

УДК 524.72-54

# СРЕДНИЕ ПАРАМЕТРЫ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ В МЕСТНОМ ОБЪЕМЕ ВСЕЛЕННОЙ

© 2024 И. Д. Караченцев<sup>1\*</sup>, А. А. Попова<sup>2</sup><sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, 195251 Россия

Поступила в редакцию 17 ноября 2023 года; после доработки 16 января 2024 года; принята к публикации 29 января 2024 года

По данным о наблюдаемых потоках 1400 близких галактик в далеком ультрафиолете (FUV) и в линии  $H\alpha$  определен глобальный темп звездообразования в единичном объеме Вселенной,  $j_{\text{SFR}} = (1.34 \pm 0.16) \times 10^{-2} M_{\odot} \text{год}^{-1} \text{Мпк}^{-3}$ . При современном темпе звездообразования  $SFR$  за космологическое время 13.8 млрд лет воспроизводится  $(65 \pm 4)\%$  наблюдаемой звездной массы. Запасы нейтрального газа в Местном объеме радиусом 11 Мпк позволяют поддерживать современный темп  $SFR$  на шкале еще около 5 млрд лет.

Ключевые слова: галактики — темп звездообразования; галактики — эволюция

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Интегральный темп звездообразования в галактике,  $SFR$ , выражаемый в единицах массы Солнца в год ( $M_{\odot} \text{год}^{-1}$ ), является одной из самых важных характеристик преобразования газа галактики в звезды. Удельный темп звездообразования,  $sSFR = SFR/M_*$ , отнесенный к единице звездной массы, различается у активных и пассивных галактик в  $10^4$ – $10^6$  раз. Средняя плотность темпа звездообразования в кубическом мегапарсеке,  $j_{\text{SFR}}$ , определяет интенсивность космической эволюции Вселенной. Согласно многочисленным наблюдательным данным (Madau et al., 1998; Madau and Dickinson, 2014), величина  $j_{\text{SFR}}$  в сопутствующем объеме Вселенной возрастает с уменьшением красного смещения  $z$  от  $z \simeq 6$  до  $z \simeq 2$  и затем падает на порядок величины к современной эпохе,  $z = 0$ . Для моделирования процесса звездообразования и описания зависимости  $j_{\text{SFR}}(z)$  необходимо фиксировать как можно точнее значение нуль-пункта  $j_{\text{SFR}}(0)$ . Эта задача представляет собой основную цель нашей работы.

Для определения величины  $SFR$  галактики обычно используют ее интегральный поток в бальмеровской линии  $H\alpha$ . Согласно Kennicutt (1998) и Lee et al. (2009b),

$$\lg SFR = 8.98 + 2 \lg D + \lg F_c(H\alpha),$$

\*E-mail: idkarach@gmail.com

где расстояние до галактики  $D$  выражено в Мпк, а поток в линии  $H\alpha$  — в  $\text{эрг см}^{-2} \text{с}^{-1}$  исправлен с учетом поглощения света в Млечном Пути и в самой галактике. Детали учета внешнего и внутреннего поглощения описаны в работе Lee et al. (2009b). Другой способ оценки  $SFR$  основан на измерении потока галактики в далеком ультрафиолете (FUV,  $\lambda_{\text{eff}} = 1539 \text{ \AA}$ ,  $FWHM = 269 \text{ \AA}$ ), с использованием соотношения

$$\lg SFR = 2.78 + 2 \lg D - 0.4 m_{\text{FUV}}^c,$$

где  $D$  — расстояние в Мпк, а  $m_{\text{FUV}}^c$  — видимая величина галактики в FUV-полосе, исправленная за внешнее и внутреннее поглощение (Lee et al., 2011). Основным источником данных о величинах  $m_{\text{FUV}}$  служит ультрафиолетовый обзор неба, выполненный на спутнике GALEX (Martin et al., 2005; Gil de Paz et al., 2007).

Помимо этих двух методов оценки  $SFR$  делались по величине инфракрасного потока галактики в предположении, что FUV-поток звездного населения поглощается межзвездной пылью и переизлучается в инфракрасном диапазоне.

