

ГАЛАКТИКИ С АНОМАЛЬНО ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ГАЗА В ДИСКЕ

© 2022 г. А. В. Засов^{1, 2, *}, Н. А. Зайцева²

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Физический факультет, Москва, Россия

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия

*E-mail: zasov@sai.msu.ru

Поступила в редакцию 12.05.2022 г.

После доработки 16.06.2022 г.

Принята к публикации 21.06.2022 г.

Рассматривается содержание газа в галактиках с аномально высокой относительной массой водорода M_{HI}/M_* для данной массы звездного населения M_* (VHR-галактики), с использованием имеющихся выборок таких галактик. Показано, что внутри оптического диаметра D_{25} масса HI в VHR-галактиках, также, как и в галактиках с “нормальным” содержанием HI, ограничена значением, зависящим от удельного момента вращения диска. Внешние газовые диски за пределами D_{25} , содержащие в большинстве рассматриваемых галактик основное количество HI, являются гравитационно устойчивыми, и при этом, как правило, на большом интервале радиальных расстояний они сохраняют примерно постоянное значение параметра устойчивости Q_{gas} . По-видимому, внешние диски VHR-галактик не являются недавно приобретенными, а имеют большой возраст, причем гравитационная неустойчивость была главным регулятором звездообразования при их формировании. В этом случае протяженные диски галактик должны иметь звездную составляющую низкой яркости из старых звезд, простирающуюся далеко за пределами оптического диаметра D_{25} .

Ключевые слова: спиральные галактики, содержание газа в галактиках, кинематика галактик

DOI: 10.31857/S0004629922090122

1. ВВЕДЕНИЕ

Содержание газа в дисках галактик является ключевым фактором, определяющим текущую активность звездообразования и, следовательно, характер эволюции галактик. Основное количество газа в галактических дисках в современную эпоху принадлежит атомарному водороду HI, за исключением внутренних областей галактик, где часто преобладает молекулярный газ (см., напр., [1]).

Радиальное распределение плотности газа в галактических дисках, как и его масса, зависит от целого ряда внешних и внутренних факторов, и должно было меняться в процессе эволюции. Масса газа в диске уменьшается в результате звездообразования, а также в результате активности массивных звезд, приводящей к выбросу газа из диска. С другой стороны, аккреция газа на галактику, поглощение спутников, содержащих газ, а также падение на диск остывающего газа гало, в принципе, могут компенсировать потери газа в диске, поддерживая его содержание на опреде-

ленном уровне, где эти процессы примерно сбалансированы (т.н. “bathtub model”, см., напр., [2]). Очевидно, что перечисленные факторы играют разную роль в зависимости от массы галактики, ее структуры и кинематики, темпов звездообразования, а также от ее непосредственного окружения. Казалось бы, это должно было привести к большому разнообразию современных значений относительной массы газа и его радиального распределения в галактиках. Однако, как ни парадоксально, несмотря на многообразие условий, в которых происходит эволюция газового состава в разных галактиках, масса HI в них (по крайней мере, в галактиках с текущим звездообразованием) оказывается вполне предсказуемой величиной, поскольку коррелирует с такими их консервативными внутренними параметрами, как диаметр оптического диска (D_{25}), привязываемый к B -изофоте 25 зв.вел/кв.с, скорость вращения V_{rot} , или удельный угловой момент диска, пропорциональный $V_{\text{rot}}D_{25}$ (см. обсуждения вопроса в работе [3] и ссылки в ней). При этом ра-

диальное распределение поверхностной плотности HI (если исключить центральную область диска, где часто преобладает молекулярный газ) в большинстве галактик имеет сходный профиль, несмотря на различие галактик по размеру или массе, если пронормировать радиальную координату на оптический радиус или радиус газового диска R_{HI} [4, 5].

Относительная масса нейтрального водорода $\mu = M_{\text{HI}}/M_*$ в спиральных галактиках коррелирует также с массой звездного населения M_* , систематически уменьшаясь с ростом M_* (см., напр., [5–7]). Соотношение между μ и M_* наряду с зависимостью между M_{HI} и светимостью галактик принимается в качестве опорным для выделения галактик с аномально высоким содержанием газа. Ниже, для краткости, будем называть эти галактики VHR (very HI-rich) галактиками.

Выборки галактик, отличающихся аномально высокой массой HI, представлены в целом ряде работ. В работе [8] в рамках проекта Bluedisk на радиоинтерферометре WSRT была исследована выборка 25 массивных галактик ($\log M_*/M_\odot > 10$) с активным звездообразованием, которые обладают аномально высоким значением относительной массы газа μ для данной массы звездного населения. Было показано, что эти галактики имеют протяженные диски HI, содержащие, как правило, основную часть массы газа, диаметры которых D_{HI} (в пределах принятой пороговой плотности $1 M_\odot/\text{пк}^2$) в несколько раз превосходят оптические диаметры D_{25} . Наиболее протяженные диски HI достигают диаметра ≈ 100 кпк при $M_{\text{HI}} \approx 2 \times 10^{10} M_\odot$. Тем не менее VHR-галактики этой выборки лежат на продолжении зависимости $M_{\text{HI}} - D_{\text{HI}}$ для нормальных галактик. Заметим, что, по условиям отбора, выборка Bluedisk смещена в сторону объектов с интенсивным звездообразованием.

Ряд VHR-галактик высокой светимости ($M_K < 22$) был выделен и исследован авторами в работах [9], [10], [11]. Эти галактики были отобраны на основе Паркского слепого обзора в линии HI (HI eXtreme (NIX) galaxy survey). По принятому критерию отбора, масса M_{HI} в них по крайней мере в 2.5 раза превышает значение, ожидаемое из зависимости $M_{\text{HI}} - L_R$ (где L_R – светимость в R-полосе) для контрольной выборки. Зависимость $M_{\text{HI}} - D_{\text{HI}}$ для этих галактик была продолжена еще дальше, чем в [8] (до $M_{\text{HI}} \approx 10^{11} M_\odot$), хотя в области больших диаметров она характеризуется более высокой дисперсией значений. При этом оптические размеры галактик при сравне-

нии с контрольной выборкой оказались нормальными для их светимости. Последнее свидетельствует о том, что рассматриваемые здесь галактики с большой массой HI обладают нормальными звездными дисками.

В работе [7] авторы выделили 34 VHR-галактики (выборка HIghMass) с небольшим красным смещением из радиообзора неба в линии HI на радиотелескопе Arecibo (обзор ALFALFA). Выбранные галактики обладают большой массой HI ($M_{\text{HI}} > 10^{10} M_\odot$) и аномально высоким значением μ для данной массы звездного населения. Были исследованы оптические свойства этих галактик и показано, что в большинстве случаев они характеризуются активным звездообразованием в звездном диске.

Еще одна выборка VHR-галактик исследовалась в работе [12]. В ней по данным обзора GASS [6] была выделена популяция сравнительно близких галактик с $0.025 < z < 0.05$, обладающих одновременно высокой массой водорода ($\log M_{\text{HI}}/M_\odot > 10$) и высокой массой звездного населения, $\log M_*/M_\odot > 10.5$, но при этом отличающихся низким удельным темпом звездообразования $s\text{SFE} = \text{SFR}/M_*$. Полученные карты распределения HI согласуются с выводом о том, что низкое значение sSFE для выбранных галактик обусловлено низкой поверхностной плотностью их протяженных газовых дисков, где (из-за низкой плотности газа) нет активного звездообразования, в то время как во внутренних областях дисков звездообразование в них, по-видимому, происходит так же, как и для обычных спиральных галактик.

