообразование: — галактики: индивидуальные: NGC 5173

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Еще со времен создания схемы классификации морфологических типов галактик Эдвином Хабблом (Hubble 1936) известно, что в эллиптических галактиках нет звездообразования, а в дисковых галактиках (в основном, спиральных) — есть. Это можно связать с тем фактом, что в эллиптических галактиках, как правило, нет холодного газа (хотя и это справедливо не всегда — см. Silchenko and Afanasiev 2008, Vlasyuk and Sil'chenko 2000, Wiklund et al. 1995; 1997). В рамках современных представлений о ключевой роли постоянной аккреции внешнего холодного газа на галактики в истории их звездообразования (Tassoni et al. 2020) эту феноменологическую разницу между эллиптическими и спиральными галактиками можно привязать к разной плотности их окружения. Как известно, эллиптические галактики «предпочитают» скопления: там они составляют около 30% всего населения (Fasano et al. 2000), в то время как в поле — только 3–5% (Naim et al. 1995). В скоплениях галактик доминирующая барионная фракция — горячий рентгеновский межгалактический газ, он разогревает и рассеивает все холодные

облака и потоки холодного газа, пришедшие извне. Таким образом, в скоплениях аккреция холодного газа на галактики сильно затруднена, и, соответственно, звездообразование в них подавлено.

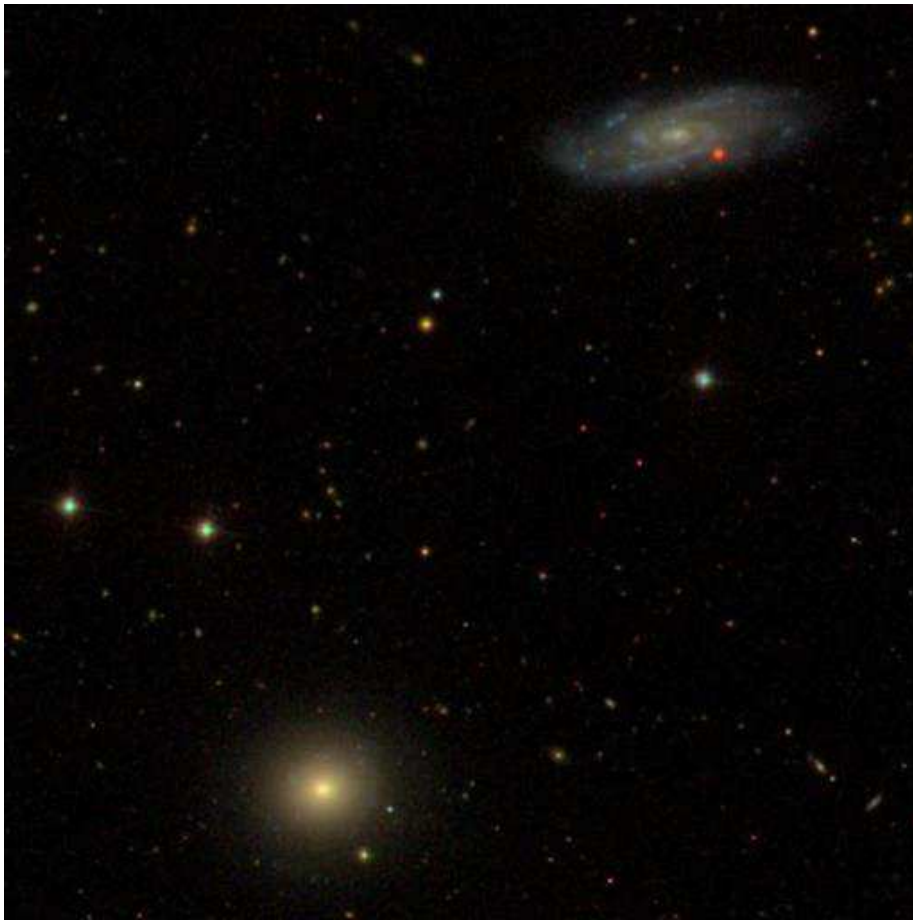
Однако, хотя эллиптических галактик в разреженном окружении, в поле, и немного, но они все же присутствуют. Есть полностью изолированные эллиптические галактики (Sulentic et al. 2006), и есть галактики в малых группах. В данной статье будет рассмотрена эллиптическая галактика, относящаяся к последнему классу, — NGC 5173. Она находится в небольшой группе на расстоянии 38.4 Мпк от нас (Cappellari et al. 2011). Ярчайшая галактика группы — эллиптическая NGC 5198 — наблюдается в 200 кпк в проекции от NGC 5173. База NED<sup>1</sup> выдает еще список из дюжины галактик-членов группы, но большинство из них — слабые карлики. Изучаемая галактика входит в пару, состоящую из эллиптической NGC 5173 и спиральной совсем позднего типа (Scd) NGC 5169. Расстояние в проекции на небо между членами пары — около 55 кпк, то есть примерно как от Млечного Пути до Большого Магелланова Облака. Морфологически галактики не выглядят взаимодействующими. Изображение

\*E-mail: olga@sai.msu.ru

\*\*E-mail: ii.pro@mail.ru

\*\*\*E-mail: moisav@gmail.com

<sup>1</sup><http://ned.ipac.caltech.edu>



**Рис. 1.** Прямое изображение NGC 5173 (внизу) и ее соседки NGC 5169 (вверху) из обзора SDSS; показана площадка неба размером  $7'$ .

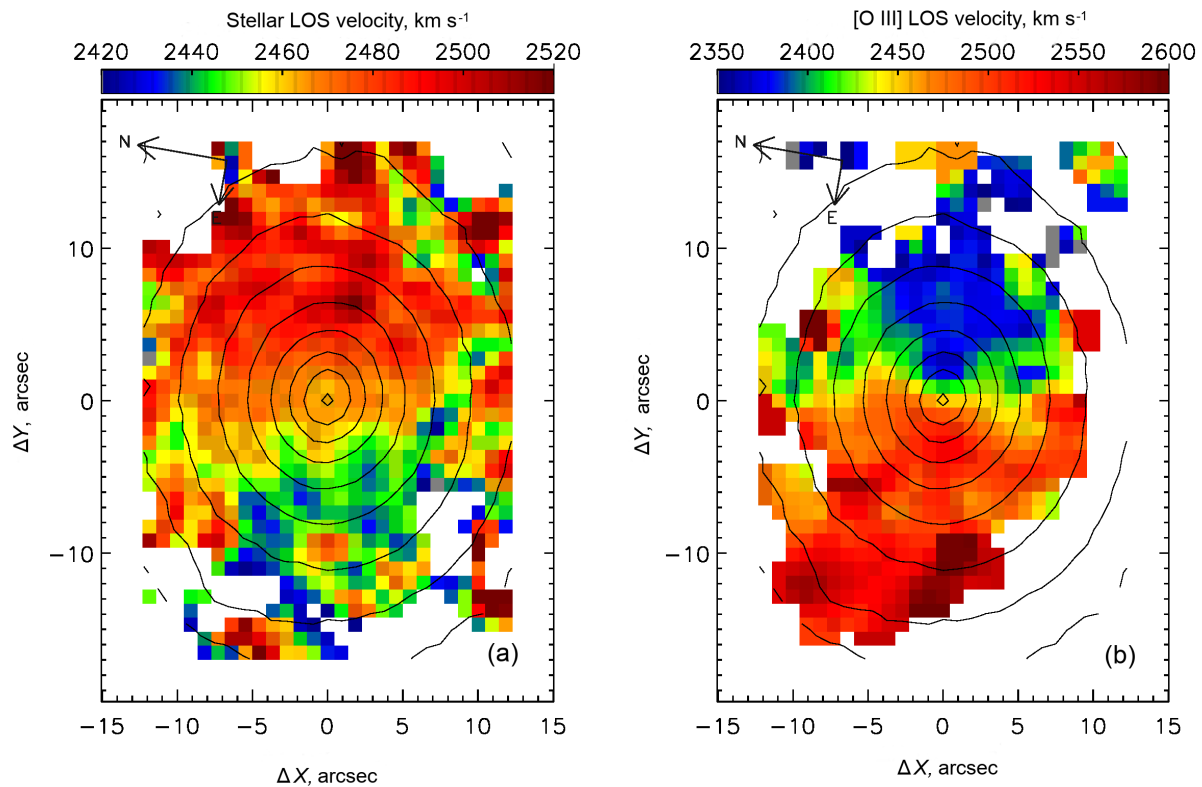
пары из открытого архива SDSS представлено на рис. 1.