## 2. ОЦЕНКИ ПЛОТНОСТИ ТЕМПА ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ В НАСТОЯЩУЮ ЭПОХУ

Определения величины  $j_{\text{SFR}}(0)$  по данным о близких галактиках предпринимались многими авторами. Gallego et al. (1995) использовали для этого значения  $H\alpha$ -потоков у 264 галактик с эквивалентной шириной линии  $H\alpha$  более  $10 \text{ \AA}$  и красными

Таблица 1. Оценки средней плотности темпа звездообразования в современную эпоху

$j_{\text{SFR}}(0) \times 10^{-2}$	Данные	$N$	$z$	$\Delta$	Ссылки
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
$1.3 \pm 0.2$	$\text{H}\alpha$ , $EW > 10 \text{ \AA}$	264	$< 0.045$	-0.04	Gallego et al. (1995)
$2.2 \pm 0.7$	$\text{H}\alpha$	191	0.026	-0.03	Pérez-González et al. (2003)
$1.5 \pm 0.2$	$\text{H}\alpha$ , SDSS	$\sim 100\,000$	0.11	-0.12	Brinchmann et al. (2004)
$1.1 \pm 0.3$	FUV	896	$< 0.10$	-0.06	Wyder et al. (2005)
$1.5 \pm 0.3$	$\text{H}\alpha$ , HIPASS	468	$< 0.04$	-0.03	Hanish et al. (2006)
$1.6 \pm 0.2$	FUV, SDSS	$\sim 50\,000$	$\sim 0.10$	-0.06	Salim et al. (2007)
$1.9 \pm 0.2$	$\text{H}\alpha$ , SDSS	327	0.01	-0.01	James et al. (2008)
$1.9 \pm 0.3$	FUV, SDSS	$\sim 50\,000$	$< 0.10$	-0.06	Robotham and Driver (2011)
$1.4 \pm 0.3$	FUV, $\text{H}\alpha$	869	0.001	0.00	Karachentsev et al. (2013)
$1.34 \pm 0.16$	FUV, $\text{H}\alpha$	1428	0.001	0.00	This work

смещениями  $z < 0.045$ . Независимые оценки  $\text{H}\alpha$ -потоков для нескольких сотен близких галактик были сделаны Pérez-González et al. (2003) и James et al. (2008). Величину  $j_{\text{SFR}}$  по эквивалентным ширинам  $EW(\text{H}\alpha)$  определили Hanish et al. (2006), используя выборку 468 галактик с  $z < 0.04$ , наблюдавшихся в линии нейтрального водорода HI в обзоре HIPASS. Brinchmann et al. (2004) представили оценку  $j_{\text{SFR}}$  по  $N \sim 10^5$  галактикам со средним красным смещением  $\langle z \rangle = 0.11$  из оптического обзора неба SDSS (Abazajian et al., 2009).

Wyder et al. (2005) определили локальную плотность  $SFR$  по FUV-потокам 896 галактик с  $z < 0.10$ . Salim et al. (2007) и Robotham and Driver (2011) использовали для этого FUV-потоки у большого числа галактик из обзора SDSS с красными смещениями  $z < 0.10$ .

Обычно такие оценки сопровождалась предположением о виде функции светимости рассматриваемой выборки галактик и другими модельными предположениями. При вычислении плотности  $j_{\text{SFR}}$  возникла неопределенность в размере объема, к которому относились измеренные FUV-потоки. От этого недостатка меньше страдал подход, который использовали Karachentsev et al. (2013), оценивая  $j_{\text{SFR}}(0)$  по галактикам Местного объема с расстояниями  $D < 11$  Мпк. Сводка значений локальной плотности темпа звездообразования из различных источников представлена в таблице 1.

В ее столбцах содержатся: (1) — значение плотности темпа звездообразования в единицах  $10^{-2} M_{\odot} \text{ год}^{-1} \text{ Мпк}^{-3}$ , скорректированные к  $z = 0$  при параметре Хаббла  $H_0 = 70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$  с указанием стандартной ошибки; (2) — характер