В ряде работ рассматривались различные варианты, которые потенциально могли бы объяснить аномально высокое содержание газа в дисках массивных галактик, сосредоточенного, как правило, далеко за пределами их оптического радиуса: слияние с галактиками, богатыми газом (малый мерджинг), аккреция газа на диск из газовых филаментов, падение газа из гало в результате его остывания, низкие темпы расходования газа на звездообразование из-за его низкой плотности, связанной с большим удельным угловым моментом газового диска (см. обсуждение вопроса в [8, 10–14]). В работе [10] авторы использовали усредненное по диску значение параметра устойчивости для галактик из обзора NIX и пришли к выводу, что большая масса газа в диске связана с высоким удельным угловым моментом газового слоя, который обеспечивает его гравитационную устойчивость.

Остается открытым вопрос, приобретен ли внешний газовый диск уже после формирования звездной составляющей галактики, или он возник вместе с галактикой из газа с очень высо-

ким угловым моментом и сохранился до настоящего времени благодаря низкой эффективности звездообразования. По-видимому, в разных галактиках возможны разные варианты развития событий.

Заметим, что избыточное количество газа в VHR-галактиках касается только атомарного водорода. Масса молекулярного газа в них, там, где он был обнаружен, оказалась в несколько раз меньше массы HI [15, 16]. Как и в обычных спиральных галактиках, этот газ сосредоточен во внутренней области оптического диска.

В настоящей работе мы анализируем особенности содержания газа в VHR-галактиках как в пределах оптических границ звездных дисков (раздел 2), так и в протяженных внешних газовых дисках этих галактик (раздел 3), а также связь поверхностной плотности газа с условием гравитационной устойчивости диска. Раздел 4 включает обсуждение и обобщающие выводы.

Параметры, зависящие от принятого расстояния, приведены к шкале расстояния, соответствующей параметру $H_0 = 75$ км/с/Мпк.

2. МАССА HI В ПРЕДЕЛАХ ОПТИЧЕСКОГО РАДИУСА

Рассмотрим подробнее, что ограничивает массу газа, содержащуюся в дисках галактик. Упомянутые во Введении зависимости между массой газа и динамическими характеристиками галактик могут быть объяснены, по крайней мере, на качественном уровне, если считать, что азимутально усредненные значения поверхностной плотности газа в диске в звездообразующих галактиках связаны с угловым моментом вращающегося газового слоя и плотностью звездно-газового диска на данном расстоянии R от центра, поскольку от этих параметров зависит условие выполнения гравитационной устойчивости диска на килопарсековых масштабах (см. обсуждение вопроса, например, в работах [3, 10, 17–19]). Анализ локальной гравитационной неустойчивости неоднородно вращающегося тонкого гравитирующего диска, впервые проведенный в работе [20] для протопланетного кеплеровского диска, в применении к бесстолкновительному (звездному) диску [21] и к газовому диску [22], приводит (при некоторых упрощающих предположениях) к примерному соотношению, которое должно выполняться для радиальных возмущений при маргинальной устойчивости диска:

$$\Sigma_{\text{gas}}^c = \frac{c_g \kappa}{Q_{\text{gas}}^c \pi G}, \quad (1)$$

где c_g — одномерная дисперсия турбулентных скоростей газа, $\kappa(R) \approx \sqrt{2V/R}$ — эпициклическая

частота в предположении “плоской” кривой вращения, а Q_{gas}^c — параметр Тоомре для маргинально устойчивого газового диска¹. Его значение равно единице для радиальных возмущений тонкого диска, и, как показывают теоретические и модельные оценки, достигает 1.4–2 (в зависимости от расстояния от центра) при учете нерадиальных возмущений (см., напр., [3, 23] и ссылки в этих работах).

При переходе от плотности атомарного газа к полной плотности газа необходимо принять во внимание, что часть массы относится к элементам тяжелее водорода, что увеличивает оценку массы газа примерно на 35%, а часть газа находится в форме молекулярного водорода, учесть который значительно сложнее. Немногочисленные имеющиеся оценки содержания H_2 в VHR-галактиках приводят к значениям $M_{\text{H}_2}/M_{\text{HI}}$ от нескольких процентов до $\sim 30\%$ [15, 16, 24]. Как и в случае нормальных спиральных галактик поздних типов, где масса молекулярного газа, как правило, сопоставима с массой HI, в VHR-галактиках молекулярный газ также сосредоточен преимущественно во внутренних областях. С учетом молекулярного водорода и тяжелых элементов примем, что внутри оптического диска галактик коэффициент $\eta = M_{\text{HI}}/M_{\text{gas}} \approx 0.5$, т.е. на долю HI приходится половина холодного газа. Для протяженных внешних HI-дисков это значение можно рассматривать как нижний предел (верхний предел, соответствующий отсутствию молекулярного газа, примерно равен 0.7).

Наблюдения показывают, что дисперсия турбулентных скоростей газа в галактических дисках различной массы слабо меняется от галактики к галактике. Она не зависит явным образом от содержания газа в диске, и остается постоянной или медленно уменьшается с расстоянием от центра галактики, составляя во внешних областях звездных дисков $c_g \approx 10$ км/с (см. обсуждение в работах [1, 25, 26]).

Поскольку скорость вращения газа на большей части диска, как правило, слабо меняется с расстоянием от центра, то, как было показано в предыдущих работах, при плотности газа, равной (или пропорциональной) критической плотности, определяемой уравнением (1), масса газа в пределах фиксированного (например, оптического) радиуса должна быть пропорциональна произведению скорости вращения на значение этого радиуса (см. [3] и ссылки в ней на более ранние источники). Этот вывод хорошо согласуется с наблюдениями галактик поздних морфологических типов (для галактик Местного Объема это

¹ Для бесстолкновительного (звездного) диска вместо числа π должно стоять 3.36, но это различие не существенно.

Таблица 1. Выборка VHR-галактик

PGC	Другое обозначение	D , Мпк	$\log M_{\text{HI}}^{\text{full}}, M_{\odot}$	$\log M_{\text{HI}}(R_{25}), M_{\odot}$	$\log M_{\text{HI}}/M_{*}$	R_{HI}/R_{25}
624	ESO111-G014	103.8	10.6	9.86	0.093	2.2
2887	ESO243-G0021	118.5	10.7	9.72	-0.014	3.4
3089	NGC 289	21.7	10.5	9.3	-0.049	7.0
7298	ESO245-G010	76.7	10.5	9.89	-0.075	2.2
11691	ESO417-G018	63.3	10.4	9.92	0.14	2.3
14631	ESO055-G013	98.5	10.3	8.92	0.25	5.0
21343	ESO208-G026	39.8	9.9	8.64	0.09	4.4
35288	ESO378-G003	40.3	10.3	9.06	0.2	4.6
42463	ESO381-G005	75.9	10.4	9.24	0.21	3.3
63796	ESO461-G010	89.5	10.3	9.11	0.4	1.4
66678	ESO075-G006	141.4	10.9	9.72	0.29	4.4
70281	ESO290-G035	78.5	10.5	9.45	-0.11	1.6
33645	UGC 6168	107.6	10.35	9.95	-0.02	2.1
42836	UGC 7899	115.9	10.42	10.18	-0.07	1.8
50455	UGC 9037	79.2	10.33	9.88	0.24	2.6
71078	UGC 12506	96.5	10.53	10.05	0.07	2.5

Примечание. D – принятое расстояние до галактики; $\log M_{\text{HI}}^{\text{full}}$ – полная масса HI в галактике согласно [7, 9]; $\log M_{\text{HI}}(R_{25})$ – масса HI внутри оптического радиуса $D_{25}/2$; $\log M_{\text{HI}}/M_{*}$ – отношение полной массы HI к звездной согласно [7, 9]; R_{HI}/R_{25} – отношение радиуса HI к оптическому радиусу.