Поскольку галактика находится в разреженном окружении, аккреция внешнего холодного газа на нее возможна. И действительно, уже в эпоху первых обзоров галактик в линии 21 см было отмечено, что нейтрального водорода в NGC 5173 много, около миллиарда солнечных масс (Кларк and Raimond 1984). На сегодня NGC 5173 входит в десятку самых богатых нейтральным водородом галактик раннего типа (Young et al. 2018), и этот нейтральный водород собран в большой регулярно вращающийся диск. Внешнее происхождение газа в NGC 5173 не вызывает сомнения. В работе Kannappan and Fabricant (2001) по результатам спектроскопии с длинной щелью впервые было обнаружено, что ионизованный газ в NGC 5173 вращается навстречу звездам. Дальнейшая панорамная спектроскопия в обзоре ATLAS-3D (Cappellari et al. 2011) показала, что ионизованный газ в галактике строго, с разницей кинематических позиционных углов в  $174^\circ \pm 18^\circ$  (Davis et al. 2011), противовращается по отношению к звездам (на-

ша собственная обработка данных SAURON для NGC 5173 представлена на рис. 2). Следовательно, из-за разницы направлений угловых моментов газ NGC 5173 не может быть газом, сброшенным ее звездами в процессе эволюции. Кинематическая большая ось (линия узлов) молекулярного газа  $PA = 100^\circ$  (Alatalo et al. 2013) совпадает с линией узлов большого диска нейтрального водорода, то есть весь холодный газ в NGC 5173 — это один и тот же по происхождению газ. Интересно, что при этом линия узлов газового диска совпадает с направлением большой оси изофот, что бывает в тех случаях, когда газ лежит и вращается в экваториальной плоскости галактического звездного диска. Возникает вопрос: действительно ли NGC 5173 — эллиптическая галактика, или она обладает крупномасштабным звездным диском и, таким образом, является линзовидной?

## 2. СТРУКТУРА NGC 5173

Обсудим, что нам известно о структуре NGC 5173. Во всех имеющихся каталогах и ба-



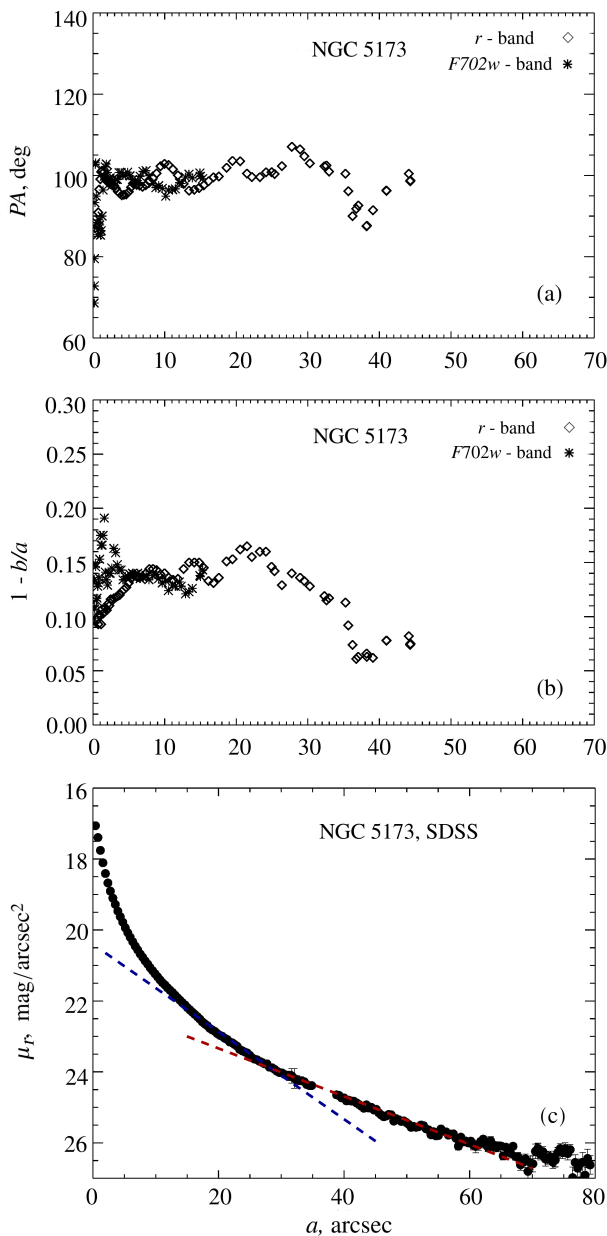
**Рис. 2.** Карты лучевых скоростей звезд (а) и ионизованного газа по линии [O III]  $\lambda$  5007 (б) по данным прибора SAURON в обзоре ATLAS-3D; обработка данных выполнена авторами настоящей статьи.

зах данных, включая NED и LEDA<sup>2</sup>, галактика классифицируется как эллиптическая, E0. Она была неоднократно исследована фотометрически, так как попадала практически во все крупные обзоры близких галактик. В частности, структура NGC 5173 была изучена в рамках обзора S4G (Sheth et al. 2010), который содержит детальный анализ данных, полученных космическим телескопом Spitzer для более чем 2000 близких галактик в полосах 3.6 мкм и 4.5 мкм. Попытки вписать с помощью программы GALFIT в изображение галактики сначала один компонент — девокулеровский балдж, а потом два компонента — балдж и экспоненциальный диск, показали, что учет возможного присутствия диска не улучшает качество аппроксимации изображения в целом, и галактика в обзоре S4G была классифицирована как однокомпонентная эллиптическая (Salo et al. 2015). На наш взгляд, единственным, но зато предельно авторитетным в вопросах морфологии галактик экспертом, который классифицировал NGC 5173 как галактику линзовидную, был Рональд Бута: разглядывая глубокое многоцветное изображение галактики из каталога FIGI, полученное в обзоре SDSS, он приписал ей тип SA(rs)0/a (Buta 2019). И можно понять, какие

<sup>2</sup><http://leda.univ-lyon1.fr>

основания были у него для такого суждения: у галактики явно просматриваются голубоватые клочковатые структуры в центральной области (рис. 1).