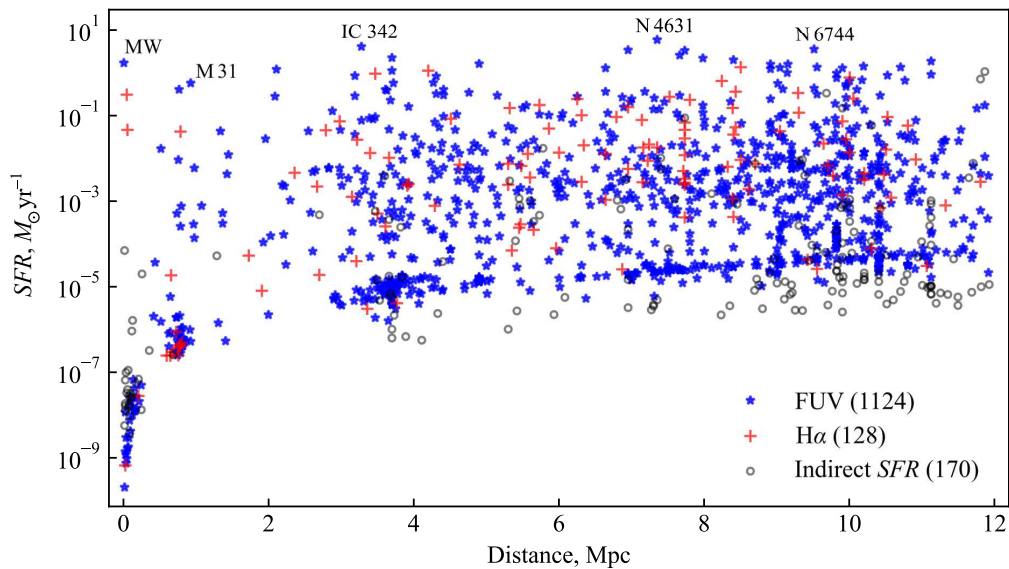
использованных данных; (3) — число галактик в выборке; (4) — среднее значение или интервал красных смещений; (5) — поправка в логарифме плотности  $\Delta \lg(j_{\text{SFR}})$  к значению  $z = 0$  в предположении, что при  $z \ll 1$  имеет место зависимость  $j_{\text{SFR}}(z)/j_{\text{SFR}}(0) \simeq (1+z)^{2.7}$  согласно Madau and Dickinson (2014); (6) — ссылка на источник наблюдательных данных.

Из приведенных данных видно, что различие между некоторыми оценками средней плотности темпа звездообразования в современную эпоху достигает фактора 2.

### 3. ВЫБОРКА ГАЛАКТИК МЕСТНОГО ОБЪЕМА (МО)

Сводка близких галактик с ожидаемыми расстояниями, не превышающими 11 Мпк, быстро пополнялась в последние годы в связи с появлением все более глубоких оптических и HI-обзоров больших участков неба. Если в «Каталоге соседних галактик» (Catalog of Neighbouring Galaxies, Karachentsev et al., 2004) число галактик составляло  $N = 450$ , то в Обновленном каталоге ближайших галактик (Updated Nearby Galaxy Catalog = UNGC, Karachentsev et al., 2013) их число выросло до  $N = 869$ . Наблюдательные данные о галактиках Местного объема представлены в электронном виде<sup>1)</sup> с описанием в работе Kaisina et al. (2012). Для более половины галактик этой выборки были измерены расстояния с точностью примерно 5% на космическом телескопе им. Хаббла. Наиболее полная сводка расстояний приведена

<sup>1)</sup><http://www.sao.ru/lv/lvgdb>



**Рис. 1.** Распределение галактик Местного объема по величине интегрального темпа звездообразования  $SFR$  и расстоянию. Галактики с оценками  $SFR$  по FUV-поток показаны звездочками, с оценками по  $H\alpha$ -поток обозначены крестиками, а объекты с косвенными оценками  $SFR$  по калибровочной зависимости отмечены светлыми кружками.

в Extragalactic Distance Database = EDD (Anand et al., 2021). Электронная версия каталога UNGC регулярно пополняется новыми объектами и новыми данными о близких галактиках. В настоящее время число предполагаемых членов Местного объема превысило 1400 объектов.

У значительной части этих галактик измерены  $H\alpha$ - и FUV-потоки. При определении интегрального темпа звездообразования галактики мы отдавали предпочтение данным о FUV-потоках, поскольку оценка  $SFR$  по ним относится к характерному интервалу времени примерно 100 млн лет, тогда как величина  $H\alpha$ -потока галактики характеризует  $SFR$  на более короткой шкале примерно 10 млн лет. Мы использовали оценки  $SFR(H\alpha)$  в тех случаях, когда отсутствовали данные о FUV-потоках галактик. Обычно это относилось к объектам на низких галактических широтах, где поглощение в FUV-диапазоне особенно велико.