было продемонстрировано в [27]). В более общем случае, с учетом того, что плотность газа может быть ниже критического значения, верхний предел массы HI составит

$$M_{\text{HI}}(D_{25}) \leq \int_0^{D_{25}/2} 2\pi\eta R\Sigma_g(R)dR = \sqrt{2}\pi\eta \frac{c_g}{Q_{\text{gas}}^c G} V_{\text{rot}} D_{25}, \quad (2)$$

где коэффициент $\eta = M_{\text{HI}}/M_{\text{gas}}$ учитывает вклад гелия и молекулярного водорода в общую массу газа (см. выше). Приняв $c_g \leq 10$ км/с, а параметр Тоомре $Q_{\text{gas}}^c \geq 1$, для массы HI получаем соотношение:

$$\log M_{\text{HI}}(D_{25}) \leq 6.21 + \log(V_{\text{rot}} D_{25}), \quad (3)$$

где скорость V_{rot} выражена в км/с, диаметр D_{25} – в кпк, M_{HI} – в массах Солнца.

Для сопоставления с данными наблюдений мы выбрали VHR-галактики, для которых в литературе имеются данные по распределению поверхностных плотностей нейтрального водорода и скоростям вращения (по ширине линии HI или по кривой вращения), а также оценки интегральной звездной величины в фильтре K [28]. Основные параметры галактик представлены в табл. 1.

На рис. 1 масса HI в оптических дисках галактик сопоставляется с произведением $V_{\text{rot}} D_{25}$, характеризующим удельный момент вращения, для VHR-галактик (по работам [7, 10, 15, 24]) и “нормальных” галактик выборки THINGS [1]. Массы M_{HI} сравниваемых выборок относятся к области $R_{25} = D_{25}/2$.

Как видно из рис. 1, ожидаемое значение верхнего предела массы HI, полученное из условия гравитационной устойчивости газового слоя в пределах оптического радиуса, действительно ограничивает распределение точек на диаграмме, лишь немногие из которых находятся выше прямой линии, соответствующей уравнению (3). При этом VHR-галактики (красные символы) не выделяются на диаграмме среди нормальных галактик более высокими значениями массы газа. Почти все галактики располагаются ниже линии, что говорит об устойчивости их газовых дисков: параметр Q_{gas} для них лежит в пределах 1–5 в предположении его постоянства вдоль радиуса. Заметим, что это относится лишь к текущему состоянию галактик. Характерное время исчерпания газа составляет несколько миллиардов лет, поэтому в прошлом диски могли содержать в несколько раз больше газа и находиться в области критических значений для массы газа.

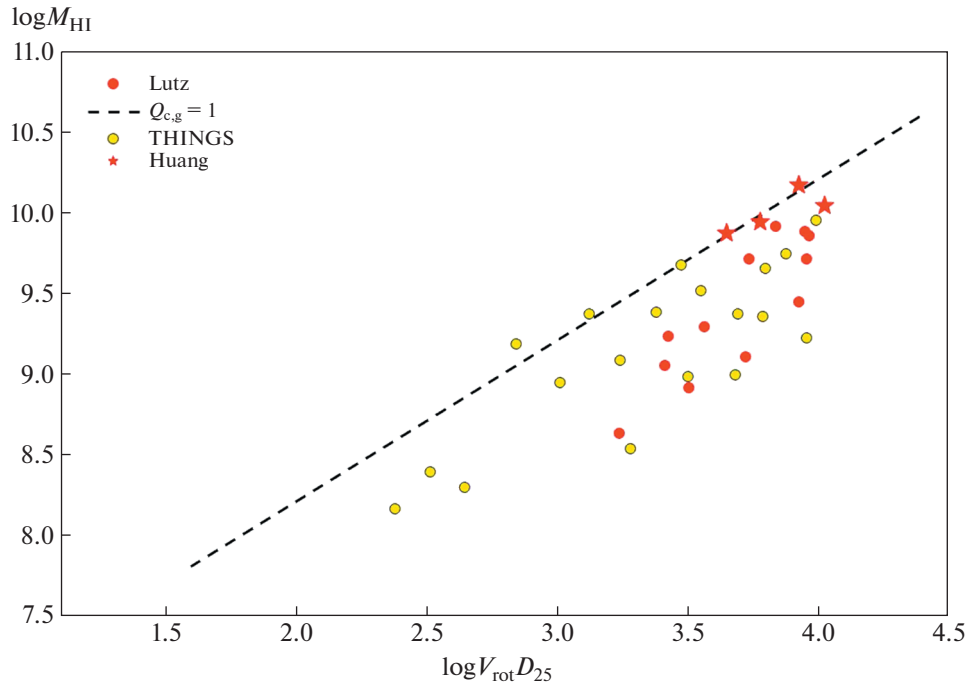


Рис. 1. Связь между массой водорода M_{HI} внутри оптического диаметра D_{25} и произведением $V_{\text{rot}}D_{25}$, которое характеризует удельный момент вращения диска, для VHR-галактик (красные символы) и галактик выборки сравнения THINGS (желтые символы). Красные кружки – галактики из обзоров [9–11], красные звездочки – галактики из выборки Хуанга и др. [7], рассмотренные в работах [15, 24]. Штриховая линия отражает ожидаемое соотношение для маргинально устойчивых дисков согласно (2).

Во всех рассматриваемых здесь галактиках наблюдается активное звездообразование. Поэтому те из них, которые расположены на диаграмме вблизи верхней границы для массы газа, можно рассматривать как кандидаты в галактики, где высокое содержание газа поддерживается (или поддерживалось) аккрецией. Чтобы галактика оставалась вблизи верхней границы HI, скорость приобретения газа должна быть не меньше, чем расход газа на звездообразование (несколько масс Солнца в год). Из числа рассматриваемых VHR-галактик это относится в первую очередь к галактикам выборки HIghMassSample (отмечены красными звездочками на диаграмме), для которых темпы звездообразования оценивались в работе [7].

Соотношение (3) позволяет перейти к зависимости относительной массы HI от массы звездного населения $\mu - M_*$, которая важна для отбора VHR-галактик. Для этого воспользуемся существованием тесной корреляции между удельным угловым моментом и ИК-светимостью (а значит, и массой M_*) звездного населения галактик (см. рис. 2). Линия регрессии $Y(X)$ имеет вид:

$$\log L_K = 1.39 \log(V_{\text{rot}} D_{25}) + 5.60. \quad (4)$$

Комбинируя это выражение с приведенной выше зависимостью (3), получаем:

$$\log(M_{\text{HI}}(D_{25})/L_K) \leq 2.18 - 0.28 \log L_K. \quad (5)$$

На рис. 3 приведена диаграмма $\log \frac{M_{\text{HI}}(D_{25})}{M_*}$

$\log M_*$ внутри D_{25} для “нормальных” галактик выборки THINGS (желтые кружки) и VHR-галактик (красные кружки), где для перехода от L_K к M_* принималось (вслед за [1]) отношение $M_*/L_K = 0.5$ для звездного населения галактик с нормальным содержанием тяжелых элементов (см. также [30]). Для сравнения, черными точками показано положение изолированных галактик поздних типов (выборка AMIGA). Как следует из диаграммы, предположение о том, что поверхностная плотность газа пропорциональна критической плотности по Тоомре, согласуется с уменьшением массы газа в галактиках вдоль последовательности их звездных масс, а верхний предел массы газа в галактиках рассматриваемых типов согласуется с ожидаемым для маргинально устойчивого газового слоя.