Мы проанализировали радиальные профили фотометрических характеристик галактики, используя общедоступные данные обзора SDSS/DR9. Кроме того, NGC 5173 наблюдалась на космическом телескопе им. Хаббла (HST) в 1998 г. в рамках программы Уолтера Яффе (Walter Jaffe) исследования ядерной морфологии эллиптических галактик, ProposID=6357 (Rest et al. 2001). На рис. 3 представлены результаты изофотного анализа — радиальные изменения эллиптичности изофот и позиционного угла их большой оси, а также профиль поверхностной яркости в фильтре  $r$ , полученный азимутальным осреднением в эллипсах с формой, зафиксированной по характеристикам самых внешних измеренных изофот. Поведение изофотных характеристик NGC 5173 совершенно не типично для эллиптических галактик, у которых, как известно, центральные изофоты всегда более круглые, чем внешние. У NGC 5173 в самом центре — наиболее вытянутые изофоты; это становится очевидным, если мы в дополнение к данным SDSS привлечем данные космического телескопа им. Хаббла, полученные с разрешением  $0''.1$ . С



**Рис. 3.** Результаты изофотного анализа: радиальные изменения позиционного угла изофот (а), их эллиптичности (б) и поверхностной яркости в фильтре  $r$  по данным SDSS (с). Цветными штриховыми линиями показаны модели экспоненциального диска: внутреннего,  $\mu_r = 19.9 + 1.086R''/9''^2$  (синяя) и внешнего,  $\mu_r = 21.4 + 1.086R''/16''^2$  (красная).

удалением от центра эллиптичность держится примерно до  $R = 35''$  постоянной, на уровне около 0.15 (что позволяет уверенно измерить и позиционный угол большой оси,  $PA = 101^\circ$ , тоже постоянный по радиусу), а потом резко падает. На  $R > 30''$ , когда изофоты становятся круглыми, в поверхностной яркости начинает доминировать компонент, который отлично описывается экспонентой с масштабом  $16''$  как минимум до расстояния  $62''$

от центра. Согласно классическому определению Гремап (1970), радиальный профиль считается экспоненциальным (что характерно для звездных дисков), если экспонента хорошо описывает его на протяжении двух экспоненциальных масштабов. Это как раз случай внешних областей NGC 5173. В более внутреннюю часть профиля,  $R = 17''-30''$ , нам тоже удалось вписать экспоненту (рис. 3), но ее масштаб оказался  $9''$ , то есть внутренняя экспонента хороша только на протяжении полутора экспоненциальных масштабов. Так что на присутствии внутреннего диска в галактике мы не настаиваем, хотя галактика именно в центре проявляет себя как быстрый ротатор, согласно классификации ATLAS-3D (Emsellem et al. 2011). Однако явные признаки существования протяженного внешнего звездного диска все-таки говорят о том, что NGC 5173 — линзовидная галактика.

### 3. ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЕ В АККРЕЦИРОВАННОМ ГАЗЕ NGC 5173

О присутствии молодых звезд в «эллиптической» галактике NGC 5173 говорили уже давно: Vader and Vigroux (1991) измерили звездные величины в голубой полосе  $B$  для целой россыпи компактных голубых конденсаций в центре галактики и сделали вывод о том, что это гигантские области звездообразования. Vader and Vigroux (1991) даже проследили некую спиральную структуру по этим областям, связав ее с диском нейтрального водорода на границе гравитационной устойчивости.

Мы предприняли наше собственное исследование звездообразования в NGC 5173. Признанным индикатором темпов звездообразования ( $SFR$ ) является поток в эмиссионной линии  $H\alpha$  от суммы зон Стремгрена вокруг молодых массивных звезд (Kennicutt 1998). Мы получили изображения галактики NGC 5173 в узких эмиссионных линиях с помощью картировщика MaNGaL (Mapper of Narrow Galaxy Lines) на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ (Shatsky et al. 2020).

#### 3.1. Наблюдения с MaNGaL

Описание этого прибора (фотометра с пере-страиваемым фильтром) и методика обработки наблюдательных данных представлены в статье Moiseev et al. (2020). Ключевым элементом картировщика является сканирующий интерферометр Фабри–Перо, работающий в низких порядках интерференции — около 20 в красном диапазоне, вблизи линии  $H\alpha$ . Интерферометр работает как узкий фильтр шириной  $13 \text{ \AA}$  для картирования протяженного объекта в эмиссионной линии настраивается на длину волны этой линии с учетом

красного смещения галактики и поправки за движение Земли. Непосредственно до и/или после экспозиции в эмиссионной линии снимается также и изображение галактики в соседней континуальной области путем перестройки интерферометра на 30–50 Åв сторону от длины волны эмиссионной линии. Это позволяет аккуратно вычистить вклад континуума из изображения галактики на длине волны эмиссионной линии, получив «чистый» поток в эмиссии. Приемником служила ПЗС-камера iKon-M934 форматом 1024 × 1024 элемента.

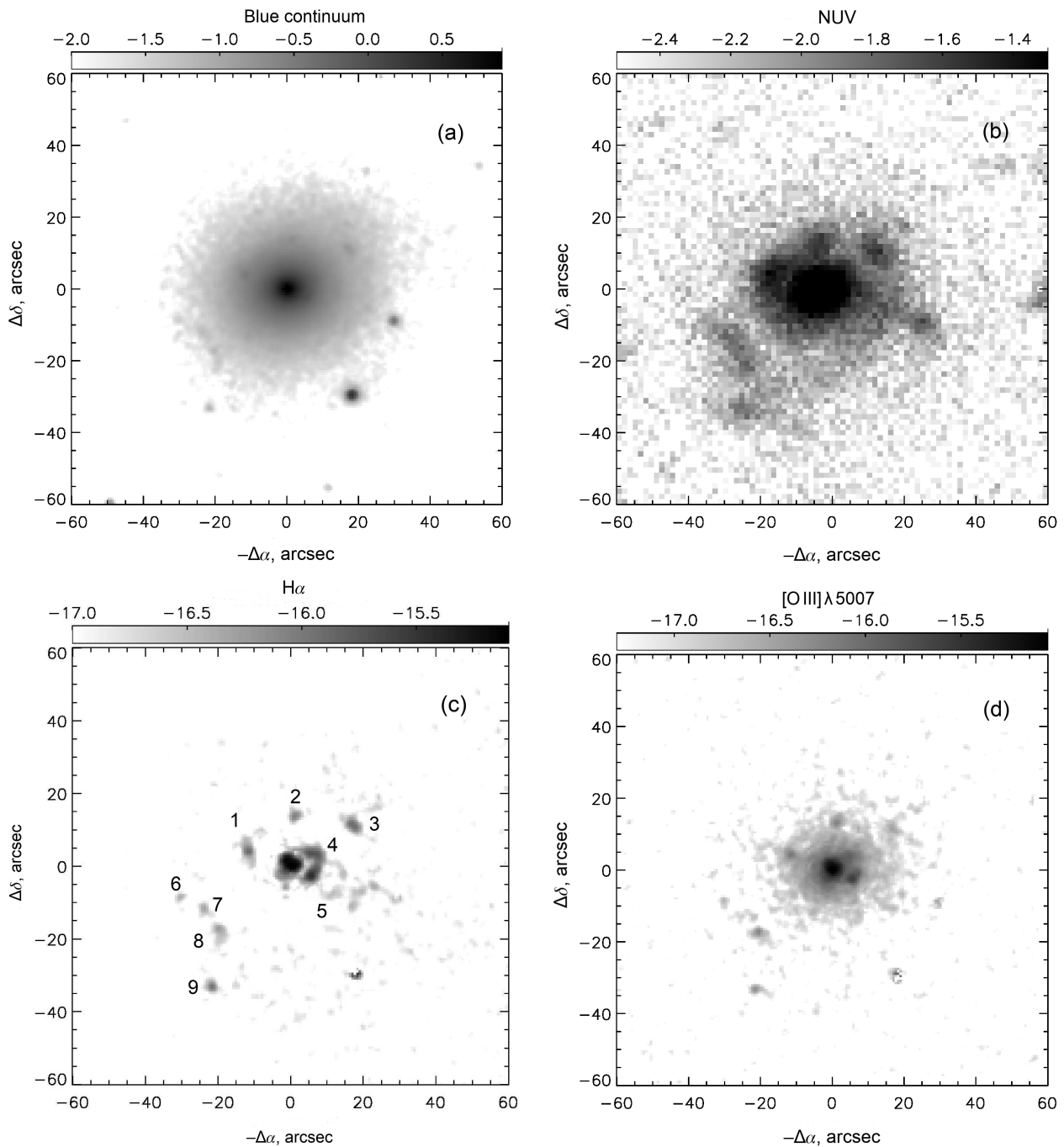
Наблюдения проводились 10 и 11 апреля 2018 г., а также 7 апреля 2021 г.; суммарные времена экспозиции при центрировании фильтра на линии  $H\alpha$  и  $[O III]\lambda 5007$  составили 2100 с и 2100 с в 2018 г. и 1500 с в  $H\alpha$  и 4500 с для линии азота в 2021 г. Ширина полосы пропускания перестраиваемого фильтра в наших наблюдениях равна 13 Å, что позволяло, например, разделить сигналы от  $H\alpha$  и соседней сильной эмиссионной линии  $[N II]\lambda 6583$ . В 2018 г. полоса фильтра для области континуума смещалась в голубую сторону от  $H\alpha$  и в красную — от  $[O III]\lambda 5007$ . В наблюдениях 2021 г. континуум наблюдался по обе стороны от системы линий  $H\alpha + [N II]$ .