Заметим, что оценки  $SFR(H\alpha)$  и  $SFR(FUV)$  хорошо взаимно прокалиброваны для случая спиральных галактик. При переходе от массивных галактик к карликовым дисперсия отношения  $SFR(H\alpha)/SFR(FUV)$  возрастает с уменьшением звездной массы галактики, а средняя величина этого отношения падает примерно в три раза для самых маломассивных объектов (Lee et al., 2009a; Karachentsev and Kaisina, 2019). Наряду со значениями  $SFR$  для галактик Местного объема электронная версия UNGC содержит данные о звездных массах  $M_*$  и массах нейтрального водорода  $M_{HI}$  в этих галактиках. Оба эти параметра являются основными интегральными маркерами процесса преобразования газа в звезды.

#### 4. ТЕМП ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ В МЕСТНОМ ОБЪЕМЕ

Распределение галактик МО по величине интегрального темпа звездообразования и расстоянию в пределах 12 Мпк представлено на рис. 1. Галактики с оценками  $SFR(FUV)$  отмечены звездочками, а объекты с измерениями  $SFR$  только по  $H\alpha$ -поток показаны крестами. Для 170 галактик выборки отсутствуют данные о FUV- и  $H\alpha$ -потоках. Оценки  $SFR$  у этих галактик сделаны по калибровочным зависимостям между  $SFR$  и  $M_*$ , построенным для галактик различных морфологических типов (приведены ниже в разделе 5). Эти галактики изображены на рис. 1 светлыми кружками.

Около четверти галактик МО имеют только верхние оценки FUV-потока. Большинство из них являются карликовыми сфероидальными галактиками (dSph) без заметных запасов газа для звездообразования. Мы приписали им значение  $SFR$ , соответствующее верхнему пределу FUV-потока. Эти слабые объекты образуют узкую последовательность в нижней части рис. 1 вблизи значения  $SFR = 10^{-5}$ . Учет или игнорирование этих галактик меняет оценку средней плотности  $SFR$  в МО всего на доли процента.

Для самых протяженных галактик — Млечного Пути (MW) и Туманности Андромеды (M31) — значения FUV-потоков были взяты из работ Chomiuk and Povich (2011) и Rahmani et al. (2016) соответственно. Как видим, в МО имеется 10 галактик с темпом звездообразования выше, чем у нашей Галактики.

Самым ярким очагом звездообразования является спиральная галактика NGC 4631, которая воспроизводит около  $5 M_{\odot}$  в год. На расстояниях  $D > 10$  Мпк плотность данных о  $SFR$  быстро падает, что указывает на неполноту выборки на дальней границе МО.

## 5. УДЕЛЬНЫЙ ТЕМП ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ У ГАЛАКТИК МО

Определение удельного темпа звездообразования галактики,  $sSFR = SFR/M_*$ , предполагает знание полной звездной массы галактики. Однако аккуратные интегральные оценки массы известны для небольшого числа близких галактик. При их вычислении возникает необходимость использовать различные модельные предположения, в частности о виде начальной функции звездных масс. Упрощенный способ оценки  $M_*$  основывается на данных об интегральной светимости галактик, предпочтительно в  $K$ -полосе, где минимальным образом проявляются эффекты внутреннего поглощения света и вспышек звездообразования.

Каталог UNGC (Karachentsev et al., 2013) содержит данные о светимости галактик в  $K$ -полосе,  $L_K$ , измеренные в 2MASS-обзоре всего неба (Jarrett et al., 2000; Skrutskie et al., 2006) или оцененные по светимости галактики в других полосах. Для определения  $M_*$  мы использовали соотношение  $M_*/L_K = 0.6 M_{\odot}/L_{\odot}$ , обоснованное Lelli et al. (2016). Коэффициент пропорциональности 0.6 слабо зависит от морфологического типа галактики, и этой зависимостью мы пренебрегли.

Распределение галактик МО по звездной массе и расстоянию представлено на рис. 2а. На нем сохранены те же символы, что и на рис. 1. Как видим, в МО имеется 22 галактики с массами, превосходящими звездную массу Млечного Пути и М 31. Самыми массивными представителями МО являются NGC 4594 («Sombregò») и Maffei 2, относящиеся к ранним типам с подавленным звездообразованием.