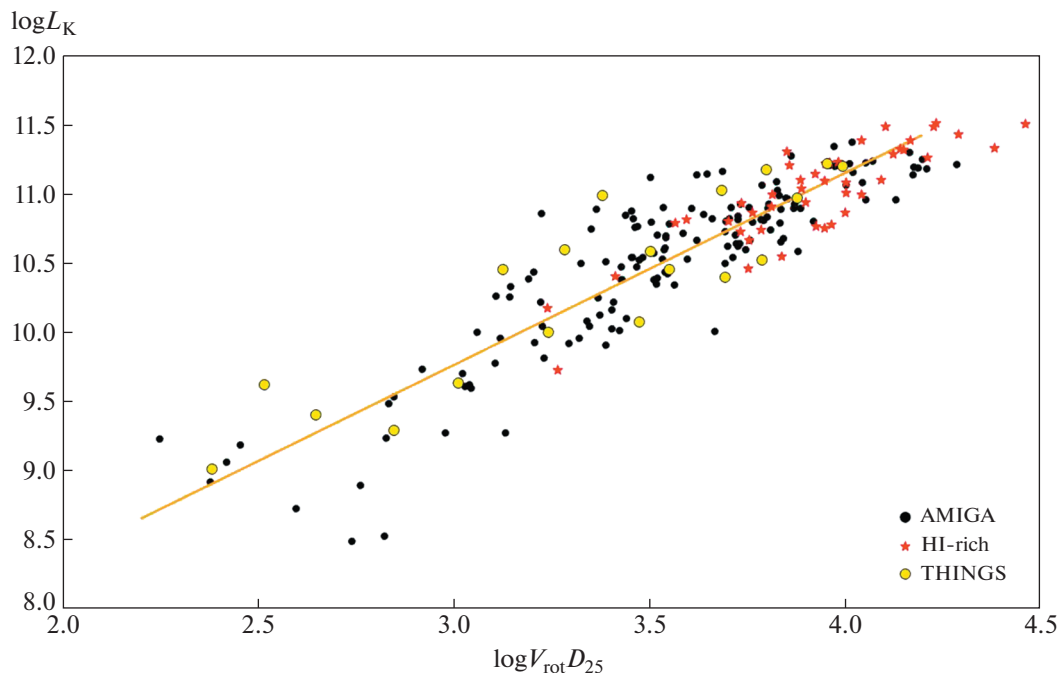


Рис. 2. Связь между светимостью L_K в фильтре K и удельным моментом вращения $V_{\text{rot}} D_{25}$. Черные точки — изолированные галактики из выборки AMIGA [29], красные точки — выборка VHR-галактик из данной работы, желтые круги — выборка сравнения THINGS [1]. Желтая прямая является регрессионной для изолированных галактик.

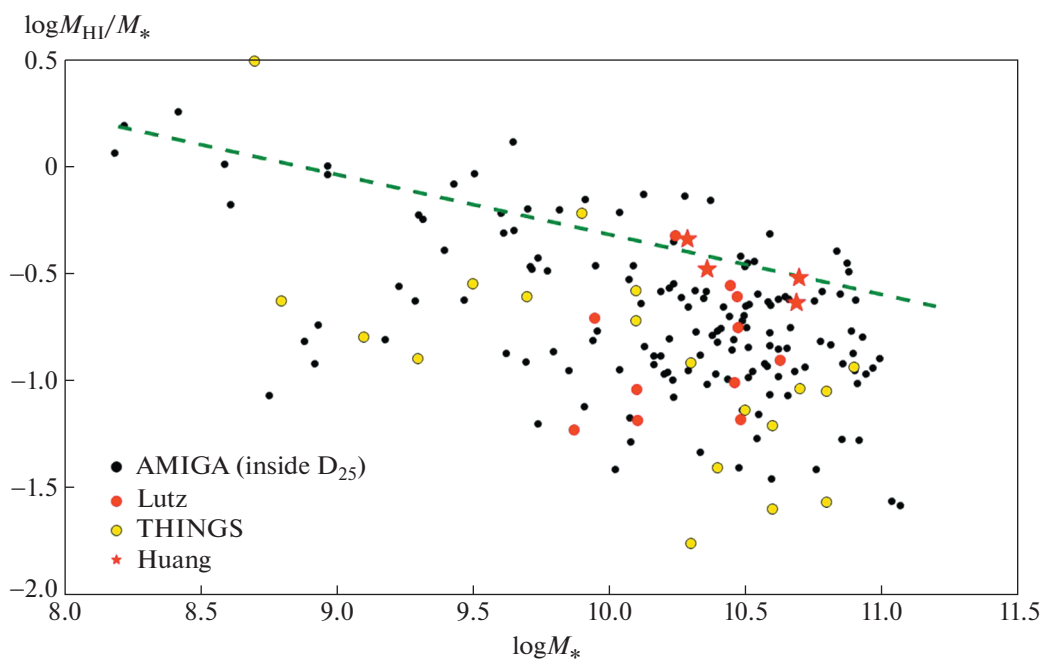


Рис. 3. Связь между отношением заключенной внутри оптического радиуса массы HI к звездной массе и массой звезд. Черные точки — изолированные галактики из выборки AMIGA [29], красные кружки — выборка VHR-галактик из данной работы, желтые кружки — выборка сравнения THINGS [1]. Зеленая штриховая линия соответствует соотношению между параметрами для маргинально устойчивого диска.

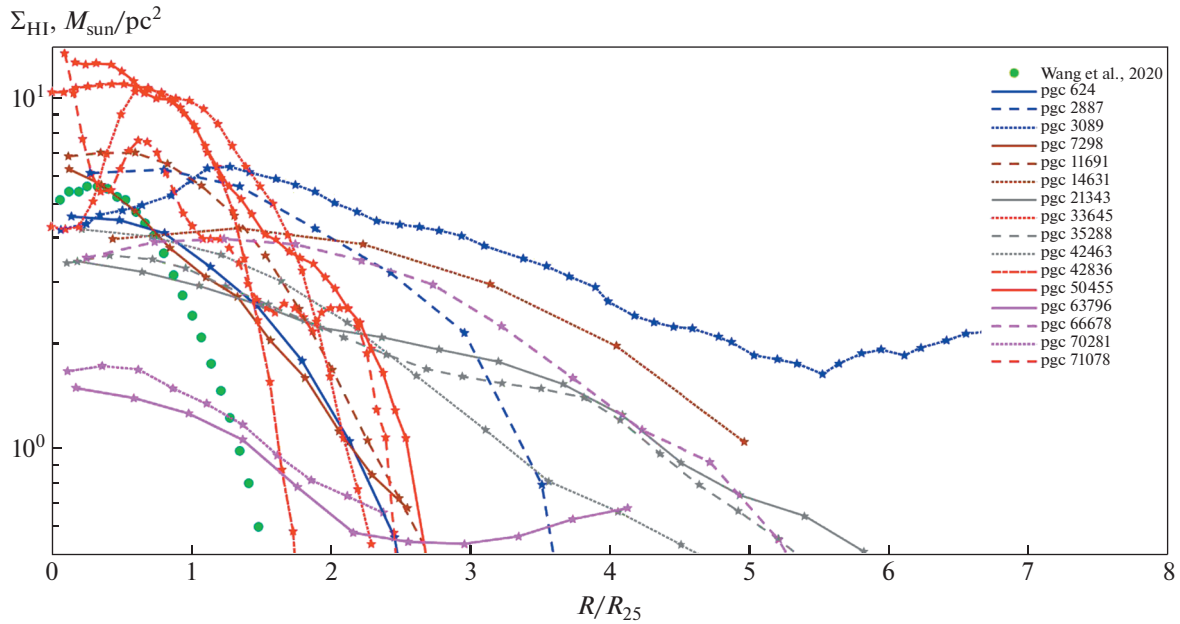


Рис. 4. Профили поверхностной плотности HI для рассматриваемых VHR-галактик в сравнении с усредненным профилем для близких галактик поздних морфологических типов из работы [5] (зеленые кружки) для принятого значения $R_{HI}/R_{25} = 1.35$. Расстояние от центра выражено в единицах оптического радиуса R_{25} .