Размер поля зрения картировщика в фокусе Нэсмита 2.5-м телескопа — около  $5'.6$ . Мы использовали масштаб  $0''.66$  на пиксель (биннинг  $2 \times 2$ ) в 2018 г. и оригинальный масштаб  $0''.33$  на пиксель в 2021 г. Окончательное пространственное разрешение данных на обработанных картах — около  $2''$ . Некоторые из полученных с MaNGaL карт представлены на рис. 4. На карте интенсивности эмиссионной линии  $H\alpha$  с вычтенным континуумом компактные области излучения пронумерованы; для некоторых из этих областей мы имеем и их собственные звездные величины в фильтре  $B$  из статьи Vader and Vigroux (1991).

### 3.2. Характеристики областей звездообразования в NGC 5173

Дополнительно к данным MaNGaL на рис. 4 показана карта NGC 5173 в ультрафиолете по архивным данным космического телескопа GALEX. Ультрафиолетовое излучение тоже является индикатором темпов звездообразования, только на более длинной временной шкале: если  $SFR$ , измеренный по потоку  $H\alpha$ , отражает текущую интенсивность звездообразования, то  $SFR$ , оцененный по потоку в ультрафиолете, соответствует средним темпам звездообразования за последние 100–200 млн. лет. Все области звездообразования, пронумерованные на карте эмиссии  $H\alpha$ , видны и на карте в ультрафиолете, только пространственное разрешение карт GALEX хуже, чем разрешение наших наземных наблюдений —  $6''$  против  $2''$ .

В таблице 1 даны характеристики областей звездообразования, пронумерованных на рис. 4с, измеренные как по карте потока в эмиссионной линии  $H\alpha$ , так и по данным в дальнем и ближнем ультрафиолете космического телескопа GALEX. Чтобы учесть разное пространственное разрешение ультрафиолетового космического и оптического наземного телескопов, для вычисления потоков использовались разные апертуры, визуально включающие всю конкретную область. Из-за такой разницы в использованных апертурах для корректного сравнения вычисленных темпов звездообразования определялись поверхностные плотности  $SFR$  на квадратный килопарсек. Калибровки индикаторов темпов звездообразования взяты из обзора Kennicutt and Evans (2012). Можно заметить, что у большинства областей звездообразования оценки темпов звездообразования по индикатору «короткой временной шкалы» ( $H\alpha$ ) и «длинной временной шкалы» (ультрафиолет) совпадают, что говорит о длительном формировании молодых звездных скоплений в течение десятков млн. лет. Однако есть и совсем молодая область звездообразования — это область номер 9, в которой звездообразование, вероятно, началось не ранее 10 млн. лет назад. Calzetti (2013) приводила такие поправки для ультрафиолетовых индикаторов звездообразования в случае, если вспышки звездообразования начались недавно: фактор 1.42 в случае  $\tau = 10$  млн. лет и фактор 3.45 в случае  $\tau = 2$  млн. лет. Для области номер 9, где оценки темпов звездообразования по  $H\alpha$  и ультрафиолету расходятся в 2.5 раза, время начала звездообразования должно быть примерно 6 млн. лет назад. Мы также рассчитали и эквивалентные ширины эмиссионной линии  $H\alpha$ , поделив изображение в «чистой» эмиссии на изображение в соседней континуальной области и учтя вклад подлежащего изображению галактики. Учет вклада звездного компонента галактики, не относящегося к областям звездообразования, но попадающего на луч зрения в этих направлениях, сделан следующим образом. Сначала мы вычисляли усредненный по азимуту профиль поверхностной яркости галактики в континууме; расчет производился в две итерации с исключением отскакивающих более чем на  $3\sigma$  точек, что позволяло минимизировать вклад компактных областей. Потом строилось двумерное модельное изображение галактики с этим профилем поверхностной яркости. По модельному изображению оценивался вклад подлежащей галактики в пятисекундных апертурах, центрированных на положения областей звездообразования, измеренные по карте эмиссии  $H\alpha$ . Если мы сравним измеренные эквивалентные ширины эмиссионной линии  $H\alpha$  с моделями эволюционного синтеза интегральных спектров молодых звездных населений Starburst99 (Leitherer et al. 1999), то для мгно-



**Рис. 4.** Карты областей звездообразования в NGC 5173 по данным MaNGaL и GALEX: (a) — карта в континууме, (b) — карта в ближнем ультрафиолете NUV, (c) — карта в эмиссионной линии  $H\alpha$ , (d) — карта в эмиссионной линии  $[O III] \lambda 5007$ .

венной вспышки звездообразования в области 9, а также для области с самым слабым континуумом номер 6 мы получим возрасты 5–6.5 млн. лет, в то время как для областей с умеренной эмиссией  $H\alpha$  и сильным континуумом в предположении продолжительного звездообразования оценка возраста области может доходить до 400 млн. лет (Starburst99, Leitherer et al. (1999)). Все оценки

возрастов сделаны в предположении солнечной металличности. При этом мы полагали, что вся эмиссия  $H\alpha$  происходит из зон Стремгrena вокруг массивных звезд. Если, как мы увидим ниже, часть эмиссии добавлена ударными волнами, вышеприведенные оценки возраста областей звездообразования — только нижние пределы.