Рисунок 2b воспроизводит распределение галактик МО по удельному темпу звездообразования и расстоянию. Обозначения галактик с разными источниками данных о  $SFR$  такие же, как и на верхней панели.

Наиболее высоким темпом звездообразования на единицу звездной массы обладают карликовые галактики (NGC 1592, AGC 124635, Mrk 036), пребывающие в активной фазе (вспышке) звездообразования. На диаграмме прослеживаются горизонтальные последовательности «активных» ( $sSFR \sim 10^{-10}$  год $^{-1}$ ) и «пассивных» галактик ( $sSFR \sim 10^{-12}$  год $^{-1}$ ) с так называемой «зеленой долиной» между ними.

Вертикальные «столбы» на рис. 2 соответствуют группам галактик, у которых расстояния ряда слабых членов отождествлены с расстоянием главной галактики.

На рис. 3 представлено распределение спиральных и иррегулярных галактик с морфологическими типами  $T = 2-10$  по шкале de Vaucouleurs по интегральному темпу звездообразования и интегральной звездной массе. Линейная регрессия на нем,  $\lg SFR = 1.02 \lg M_* - 10.30$ , была использована для оценки  $SFR$  у галактик без FUV- и H $\alpha$ -потоков, которые отмечены светлыми кружками на предыдущих рисунках. Аналогичная калибровочная зависимость,  $\lg SFR = 0.86 \lg M_* - 10.80$ , была построена для пассивных галактик ( $T < 2$ ) с целью учета их очень малого вклада в общую величину  $SFR$  Местного объема.

## 6. ПЛОТНОСТЬ $SFR$ В МЕСТНОМ ОБЪЕМЕ

Суммируя величины  $SFR$  отдельных галактик и деля сумму на объем  $(4\pi/3)D^3$ , мы получили распределение средней плотности темпа звездообразования в пределах расстояния  $D$ , показанное на рис. 4а. Плотность  $j_{SFR}(D)$  падает с ростом  $D$  по двум причинам. Во-первых, мы находимся внутри Местной группы, которая окружена еще несколькими группами (M 81, NGC 253, Centaurus A) на расстоянии примерно 4 Мпк. Во-вторых, вблизи границы выборки на  $D \gtrsim 10$  Мпк полнота выборки падает из-за упущенных галактик, расстояния до которых остаются неизмеренными. Верхняя ломаная линия показывает вклад всех галактик МО с учетом 170 галактик, для которых не были измерены FUV- и H $\alpha$ -потоки. Вклад этих (в основном мелких) галактик заметен только на дальней границе МО.

На рис. 4b изображено распределение средней плотности звездной массы  $j_{M_*}$  в МО. Как видим распределения  $j_{SFR}(D)$  и  $j_{M_*}(D)$  имеют сходное поведение. Горизонтальная полоса у нижней кромки панели соответствует средней глобальной звездной плотности  $j_{M_*} = (2.6 \pm 0.1) \times 10^8 M_{\odot} \text{ Мпк}^{-3}$ , полученной по данным из работы Driver et al. (2012) о глобальной плотности  $K$ -светимости,  $(4.3 \pm 0.2) \times 10^8 L_{\odot} \text{ Мпк}^{-3}$  при  $M_*/L_K = 0.6 M_{\odot}/L_{\odot}$ . Наблюдаемое распределение звездной плотности в МО выше глобального значения на всех масштабах. Согласно данным, полученным в работе Karachentsev and Telikova (2018), избыток наблюдаемой локальной звездной плотности в объеме радиусом 11 Мпк составляет фактор  $1.46 \pm 0.10$  и становится незначимым на расстоянии  $D \simeq 40$  Мпк.