3. ВНЕШНИЕ ГАЗОВЫЕ ДИСКИ VHR-ГАЛАКТИК

Рассмотрим внешние газовые диски VHR-галактик подробнее. Плотность газа $\Sigma_{HI}(R)$ в них медленно спадает с расстоянием от центра, так что HI часто прослеживается до расстояний, многократно превышающих оптический радиус R_{25} (см. табл. 1). При этом, если радиальное распределение плотности газа в пределах R_{25} в большинстве галактик имеет сходный характер, то содержание газа за пределами этого радиуса отличается очень большим разнообразием. При отсутствии аккреции или внешнего воздействия на газовый компонент галактики плотность газа может сохраняться примерно на том же уровне миллиарды лет как следствие низкой эффективности звездообразования в очень разреженной среде на большом расстоянии от центра галактики. Поэтому внешние газовые диски могут быть как сравнительно молодыми, так и образовавшимися вместе с галактикой.

У части VHR-галактик наблюдается слабое оптическое продолжение диска низкой яркости далеко за пределы R_{25} в видимой и UV-областях спектра, хотя HI прослеживается еще дальше от центра. Этот внешний оптический диск может быть бесструктурен, но в некоторых случаях в нем наблюдаются протяженные слабоконтрастные спирали до расстояния $(1.5-3)R_{25}$ от центра (при-

меры: PGC 66678, PGC 42463, PGC 35288, PGC 7298, PGC 2887).

На рис. 4 приведены радиальные профили поверхностной плотности $\Sigma_{HI}(R)$ для галактик обзора NIX [10] и для четырех галактик из выборки HighMassSample по работам [15, 24] (PGC 50455, PGC 42836, PGC 33645 и PGC 71078). Радиальная координата нормирована на оптический радиус R_{25} . Для сравнения с “нормальными” галактиками, темными кружками показан радиальный профиль плотности HI, усредненный по большому числу близких галактик поздних типов в работе [5] и пересчитанный к координате R/R_{25} с использованием среднего значения $R_{HI}/R_{25} = 1.35$ для выборки близких спиральных галактик, диски которых наблюдаются почти “плашмя” [31].

Как видно из рис. 4, плотность Σ_{HI} падает с удалением от центра VHR-галактик медленнее, чем для обычных спиралей. Тем не менее в пределах оптического диска ($R/R_{25} = 1$) в большинстве случаев она лежит в интервале $(4-10) M_{\odot}/\text{пк}^2$, что типично для спиральных галактик. Две галактики — PGC 70281 и PGC 63796 — выделяются наиболее низкими плотностями газа в области $R/R_{25} \leq 1$. Но эти галактики ориентированы к нам “с ребра”, поэтому их масса газа, по-видимому, недооценена из-за низкой прозрачности внешних газовых дисков в линии HI вдоль луча зрения при наличии диска большой протяженности. В базе данных HyperLeda [32] поправка за самопо-

глощение для галактик, видимых “с ребра”, принималась равной (в зв. величинах) $\delta M_{\text{HI}} = -0.82$ [33], что соответствует примерно двукратному ослаблению потока (в работе [3] для ослабления HI получено немного более низкое значение). Однако, при наличии протяженных водородных дисков, содержащих основную массу газа, самопоглощение в линии HI при ориентации диска “с ребра” должно быть значительно выше, чем у обычных спиралей.

Заметим, что среди рассматриваемых галактик есть еще одна, ориентированная практически “с ребра” – PGC 71078 (=UGC 12056), но она, тем не менее, демонстрирует сравнительно высокую плотность газа. Однако это единственная из рассматриваемых галактик, где плотность HI быстро падает еще в пределах оптического диска, так что в ее внешнем газовом диске содержится сравнительно небольшая масса HI.

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Как отмечалось ранее в [10] (на примере галактик выборки NIX), галактики с аномально высоким содержанием HI не выделяются заметным образом по морфологии, по темпам звездообразования или по поверхностной яркости (плотности) звездного диска от “нормальных” галактик со сходной массой диска. Аналогичный вывод был сделан и для VHR-галактик выборки Bluedisk [8]: средняя поверхностная яркость галактик в пределах оптического диаметра, как и темп звездообразования в расчете на единицу площади звездного диска, имеют сходные интервалы значений в VHR-галактиках и в галактиках контрольной выборки. Эффективность звездообразования (темп звездообразования на единицу массы газа HI + H₂) в пределах оптических дисков в обычных спиральных галактиках и в VHR-галактиках также ведет себя сходным образом, уменьшаясь к периферии оптических дисков (HighMass sample [7]). Металличность газа в VHR-галактиках, там, где ее удалось непосредственно измерить, также оказалась обычной для спиральных галактик, если сравнивать области дисков с аналогичными значениями колонковых плотностей звездного населения и HI [11]. Это делает интенсивную аккрецию газа в пределах оптического диска маловероятной, хотя могут быть исключения для некоторых галактик, где масса HI аномально высока в пределах оптического радиуса (см. комментарии к рис. 1 в тексте).

Настоящая работа также показывает, что в пределах оптического радиуса VHR-галактики, за отдельными исключениями, это системы, не выделяющиеся ни по оптическим характеристикам, ни по относительному содержанию газа от обычных спиральных галактик. Основная особенность

большинства VHR-галактик – наличие протяженных массивных газовых дисков².

Высокое содержание газа в VHR-галактиках делает их внешние области похожими на диски гигантских спиральных галактик низкой яркости (GLSB-галактик), которые также обладают поверхностной плотностью HI порядка нескольких десятых долей $M_{\odot}/\text{пк}^2$ и слабым звездообразованием. Локальные значения дисперсии скоростей HI в протяженных газовых дисках этих галактик также близки к 10 км/с, хотя они сопоставимы со спектральным разрешением радионаблюдений, что не позволяет получить более точную оценку [35]. Между протяженными газовыми дисками галактик низкой и высокой яркости, по-видимому, нет принципиальных различий. Заметим, что в некоторых GLSB-галактиках также может присутствовать внутренний звездный диск небольших размеров с нормальной для обычных галактик поверхностной яркостью. Примером является GLSB-галактика UGC 1378, спектральные и фотометрические исследования которой приведены в работе [36]. По всем параметрам ее вполне можно отнести к VHR-галактикам. Несколько GLSB-галактик с протяженным оптическим (и газовым) диском содержатся в выборке HighMass, исследовавшейся в [15, 24]. Ярким примером является галактика AGC 19204, которую по очень высокому содержанию газа и наличию протяженного внешнего диска можно отнести к объектам типа Malin-1 [13].

Хотя в различных VHR-галактиках причина появления внешних массивных газовых дисков может быть разной, большой угловой момент газа, по-видимому, играет в этом ключевую роль [10]. В окрестности VHR-галактик часто наблюдаются отдельные области HI, которые могут быть связаны с небольшими спутниками, богатыми газом, или с диффузными облаками нейтрального газа [37], но их масса не сопоставима с гигантской массой газа в протяженных дисках. Аккреция газа из окружающей среды (из филаментов), имевшая место в прошлом, более вероятна. Она хорошо согласуется как с большим удельным угловым моментом газа, так и с тем, что, согласно [38], галактики с наиболее высокой массой HI располагаются преимущественно в филаментах.