Эквивалентная ширина эмиссии  $H\alpha$  являет-

Таблица 1. Характеристики областей звездообразования в NGC 5173

№	Поток в $H\alpha$ , $\text{erg cm}^{-2} \text{c}^{-1}$	$EW(H\alpha)$ , $\text{\AA}$	$\Sigma_{SFR}(H\alpha)$ , $M_{\odot}/\text{yr}/\text{kpc}^2$	$\Sigma_{SFR}(FUV)$ , $M_{\odot}/\text{yr}/\text{kpc}^2$	$\Sigma_{SFR}(NUV)$ , $M_{\odot}/\text{yr}/\text{kpc}^2$	$M_B$ , mag
1	2.0E-15	$23.6 \pm 0.8$	0.0042	$0.0043 \pm 0.0005$	$0.0044 \pm 0.0001$	-12.7
2	1.4E-15	$34.0 \pm 1.3$	0.0031	$0.0029 \pm 0.0001$	$0.0032 \pm 0.0001$	—
3	2.9E-15	$37.2 \pm 1.3$	0.0030	$0.0027 \pm 0.0001$	$0.0026 \pm 0.0002$	-11.5
4	5.9E-15	$21.8 \pm 0.4$	0.0064	$0.0058 \pm 0.0000$	$0.0068 \pm 0.0005$	—
5	7.8E-15	$49.6 \pm 0.8$	0.0080	$0.0057 \pm 0.0000$	$0.0074 \pm 0.0005$	—
6	5.8E-16	$348 \pm 36$	0.0011	$0.0008 \pm 0.0000$	$0.0008 \pm 0.0001$	-9.6
7	8.0E-16	$33.1 \pm 2.2$	0.0016	$0.0012 \pm 0.0000$	$0.0012 \pm 0.0001$	-10.5
8	1.45E-15	$30.8 \pm 1.6$	0.0015	$0.0014 \pm 0.0001$	$0.0013 \pm 0.0001$	-10.9
9	1.5E-15	$44.1 \pm 3.6$	0.0026	$0.0011 \pm 0.0001$	$0.0010 \pm 0.0001$	—

ся также и индикатором, позволяющим отделять «чистые» области звездообразования, в которых газ ионизован молодыми массивными звездами, от излучения ионизованного газа, в возбуждении которого могут доминировать старые звезды на поздних стадиях эволюции, и от излучения диффузного газа галактик, который может быть не связан локально со звездообразованием и который могут возбуждать ударные волны и утекающие из областей звездообразования жесткие ультрафиолетовые кванты. Границей между этими типами возбуждения является значение эквивалентной ширины эмиссии  $H\alpha$   $EW(H\alpha) = 3 \text{\AA}$  (мягкий критерий) (Binette et al. 1994, Cid Fernandes et al. 2011) и  $EW(H\alpha) = 14 \text{\AA}$  (жесткий критерий) (Lacerda et al. 2018). Из данных таблицы 1 мы видим, что все области, выделенные по компактной эмиссии, имеют эквивалентные ширины эмиссии  $H\alpha$  более  $14 \text{\AA}$  и, таким образом, удовлетворяют предположению о возбуждении газа молодыми звездами. Однако, возможно, из-за разного возраста областей звездообразования наблюдается различие морфологии: некоторые из областей звездообразования компактны, а некоторые — диффузны. Это хорошо видно в данных высокого разрешения космического телескопа HST. Снимок NGC 5173 был получен на HST в широком фильтре  $F702W$  с камерой WFPC2, что при масштабе изображения  $0''.045$  на пиксель повышало вероятность разрешить области звездообразования в галактике. На рис. 5 показано это изображение, полученное с приемником PC2 с полем зрения  $35''$ : на панели (а) дана полная картинка, на панелях (b), (c) и (d) приведены отдельно вырезанные кусочки с областями номер 1, 2 и 5. Действительно, некоторые области, попавшие в поле зрения, разрешились. В частности, области 4 и 5 оказались очень протяженными, они распа-

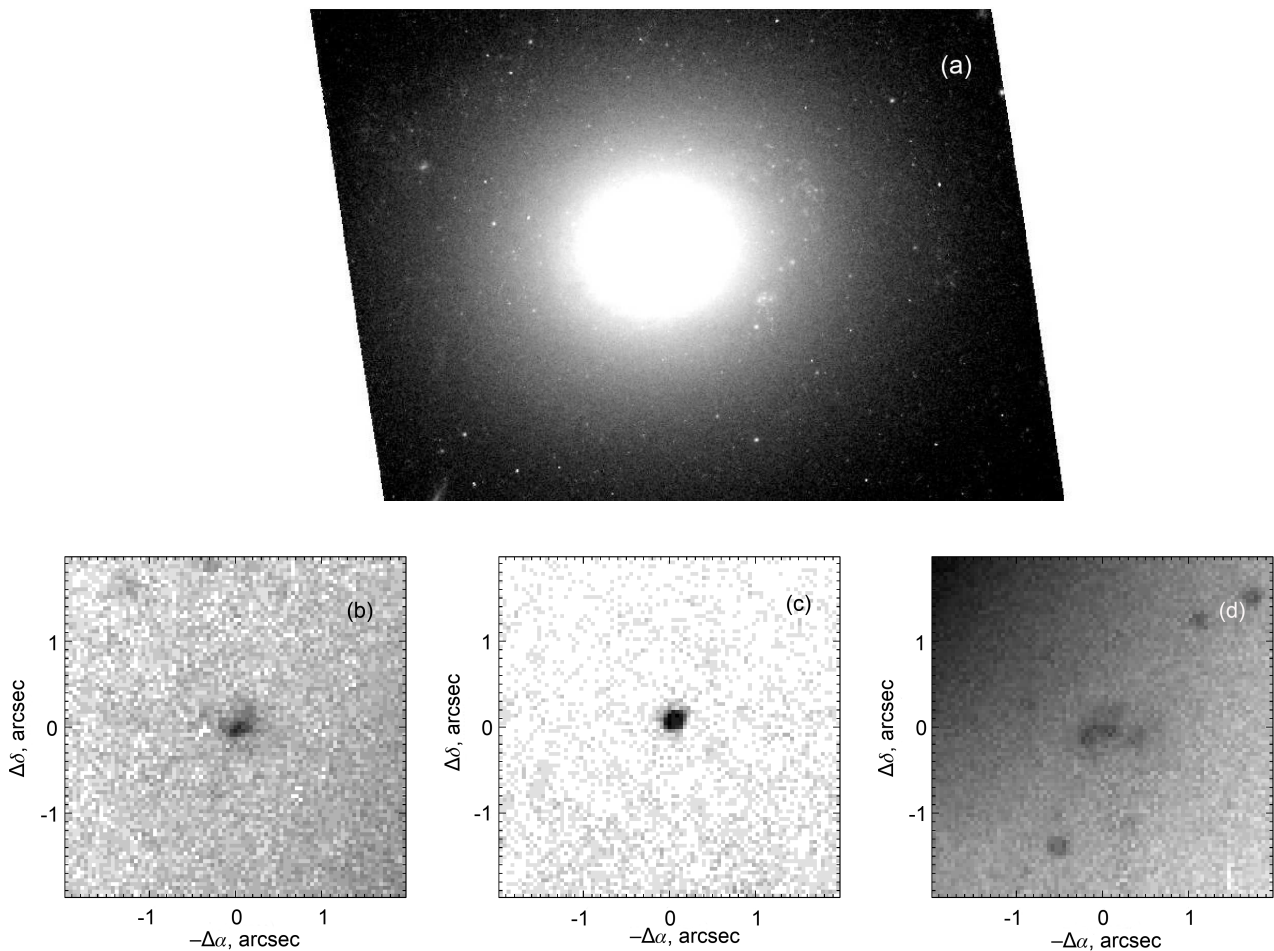
даются на отдельные яркие звезды и диффузный газ между ними. Область номер 1 — самая яркая среди исследованных нами — по-видимому тоже разрешена в данных HST, и ее диаметр около 80 пк. Область номер 2 не разрешилась: ее размер менее 40 пк.