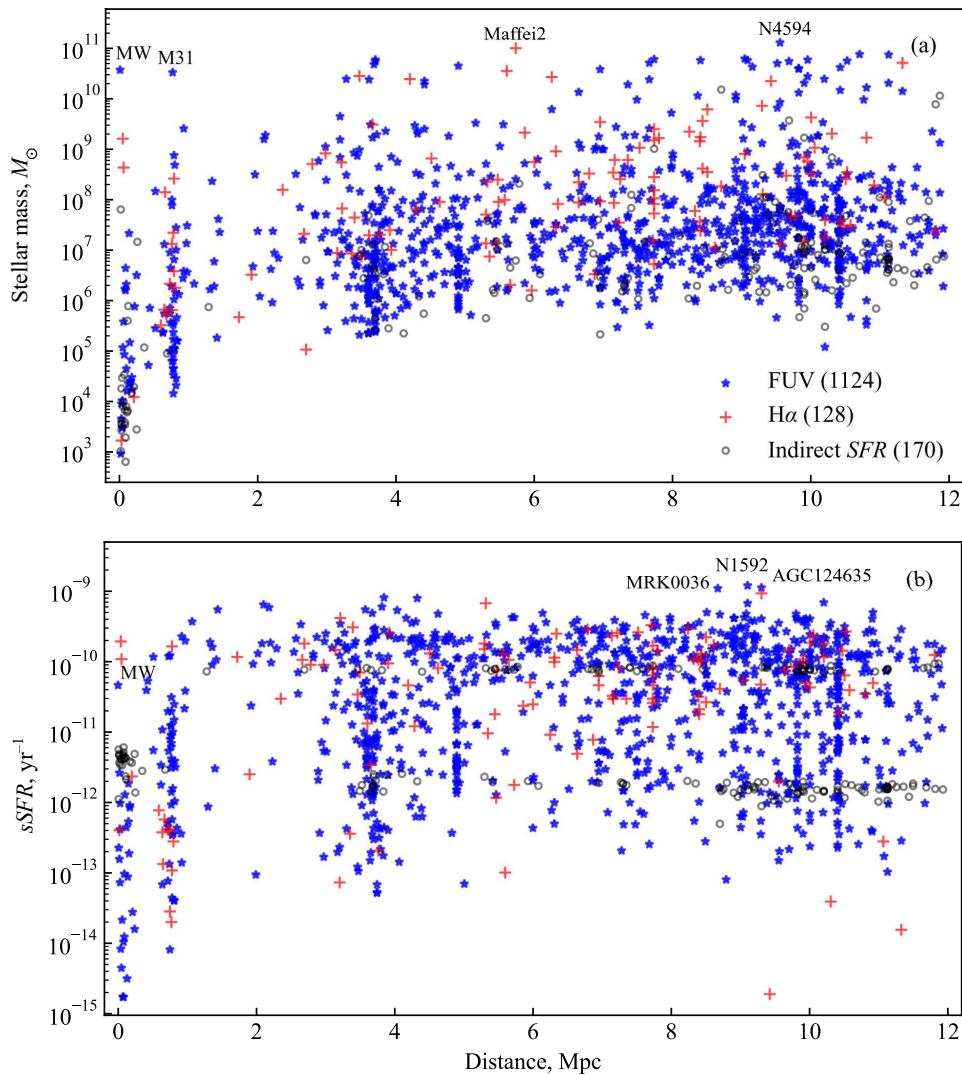


Рис. 2. Панель (а) — распределение галактик Местного объема по звездной массе и расстоянию. Панель (б) — распределение тех же галактик по величине удельного темпа звездообразования. Обозначения символов аналогичны рис. 1.

На рис. 4с воспроизводится поведение среднего удельного темпа звездообразования с ростом расстояния  $D$ . Вариации  $j_{\text{sSFR}}$  с увеличением объема относительно невелики.

В качестве среднего значения мы принимаем  $\langle j_{\text{sSFR}} \rangle = (4.7 \pm 0.3) \times 10^{-11} \text{ год}^{-1}$ . Следовательно, при таком среднем темпе звездообразования за космологическое время 13.8 млрд лет Местный объем воспроизводит  $(65 \pm 4)\%$  своей наблюдаемой звездной массы.