Неясно, появились ли протяженные газовые диски на раннем этапе формирования галактических дисков, или же они сформировались в основном в эпоху, близкую к современной. Воз-

² Протяженные внешние диски наблюдаются не только у галактик с аномально высокой интегральной массой HI, но встречаются и у некоторых “нормальных” галактик высокой светимости с умеренным содержанием газа (см., напр., обзор [34]). Поэтому вопрос о формировании внешних дисков имеет более общий характер.

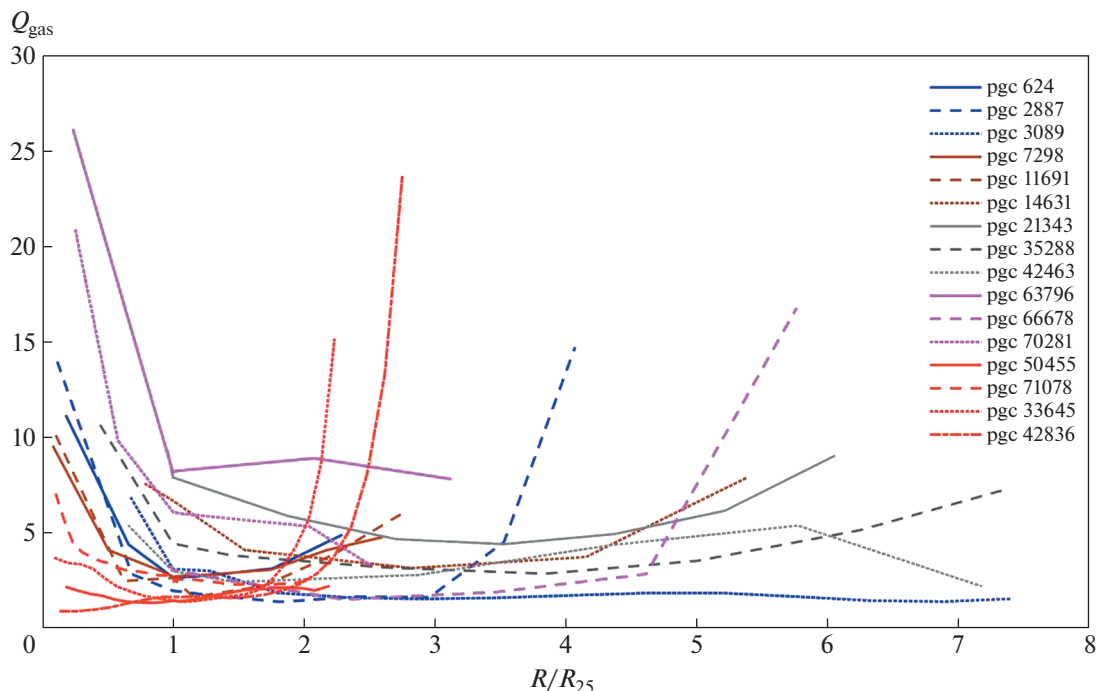


Рис. 5. Изменение параметра Тоомре Q_{gas} для рассматриваемых VHR-галактик.

можно различные варианты, однако, согласно [8], диски VHR-галактик не отличаются явно выраженной асимметрией по сравнению с дисками “нормальных” галактик контрольной выборки, а их центры совпадают с оптическими центрами галактик даже точнее, чем в контрольных галактиках (выборка *Bluedisk*). Это свидетельствует против недавнего формирования газовых дисков в результате аккреции или мерджинга. Об этом же говорит обычно наблюдаемый регулярный характер вращения внешних газовых дисков.

Как отмечалось во Введении, в спиральных галактиках поздних типов падение плотности HI вдоль радиуса имеет, как правило, сходный характер, что объясняет тесную корреляцию между интегральной массой HI и радиусом R_{HI} , который привязан к определенному граничному значению поверхностной плотности HI. VHR-галактики также лежат (хотя и со значительным разбросом) вдоль общей зависимости $M_{\text{HI}} - R_{\text{HI}}$, построенной для “нормальных” галактик [8, 10], что говорит о неслучайном распределении плотности газа даже за пределами оптического радиуса, которое естественно было бы ожидать при недавней или продолжающейся аккреции. К этому же выводу приводит оценка параметра устойчивости газовых дисков галактик.

Для всех рассматриваемых здесь VHR-галактик известны кривые вращения, что позволяет оценить степень устойчивости газового диска к гравитационным возмущениям. На рис. 5 приве-

дено распределение параметра устойчивости Q_{gas} для газового компонента рассматриваемых VHR-галактик. Роль звездного диска здесь игнорируется (его плотность падает с расстоянием быстрее, чем плотность газа), газовый диск считается тонким, а дисперсия скоростей газа c_g принимается равной 10 км/с (как во внешних областях оптических дисков). Для трех галактик ($\text{PGC } 33645 = \text{UGC } 6168$, $\text{PGC } 42836 = \text{UGC } 7899$, $\text{PGC } 47932 = \text{NGC } 5230$) зависимости $Q_{\text{gas}}(R)$ были взяты из работы [15], где они были получены с учетом молекулярного газа во внутренней области дисков. В пределах оптического радиуса значение Q_{gas} для газа в большинстве случаев выше критического значения $Q_{\text{gas}}^c \approx 1.4-2$ для пороговой устойчивости. Звездный компонент диска, если таковой существует, может только приблизить внешний диск галактики к маргинально устойчивому состоянию.

Среди галактик, для которых на рис. 5 приведены радиальные профили Q_{gas} , только в двух ($\text{PGC } 21343$ и $\text{PGC } 63796$) параметр устойчивости на всех R сохраняется высоким ($Q_{\text{gas}} > 4$), что говорит о большом запасе гравитационной устойчивости. Но при этом, как отмечалось выше, галактика $\text{PGC } 63796$, обладающая наиболее высокими оценками параметра Тоомре, наблюдается “с ребра”, и масса HI в ее внешнем диске, по-видимому, недооценена. Для остальных галактик

минимальное значение Q_{gas} не превышает 2.5–3. Таким образом, несмотря на низкую плотность газа в протяженных дисках HI, в большинстве VHR-галактик существует достаточно протяженная область радиальных расстояний, где параметр устойчивости Q_{gas} примерно постоянен, причем, хотя во всех случаях он свидетельствует о гравитационной устойчивости газовых дисков, для большей части галактик он оказывается близким к пороговому значению для устойчивости.

Заметим, что принятое здесь значение $c_g \sim 10$ км/с на далекой периферии дисков может оказаться завышенным. Как показали измерения радиального профиля $c_g(R)$, полученные примерно для двух десятков VHR-галактик выборки Bluedisk [8] по наблюдениям на радиоинтерферометре WSRT [14], в некоторых галактиках на расстоянии 20–40 кпк от центра c_g уменьшается до 5–7 км/с. При таких значениях c_g внешние диски рассматриваемых здесь VHR-галактик оказываются еще ближе к пороговой устойчивости.

Примерное постоянство Q_{gas} , сохраняющееся на большом радиальном протяжении, говорит о том, что плотность газа тесно связана с локальной угловой скоростью (эпициклической частотой) дисков, от которой зависит параметр Q_{gas} . Аналогичный вывод был получен и для газовых дисков нормальных галактик обзора THINGS (см. [39]). Недавняя или текущая аккреция газа на диск, имеющая случайный характер, не объясняет взаимосвязи плотности газа и динамических параметров диска, и поэтому маловероятна как универсальный механизм, определяющий распределение плотности газа.