В последнем столбце таблицы 1 мы приводим абсолютные звездные величины для некоторых областей звездообразования согласно Vader and Vigroux (1991). Они покрывают довольно широкий диапазон, от  $M_B = -9.6$  до  $M_B = -12.7$ , и соответствуют массам примерно от  $10^4 M_{\odot}$  до  $5 \times 10^5 M_{\odot}$ . При компактных размерах большинства областей это, скорее, молодые шаровые скопления, наблюдающиеся, как правило, при слиянии галактик (например, у Антенн Anders et al. 2007), а не обычные молодые рассеянные скопления (Larsen 2009). Кинематика газа и масса нейтрального водорода, очевидным образом свидетельствующие в пользу недавнего поглощения довольно массивного спутника, вполне сочетаются с такими свойствами текущего звездообразования (возбуждение и сжатие газа ударной волной) и параметрами звездных скоплений.

### 3.3. Характеристики ионизованного газа

Механизм возбуждения газа можно проверить с помощью так называемой BPT-диаграммы, впервые предложенной Baldwin et al. (1981), на которой сопоставляются отношения потоков линии высокого возбуждения  $[\text{O III}]\lambda 5007$  и линий низкого возбуждения, например,  $[\text{N II}]\lambda 6583$ , к потокам близлежащих линий водорода. Такую диаграмму для наших девяти эмиссионных областей мы показываем на рис. 6. Потоки для линий  $H\alpha$ ,  $[\text{N II}]\lambda 6583$  и  $[\text{O III}]\lambda 5007$  были измерены нами по данным MaNGaL, причем отношения линии



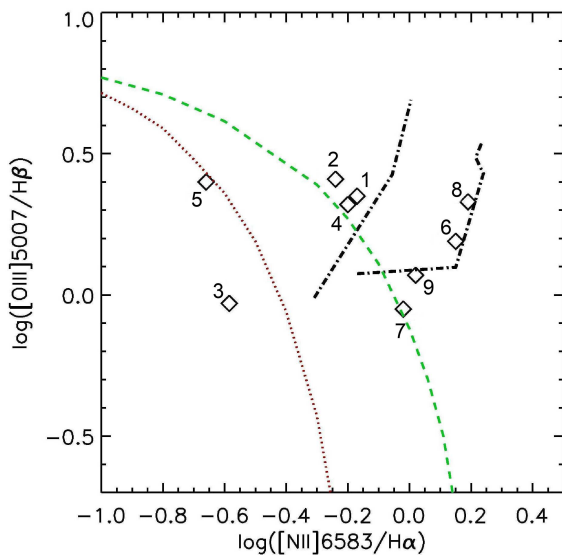


**Рис. 5.** (a) — прямое изображение центральной области NGC 5173 размером  $35'' \times 35''$ , полученное с камерой WFPC2 космического телескопа им. Хаббла в красном фильтре  $F702W$  (взято с сайта [hla.stsci.edu](http://hla.stsci.edu)). (b), (c), (d) — отдельные площадки размером  $4'' \times 4''$  вокруг областей звездообразования номер 1, 2 и 5 соответственно. Пространственное разрешение изображений —  $0''.1$ .

азота к  $H\alpha$  были исправлены за блендирование с крыльями соседних линий согласно калибровке Moiseev et al. (2020), а поток в эмиссии  $H\beta$  был рассчитан делением на 2.87 потока в  $H\alpha$ . В предположении нулевого поглощения такой бальмеровский декремент подходит как для газа, возбужденного молодыми звездами (Osterbrock 1989), так и для газа, возбужденного ударными волнами. Allen et al. (2008) в своих моделях ударного возбуждения получали бальмеровские декременты от 2.9 до 3.0. Сравнение наших измерений ВРТ-диаграммы с моделями, предложенными группой Майкла Допита, показывает, что, несмотря на большие эквивалентные ширины эмиссионных линий  $H\alpha$ , классическими областями Н II можно считать только конденсации номер 3 и 5. Во всех остальных областях звездообразования газ возбужден в основном ударной волной. Мы нанесли на рис. 6 модели для ионизованного газа с плотностью  $1 \text{ см}^{-3}$  и солнечным химическим

составом, возбужденного ударной волной, распространявшейся со скоростью в интервале от 200 до  $900 \text{ км с}^{-1}$ , по расчетам Allen et al. (2008); две ломаные соответствуют чистой ударной волне и волне с прекурсором. Мы видим, что наши области расположились вдоль этих последовательностей. Если мы немного уменьшим металличность, то последовательности на ВРТ-диаграмме для газа, возбужденного ударной волной, сдвинутся влево (Allen et al. 2008) и совпадут с нашими измерениями. И действительно, когда мы оценили металличность газа по «чистой» области Н II (номер 3), воспользовавшись калибровками отношений сильных линий  $[O III] \lambda 5007/H\beta$  и  $[N II] \lambda 6583/H\alpha$ , то у нас получилось, что металличность газа варьируется от 10% (Pettini and Pagel 2004) до 30% (Marino et al. 2013) ниже солнечной. Как раз такая степень обедненности металлами и обеспечит необходимый сдвиг последовательностей возбуждения газа ударными волнами на ВРТ-диаграмме. Любопыт-





**Рис. 6.** Диагностическая BPT-диаграмма для отношений интенсивностей эмиссионных линий в областях звездообразования NGC 5173. Наши измерения с MaNGaL (ромбы) сравниваются с моделями ионизованного газа, возбужденного молодыми массивными звездами, и с моделями ионизованного газа, возбужденного ударной волной. Зеленая штриховая линия — предельное положение для ионизованного газа, возбужденного молодыми массивными звездами, согласно моделями Kewley et al. (2001); слева от этой линии — газ, который может быть возбужден молодыми звездами. Красная пунктирная линия показывает среднюю последовательность для ядер галактик, в которых идет активное звездообразование (данные обзора SDSS, Kauffmann et al. 2003). Черный штрих-пунктир — модели ионизованного газа с плотностью  $1 \text{ cm}^{-3}$  и солнечным химическим составом, возбужденного ударной волной, по расчетам Allen et al. (2008); правая ломаная соответствует чисто ударному возбуждению, левая — ударному возбуждению с прекурсором.

но, что на BPT-диаграмме (рис. 6) заметно «геометрическое» разделение областей звездообразования, в которых газ возбужден ударными волнами: области без признаков присутствия прекурсора расположены все на восток от центра галактики (см. рис. 4). На севере и северо-востоке расположились области, возбужденные ударной волной, прошедшей по прекурсор, а самое «спокойное» место на западе от ядра, там наблюдается звездообразование в диффузных областях, не возмущенное ударной волной. Возможно, по этим данным можно было бы уточнить направление прихода поглощенного спутника.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

##### 4.1. Происхождение газа в галактике раннего типа NGC 5173

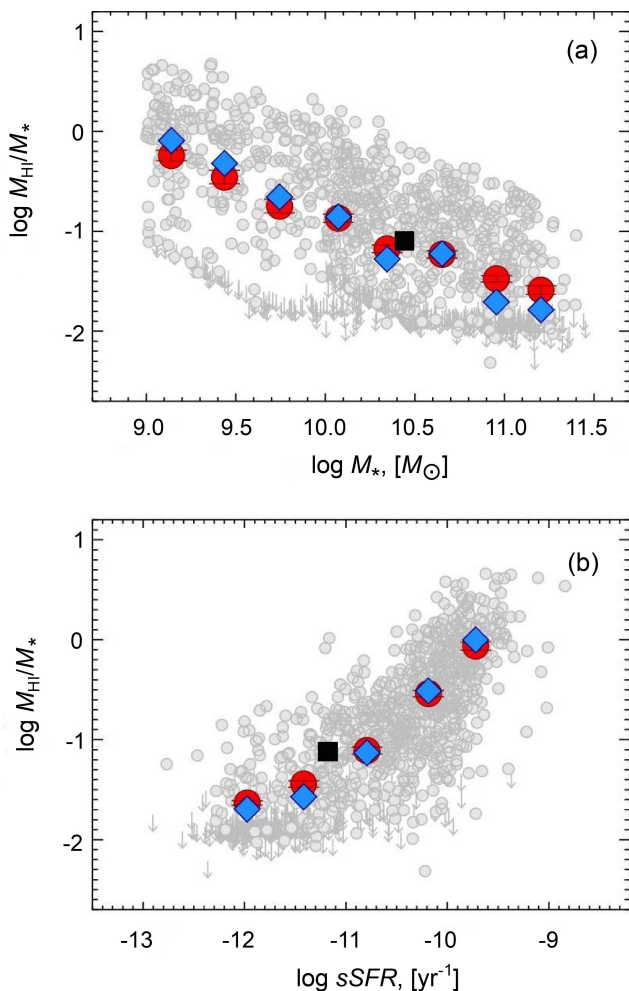
Газ в NGC 5173 недавно пришел извне, поскольку вращается независимо от звездного компонента. Следовательно, количество газа и условия

в нем могут зависеть исключительно от обстоятельств мерджинга. Откуда газ мог прийти? Возникает предположение, что источником газа могла бы быть галактика позднего типа NGC 5169, до которой в проекции на небесную сферу всего около 55 кпк и которая имеет большую ось, параллельную кинематической линии узлов NGC 5173. Однако галактики не выглядят взаимодействующими. Более того, картирование скоростей в линии 21 см показало, что спины газовых дисков NGC 5169 и NGC 5173 антипараллельны (Knapp and Raimond 1984). Газ NGC 5173 не мог также унаследовать спин и от орбитального момента вращения пары NGC 5173/NGC 5169: направление на соседку перпендикулярно кинематической линии узлов NGC 5173. Вероятно, все-таки имел место малый мерджинг — слияние со спутником, богатым газом. Причем, судя по количеству газа,  $2 \times 10^9 M_\odot$  (Serra et al. 2012), спутник должен был быть весьма массивным, не менее 10–20% от массы самой NGC 5173.

##### 4.2. Звездообразование в аккрецированном газе

Линзовидная галактика NGC 5173, которая во многих работах классифицируется как эллиптическая, на самом деле обладает заметным количеством холодного газа и существенным текущим звездообразованием. В рамках комплексного исследования галактик ранних типов в обзоре ATLAS-3D в ней было обнаружено  $2.1 \times 10^9 M_\odot$  нейтрального водорода (Serra et al. 2012) и  $2.3 \times 10^8 M_\odot$  молекулярного водорода (Alatalo et al. 2013) при звездной массе галактики  $\lg M_* = 10.42$  (Yıldız et al. 2017). Полные темпы недавнего звездообразования, которые мы оценили по интегральной величине галактики в полосе FUV обзора GALEX, приведенной в базе данных NED, с помощью калибровки  $SFR$  из работы Lee et al. (2009) равны  $0.16 M_\odot$  в год. Насколько нормально такое обилие газа и темпы звездообразования в среднего размера линзовидной галактике-члене небольшой группы (или просто пары галактик)?

Если мы проверим соответствие характеристик NGC 5173 известным масштабирующим зависимостям для дисковых галактик ближней Вселенной, то убедимся, что, несмотря на необычное происхождение газа, галактика не сильно выпадает из общих связей. На зависимости относительной массы нейтрального водорода  $\lg(M_{\text{HI}}/M_*)$  от массы звездной компоненты  $\lg M_*$ , установленной в Catinella et al. (2018) по данным обзора GALEX+Arecibo xGASS, NGC 5173 располагается точно на медианном тренде (рис. 7). На зависимости специфического темпа звездообразования  $\lg sSFR$  от относительной массы нейтрального водорода  $\lg(M_{\text{HI}}/M_*)$  (рис. 7) она находится в общем



**Рис. 7.** Положение NGC 5173 (черный квадрат) на масштабирующих соотношениях для галактик со звездообразованием и нейтральным газом из работы Catinella et al. (2018); красными кружками и голубыми ромбами показаны взвешенные средние и взвешенные медианы относительной массы нейтрального водорода в бинах по звездной массе галактик и по специфическому темпу звездообразования.

облаке точек, но смещена на фактор 2 в сторону пониженных темпов  $sSFR$  относительно медиан. На третьей, основной, масштабирующей зависимости — темпов звездообразования от звездной массы галактики, — которую мы проверили по свежим калибровкам обзора xGASS (Janowiecki et al. 2020), галактика попадает ниже главной последовательности и относится, скорее, к «зеленой долине». То есть темп звездообразования в NGC 5173 несколько меньше, чем у спиральных галактик такой же массы (и с таким же количеством газа). Возможно, физика этого отличия в том, что газ приходит в диск NGC 5173 не строго в плоскости ее диска — карта плотности молекулярного газа показывает вытянутость под углом к большой оси внешних изофот (Alatalo et al. 2013). Как мы показали на примере выборки S0-галактик

с протяженными газовыми дисками в нашей работе (Sil'chenko et al. 2019), наклонная аккреция внешнего газа на диск галактики приводит к разогреву его ударными волнами, и звездообразование подавляется.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью фотометра с перенастраиваемым узкополосным фильтром MaNGaL на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ мы исследовали звездообразование в богатой газом галактике раннего типа NGC 5173, которая до сих пор считалась эллиптической. Были построены и проанализированы карты галактики в узких полосах, центрированных на сильные эмиссионные линии ионизованного газа  $H\alpha$ ,  $[N II] \lambda 6583$  и  $[O III] \lambda 5007$ . Обнаружены компактные конденсации в эмиссионных линиях, особенно выделяющиеся в линии  $H\alpha$  и являющиеся областями звездообразования/молодыми звездными скоплениями. Галактика NGC 5173 богата газом, который, вероятно, был совсем недавно аккрецирован с наклонного по отношению к звездному диску галактики направления; в экваториальной плоскости газ противовращается относительно звезд. Суммарный темп звездообразования, который мы оценили по ультрафиолетовому потоку, несколько ниже темпа, свойственного спиральным галактикам с такой же звездной массой и массой газа — NGC 5173 располагается ниже главной последовательности, что предположительно связано именно с наклонным направлением прихода газа в галактику. Мощный поток газа с наклонного к плоскости звездного диска направления, возможно, сопровождался развитием в газе ударных волн, что в глобальном смысле подавляло звездообразование, но локально привело к формированию компактных массивных звездных скоплений в последние 100 млн. лет. Ударное возбуждение газа, наблюдающееся вокруг большинства из этих скоплений, — это режим стимулированного звездообразования, соответствующий тому, что обычно наблюдается в большом мерджинге в сливающихся галактиках типа Антенн. С учетом почти солнечной металличности газа, оцененной по сильным эмиссионным линиям в сгустке с возбуждением типа H II-области, такое сочетание свойств позволяет нам сделать вывод о том, что NGC 5173 поглотила очень богатый газом спутник массой не менее 10–20% от ее собственной звездной массы.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем признательность анонимному рецензенту, внимательное прочтение статьи которым позволило значительно улучшить представление наших результатов. В работе мы пользовались данными Базы внегалактических данных NED (NASA/IPAC), которая управляется Лабораторией

реактивного движения и Калифорнийским технологическим институтом по контракту с НАСА. Наши результаты опираются на публичные данные космического телескопа им. Хаббла, взятые из Hubble Legacy Archive (коллаборация Telescope Science Institute, the Space Telescope European Coordinating Facility и Canadian Astronomy Data Centre), и на данные космического телескопа GALEX (NASA Galaxy Evolution Explorer), управлявшимся Калифорнийским технологическим институтом по контракту с НАСА номер NAS5-98034. Данные GALEX взяты из публичного архива MAST (Mikulski Archive for Space Telescopes), который поддерживается космическим офисом НАСА по гранту NNX13AC07G и другим грантам. Также мы использовали данные обзора SDSS-III (<http://www.sdss3.org/>), который поддержан Фондом Альфреда П. Слоана и ассоциацией университетов.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Мы благодарим за поддержку нашей работы Междисциплинарную научно-образовательную Школу МГУ «Фундаментальные и прикладные исследования космоса».