При поверхностной плотности газа, не превышающей нескольких $M_{\odot}/\text{пк}^2$, длина волны наиболее быстро растущих гравитационных возмущений $\lambda_T = 2c_g^2/G\Sigma_g$ измеряется килопарсеками, поэтому к локальным очагам звездообразования, наблюдаемым в протяженных дисках некоторых VHR-галактик, такая крупномасштабная неустойчивость не имеет прямого отношения. Однако плотность газа, близкая к пороговому значению, может обеспечить поддержание спиральных волн плотности, и поэтому влиять на звездообразование в более мелких пространственных масштабах. Примечательно, что именно в тех галактиках, где параметр $Q_{\text{gas}}(R)$ опускается ниже 2.5 или 2, т.е. газовые диски близки к состоянию маргинальной устойчивости, во внешних дисках наблюдается заметная спиральная структура низкой яркости с областями звездообразования в ветвях. Наиболее протяженные спирали — у PGC 3089 и PGC 676678, ветви которых прослежива-

ются до расстояния более $3R_{25}$ (что все же меньше, чем R_{HI}).

Эффективность звездообразования уменьшается с падением плотности газа как в обычных, так и VHR-галактиках, и с удалением от центра становится очень низкой, так что обратная ей величина — время исчерпания газа — на больших расстояниях от центра должна превышать космологический возраст галактик (10^{10} лет, [8, 15]). Поэтому современные темпы звездообразования слишком низки, чтобы оказывать существенное влияние на распределение газа во внешних газовых дисках рассматриваемых галактик на масштабах в несколько миллиардов лет. Тогда возникает вопрос, почему внешние газовые диски оказались на большом интервале расстояния от центра близкими к маргинальной устойчивости.

Естественно предположить, что связь наблюдаемой поверхностной плотности газа в диске с условием пороговой устойчивости установилась в прошлом, миллиарды лет назад, после завершения бурной стадии формирования звездного диска, при которой гравитационная неустойчивость газового слоя играла роль регулятора темпов звездообразования (эта стадия наблюдается у галактик с активными звездообразованием, имеющих большое красное смещение $z > 1$). После того, как приток газа в галактику стал низким, а плотность оставшегося газа в результате звездообразования уменьшилась до уровня, исключающего крупномасштабную гравитационную неустойчивость, темп звездообразования и дисперсия скоростей газа уменьшились (см., напр., численную модель формирования диска Галактики, предложенную в [40]). В приложении к обычным спиральным галактикам этот сценарий был предложен в работе [3], но он может относиться и к протяженным дискам VHR-галактик. Основное различие между этими двумя случаями заключается в том, что в протяженных дисках VHR-галактик при переходе к гравитационно устойчивому состоянию звездообразование почти полностью прекратилось из-за очень низкой плотности газа в маргинально устойчивом диске, в то время как в более близких к центру областях обычных спиральных галактик эффективность звездообразования осталась на более высоком уровне, и диски приобрели со временем более высокий запас устойчивости. Радиальное распределение плотности газа во внешних областях галактик надолго оказалось связанным с профилем $Q_{\text{gas}}(R)$, близким к критическому, который установился при переходе от активной к пассивной стадии эволюции.

В таком сценарии часть газа в протяженных дисках VHR-галактик сначала должна была перейти в звезды, чтобы поверхностная плотность

газовой составляющей диска упала до состояния маргинальной устойчивости. Поэтому можно ожидать, что внешние диски VHR-галактик содержат, помимо газа, “старую” звездную составляющую низкой яркости, возникшую при бурном звездообразовании на начальной активной стадии эволюции дисков. Характерная поверхностная плотность звездного населения, успевшего сформироваться на активной стадии образования дисков, должна быть как минимум сопоставима по величине с наблюдаемой поверхностной плотностью газа на периферии галактик ($\sim 1 M_{\odot}/\text{пк}^2$ и ниже), в противном случае звездообразование слабо отразилось бы на результирующей плотности газового диска. Приняв отношение $M/L_B \approx 3$ (в солнечных единицах) для старого обедненного металлами звездного населения (модель [41]), получим, что это соответствует поверхностной яркости около $28^m/\text{кв.с.}$, которую можно измерить только при очень глубокой фотометрии.

Таким образом, можно ожидать, что звезды, возникшие на ранней стадии формирования внешних дисков, образуют протяженный компонент очень низкой яркости из старых звезд. Его цвет должен соответствовать старому и низкометаллическому звездному населению.

Заметим, что представление о том, что часть массы во внешних областях галактических дисков может оставаться необнаруженной, и принадлежать звездам низкой светимости, ранее был упомянут в работе [42].

Тем не менее во внешних дисках некоторых VHR-галактик слабое звездообразование все же наблюдается, поддерживаясь слабоконтрастными спиральными ветвями. При отсутствии аккреции или поглощения спутников оно должно приводить к очень медленному уменьшению плотности газа.

Аналогичная ситуация имеет место и для гигантских галактик низкой поверхностной яркости (GLSB-галактик) с высоким содержанием газа. В них основное количество газа также распределено в протяженном диске, а на больших расстояниях от центра часто наблюдается спиральная структура. Как показывают наблюдения, поверхностная плотность газа в протяженных дисках, по крайней мере, части GLSB-галактик также близка к критическому значению параметра устойчивости. Так, в работе [35] этот вывод был сделан в отношении двух из четырех исследованных GLSB-галактик. По оценкам, полученным в работе [43] для нескольких GLSB-галактик, минимальные значения параметра Тоомре для них составляют 2–3 единицы, что говорит об устойчивости дисков, но не сильной их “перегретости”. К подобным же выводам пришли авторы работы [44] в отношении диска GLSB-галактики

Malin-2. Для 4 из 7 GLSB-галактик, рассмотренных в этой работе, наблюдательные данные хорошо согласуются с двухстадийным сценарием формирования галактики, когда изначально образуется галактика нормальной поверхностной яркости, вокруг которой затем формируется LSB-диск в результате аккреции газа из внешнего источника.

Резюмируя, подчеркнем возможность различных причин, по которым дисковая галактика приобретает или сохраняет аномально высокое содержание HI в диске. Для некоторых галактик, где газ сконцентрирован в основном во внутренних областях дисков, нельзя исключить роль текущей аккреции газа на диск (см. раздел 2). Так, для трех галактик выборки HighMass (UGC 7899, UGC 9037 и UGC 9334), распределение скоростей H_{α} показало наличие некруговых движений газа, косвенно подтверждающих возможность холодной моды аккреции газа во внутренние области галактик [45]. По крайней мере в одном случае (галактика AGC 10111 с избыточным содержанием HI) газовый диск демонстрирует обратное вращение по отношению к звездному балджу, что определенно указывает на падение газа на галактику [13]. Однако для VHR-галактик с массивными протяженными внешними дисками HI, вращающимися в ту же сторону, что и звездный диск, две обычно предлагаемые причины высокого содержания HI (либо аккреция газа с тем же направлением вектора углового момента, либо подавленное звездообразование, способствующее накоплению и сохранению газа) могут действовать сообща: сначала аккреция, сформировавшая миллиарды лет назад газовый диск с большим угловым моментом, который был более плотным, чем в современную эпоху, затем падение плотности газа, и последующая пассивная эволюция с очень низкой эффективностью звездообразования. Примерное постоянство значения параметра устойчивости Q_{gas} на большом интервале радиальных расстояний в рассмотренных выше VHR-галактиках говорит о том, что их диски продолжают “помнить” то распределение плотности газа, при котором произошел этот переход из бурной стадии эволюции в пассивную. Сходный сценарий может иметь и формирование дисков GLSB-галактик.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-02-00080А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. K. Leroy, F. Walter, E. Brinks, F. Bigiel, W. J. G. de Blok, B. Madore, and M. D. Thornley, *Astron. J.* **136**, 2782 (2008), arXiv:0810.2556 [astro-ph].