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. K. Alatalo, T. A. Davis, M. Bureau, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **432** (3), 1796 (2013).
2. M. G. Allen, B. A. Groves, M. A. Dopita, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **178** (1), 20 (2008).
3. P. Anders, N. Bissantz, L. Boysen, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **377** (1), 91 (2007).
4. J. A. Baldwin, M. M. Phillips, and R. Terlevich, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **93**, 5 (1981).
5. L. Binette, C. G. Magris, G. Stasińska, and A. G. Bruzual, *Astron. and Astrophys.* **292**, 13 (1994).
6. R. J. Buta, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **488** (1), 590 (2019).
7. D. Calzetti, *Star Formation Rate Indicators*, (Cambridge University Press, Cambridge, 2013).
8. M. Cappellari, E. Emsellem, D. Krajnović, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **413** (2), 813 (2011).
9. B. Catinella, A. Saintonge, S. Janowiecki, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **476** (1), 875 (2018).
10. R. Cid Fernandes, G. Stasińska, A. Mateus, and N. Vale Asari, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **413** (3), 1687 (2011).
11. T. A. Davis, K. Alatalo, M. Sarzi, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **417** (2), 882 (2011).
12. E. Emsellem, M. Cappellari, D. Krajnović, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **414** (2), 888 (2011).
13. G. Fasano, B. M. Poggianti, W. J. Couch, et al., *Astrophys. J.* **542** (2), 673 (2000).
14. K. C. Freeman, *Astrophys. J.* **160**, 811 (1970).
15. E. P. Hubble, *Realm of the Nebulae* (Yale University Press, New Haven, 1936).
16. S. Janowiecki, B. Catinella, L. Cortese, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **493** (2), 1982 (2020).
17. S. J. Kannappan and D. G. Fabricant, *Astron. J.* **121** (1), 140 (2001).
18. G. Kauffmann, T. M. Heckman, C. Tremonti, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **346** (4), 1055 (2003).
19. J. Kennicutt, Robert C., *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **36**, 189 (1998).
20. R. C. Kennicutt and N. J. Evans, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **50**, 531 (2012).
21. L. J. Kewley, M. A. Dopita, R. S. Sutherland, et al., *Astrophys. J.* **556** (1), 121 (2001).
22. G. R. Knapp and E. Raimond, *Astron. and Astrophys.* **138**, 77 (1984).
23. E. A. D. Lacerda, R. Cid Fernandes, G. S. Couto, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **474** (3), 3727 (2018).
24. S. S. Larsen, *Astron. and Astrophys.* **494** (2), 539 (2009).
25. J. C. Lee, A. Gil de Paz, C. Tremonti, et al., *Astrophys. J.* **706** (1), 599 (2009).
26. C. Leitherer, D. Schaerer, J. D. Goldader, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **123** (1), 3 (1999).
27. R. A. Marino, F. F. Rosales-Ortega, S. F. Sánchez, et al., *Astron. and Astrophys.* **559**, A114 (2013).
28. A. Moiseev, A. Perepelitsyn, and D. Oparin, *Experimental Astronomy* **50** (2–3), 199 (2020).
29. A. Naim, O. Lahav, R. J. Buta, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **274** (4), 1107 (1995).
30. D. E. Osterbrock, *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei* (University Science Books, Herndon, 1989).
31. M. Pettini and B. E. J. Pagel, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **348** (3), L59 (2004).
32. A. Rest, F. C. van den Bosch, W. Jaffe, et al., *Astron. J.* **121** (5), 2431 (2001).
33. H. Salo, E. Laurikainen, J. Laine, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **219** (1), 4 (2015).
34. P. Serra, T. Oosterloo, R. Morganti, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **422** (3), 1835 (2012).
35. N. Shatsky, A. Belinski, A. Dodin, et al., in *Proc. All-Russian Conf. on Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century, Nizhny Arkhyz, Russia, 2020* Ed. by I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. F. Valeev, and D. O. Kudryavtsev, (Spec. Astrophys. Obs. Russian Acad. Sci., Nizhny Arkhyz, 2020), pp. 127–132 (2020).
36. K. Sheth, M. Regan, J. L. Hinz, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **122** (898), 1397 (2010).

37. O. K. Silchenko and V. L. Afanasiev, *Astronomy Reports* **52** (11), 875 (2008).
38. O. K. Sil'chenko, A. V. Moiseev, and O. V. Egorov, *Astrophys. J. Suppl.* **244** (1), 6 (2019).
39. J. W. Sulentic, L. Verdes-Montenegro, G. Bergond, et al., *Astron. and Astrophys.* **449** (3), 937 (2006).
40. L. J. Tacconi, R. Genzel, and A. Sternberg, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **58**, 157 (2020).
41. J. P. Vader and L. Vigroux, *Astron. and Astrophys.* **246**, 32 (1991).
42. V. V. Vlasyuk and O. K. Sil'chenko, *Astron. and Astrophys.* **354**, 28 (2000).
43. T. Wiklind, F. Combes, and C. Henkel, *Astron. and Astrophys.* **297**, 643 (1995).
44. T. Wiklind, F. Combes, C. Henkel, and F. Wyrowski, *Astron. and Astrophys.* **323**, 727 (1997).
45. M. K. Yıldız, P. Serra, R. F. Peletier, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **464** (1), 329 (2017).
46. L. M. Young, P. Serra, D. Krajnović, and P.-A. Duc, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **477** (2), 2741 (2018).

### Star Formation in the Elliptical (?) Galaxy NGC 5173

O. K. Sil'chenko<sup>1</sup>, I. S. Proshina<sup>1</sup>, A. V. Moiseev<sup>1,2</sup>, and D. V. Oparin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

<sup>2</sup>Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

Using the MaNGaL tunable-filter photometer at the 2.5-m telescope of the Caucasian Mountain Observatory of the Sternberg Astronomical Institute of Lomonosov Moscow State University, we studied star formation in an early-type gas-rich galaxy, which was until now considered to be elliptical,—NGC 5173. The gas has probably been accreted in the recent past by the galaxy from a direction inclined to its disk. Star formation that we observe now has led in the past 400 Myr to the formation of compact massive clusters with shock excitation of gas around them—a star formation behavior corresponding to what is usually observed in the interacting Antennae-like galaxies. In combination with the almost solar metallicity of the gas, this allows us to conclude that NGC 5173 has assimilate a very gas-rich companion with a mass of at least 10–20% of its own stellar mass.

Keywords: *galaxies: elliptical and lenticular—galaxies: evolution—galaxies: star formation:—galaxies: individual: NGC 5173*