2. *A. Burkert*, Mem. Soc. Astron. Ital. **88**, 533 (2017), arXiv:1709.02112 [astro-ph.GA].
3. *A. V. Zasov and N. A. Zaitseva*, Astron. Letters **43**, 439 (2017), arXiv:1705.07659 [astro-ph.GA].
4. *F. Bigiel and L. Blitz*, Astrophys. J. **756**, id. 183 (2012), arXiv:1208.1505 [astro-ph.CO].
5. *J. Wang, B. Catinella, A. Saintonge, Z. Pan, P. Serra, and L. Shao*, Astrophys. J. **890**, id. 63 (2020), arXiv:2001.01970 [astro-ph.GA].
6. *Catinella, D. Schiminovich, G. Kauffmann, S. Fabello, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **403**, 683 (2010), arXiv:0912.1610 [astro-ph.CO].
7. *S. Huang, M. P. Haynes, R. Giovanelli, G. Hallenbeck, et al.*, Astrophys. J. **793**, id. 40 (2014), arXiv:1407.7538 [astro-ph.GA].
8. *J. Wang, G. Kauffmann, G. I. G. Józsa, P. Serra, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **433**, 270 (2013), arXiv:1303.3538 [astro-ph.CO].
9. *K. A. Lutz, V. A. Kilborn, B. Catinella, B. S. Koribalski, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **467**, 1083 (2017), arXiv:1701.02447 [astro-ph.GA].
10. *K. A. Lutz, V. A. Kilborn, B. S. Koribalski, B. Catinella, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **476**, 3744 (2018), arXiv:1802.04043 [astro-ph.GA].
11. *K. A. Lutz, V. Kilborn, B. Catinella, L. Cortese, T. H. Brown, and B. Koribalski*, Astron. and Astrophys. **635**, id. A69 (2020), arXiv:2001.07516 [astro-ph.GA].
12. *J. J. Lemonias, D. Schiminovich, B. Catinella, T. M. Heckman, and S. M. Moran*, Astrophys. J. **790**, id. 27 (2014), arXiv:1407.0706 [astro-ph.GA].
13. *K. Geréb, S. Janowiecki, B. Catinella, L. Cortese, and V. Kilborn*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **476**, 896 (2018), arXiv:1801.06880 [astro-ph.GA].
14. *T. H. Randriamampandry, J. Wang, and K. M. Mogotsi*, arXiv:2105.10683 [astro-ph.GA] (2021).
15. *G. Hallenbeck, S. Huang, K. Spekkens, M. P. Haynes, et al.*, Astron. J. **152**, 225 (2016), arXiv:1610.03859 [astro-ph.GA].
16. *C. Lee, A. Chung, M. S. Yun, R. Cybulski, G. Narayanan, and N. Erickson*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **441**, 1363 (2014), arXiv:1404.4371 [astro-ph.GA].
17. *D. V. Stark, K. A. Bundy, M. E. Orr, P. F. Hopkins, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **474**, 2323 (2018), arXiv:1711.00178 [astro-ph.GA].
18. *A. B. Romeo*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **491**, 4843 (2020), arXiv:1905.05752 [astro-ph.GA].
19. *D. Obreschkow, K. Glazebrook, V. Kilborn, and K. Lutz*, Astrophys. J. Letters **824**, id. L26 (2016), arXiv:1605.04927 [astro-ph.GA].
20. *V. S. Safronov*, Ann. d'Astrophysique **23**, 979 (1960).
21. *A. Toomre*, Astrophys. J. **139**, 1217 (1964).
22. *P. Goldreich and D. Lynden-Bell*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **130**, 97 (1965).
23. *A. A. Marchuk and N. Y. Sotnikova*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **475**, 4891 (2018), arXiv:1804.07962 [astro-ph.GA].
24. *G. Hallenbeck, S. Huang, K. Spekkens, M. P. Haynes, et al.*, Astron. J. **148**, id. 69 (2014), arXiv:1407.1744 [astro-ph.GA].
25. *R. Ianjamasimanana, W. J. G. de Blok, F. Walter, G. H. Heald, A. Caldú-Primo, and T. H. Jarrett*, Astron. J. **150**, id. 47 (2015), arXiv:1506.04156 [astro-ph.GA].
26. *D. Tamburro, H. W. Rix, A. K. Leroy, M. M. Mac Low, F. Walter, R. C. Kennicutt, E. Brinks, and W. J. G. de Blok*, Astron. J. **137**, 4424 (2009), arXiv:0903.0183 [astro-ph.GA].
27. *I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, W. K. Huchtmeier, and D. I. Makarov*, Astron. J. **127**, 2031 (2004).
28. *J. P. Huchra, L. M. Macri, K. L. Masters, T. H. Jarrett, et al.*, Astrophys. J. Suppl. **199**, id. 26 (2012), arXiv:1108.0669 [astro-ph.CO].
29. *U. Lisenfeld, L. Verdes-Montenegro, J. Sulentic, S. Leon, et al.*, Astron. and Astrophys. **462**, 507 (2007), arXiv:astro-ph/0610784.
30. *J. Schombert, S. McGaugh, and F. Lelli*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **483**, 1496 (2019), arXiv:1811.10579 [astro-ph.GA].
31. *T. P. K. Martinsson, M. A. W. Verheijen, M. A. Bershad, K. B. Westfall, D. R. Andersen, and R. A. Swaters*, Astron. and Astrophys. **585**, id. A99 (2016), arXiv:1510.07666 [astro-ph.GA].
32. *D. Makarov, P. Prugniel, N. Terekhova, H. Courtois, and I. Vauglin*, Astron. and Astrophys. **570**, id. A13 (2014).
33. *J. Heidmann, N. Heidmann, and G. de Vaucouleurs*, Mem. Roy. Astron. Soc. **75**, 85 (1972).
34. *B. G. Elmegreen and D. A. Hunter*, Astrophys. Space Sci. Library **434**, 115 (2017).
35. *T. E. Pickering, C. D. Impey, J. H. van Gorkom, and G. D. Bothun*, Astron. J. **114**, 1858 (1997).
36. *A. S. Saburova, I. V. Chilingarian, A. V. Kasparova, I. Y. Katkov, D. G. Fabricant, and R. I. Uklein*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **489**, 4669 (2019), arXiv:1908.11383 [astro-ph.GA].
37. *J. Wang, P. Serra, G. I. G. Józsa, B. Koribalski, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **453**, 2399 (2015), arXiv:1507.08950 [astro-ph.GA].
38. *M. Courtois, D. Zaritsky, J. G. Sorce, and D. Pomarue*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **448**, 1767 (2015), arXiv:1502.00292 [astro-ph.GA].
39. *G. R. Meurer, Z. Zheng, and W. J. G. de Blok*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **429**, 2537 (2013), arXiv:1212.1460 [astro-ph.GA].
40. *F. van Dokelaar, O. Agertz, and F. Renaud*, arXiv:2110.13165 [astro-ph.GA] (2021).
41. *T. Into and L. Portinari*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **430**, 2715 (2013), arXiv:1301.2178 [astro-ph.CO].
42. *M. Das, S. S. McGaugh, R. Ianjamasimanana, J. Schombert, and K. S. Dwarakanath*, Astrophys. J. **889**, id. 10 (2020), arXiv:1912.05352 [astro-ph.GA].
43. *P. Garg and A. Banerjee*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **472**, 166 (2017), arXiv:1707.08085 [astro-ph.GA].
44. *A. S. Saburova, I. V. Chilingarian, A. V. Kasparova, O. K. Sil'chenko, K. A. Grishin, I. Y. Katkov, and R. I. Uklein*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **503**, 830 (2021), arXiv:2011.01238 [astro-ph.GA].
45. *D. Bisaria, K. Spekkens, S. Huang, G. Hallenbeck, and M. P. Haynes*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **509**, 100 (2022), arXiv:2111.01806 [astro-ph.GA].