### 7. СРЕДНЯЯ ПЛОТНОСТЬ НЕЙТРАЛЬНОГО ГАЗА В МЕСТНОМ ОБЪЕМЕ

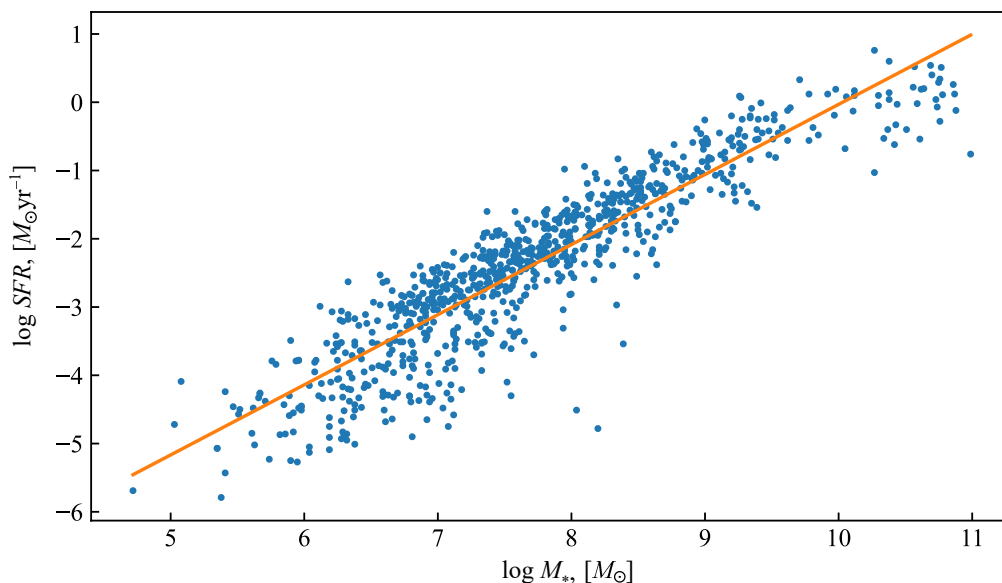
Обзоры больших участков неба в линии нейтрального водорода HI на  $\lambda = 21 \text{ см}$  (HIPASS, Koribalski et al., 2004; ALFALFA, Haynes et al.,

2011), а также целенаправленные наблюдения в HI индивидуальных галактик (Huchtmeier et al., 2000) привели к обнаружению HI-потока,  $F_{\text{HI}}$ , у множества близких галактик.

Согласно Roberts and Haynes (1994), масса нейтрального газа галактики выражается через  $F_{\text{HI}}$  как  $M_{\text{gas}} = 1.4 \times 2.36 \times 10^5 D^2 F_{\text{HI}}$ , где расстояние  $D$  измерено в Мпк,  $F_{\text{HI}}$  в Ян км с<sup>-1</sup>, а фактор 1.4 учитывает вклад в массу газа других более тяжелых элементов.

Панели рис. 5 показывают соотношение между массой газа и массой звезд у галактик ранних типов ( $T < 2$ ), а также у спиральных и иррегулярных галактик с морфологическими типами  $T = (2-10)$ .

Эти калибровочные зависимости с линейными регрессиями:  $\lg M_{\text{gas}} = 0.78 \lg M_* + 0.80$  для  $T < 2$  и  $\lg M_{\text{gas}} = 0.72 \lg M_* + 2.30$  для  $T = (2-10)$



**Рис. 3.** Соотношение между интегральным темпом звездообразования и звездной массой для галактик поздних типов ( $T = 2-10$ ) в Местном объеме.

были использованы нами, чтобы оценить массу газа у тех галактик МО, которые не были охвачены HI-наблюдениями. Это в первую очередь относится к галактикам северного неба со склонением  $\text{Dec} > +39^\circ$ , расположенным за пределами обзоров HIPASS и ALFALFA. Линии регрессии на обеих панелях показывают, что отношение  $M_{\text{gas}}/M_*$  возрастает от массивных галактик к карликовым, что свидетельствует о более медленном (тлеющем) процессе звездообразования у карликовых систем.

Распределение галактик МО по массе газа и расстоянию представлено на рис. 6. Только половина галактик МО (720 из 1422) имеет прямые измерения HI-потока. Для остальных 492 галактик (показаны открытыми кружками) оценки массы газа сделаны по калибровочным зависимостям рис. 5. Наиболее богатыми газом объектами являются спиральные Sc-галактики NGC 6744, IC 342, NGC 6946.

На рис. 7а представлено распределение средней плотности массы нейтрального газа в сферах радиусом  $D$  Мпк. Нижняя ломаная линия отражает распределение с учетом только прямых оценок HI-потока. Верхняя линия проведена для полной выборки галактик, включая случаи с оценкой массы газа по калибровочным зависимостям рис. 5. Вклад этих ненаблюдавшихся галактик в суммарную плотность газа оказался невелик.

Отношение суммарной массы газа к суммарной звездной массе галактик внутри сфер различного радиуса приведено на рис. 7б. Характерное отношение средних плотностей газа и звезд в МО составляет около 0.24. Следовательно, наличный

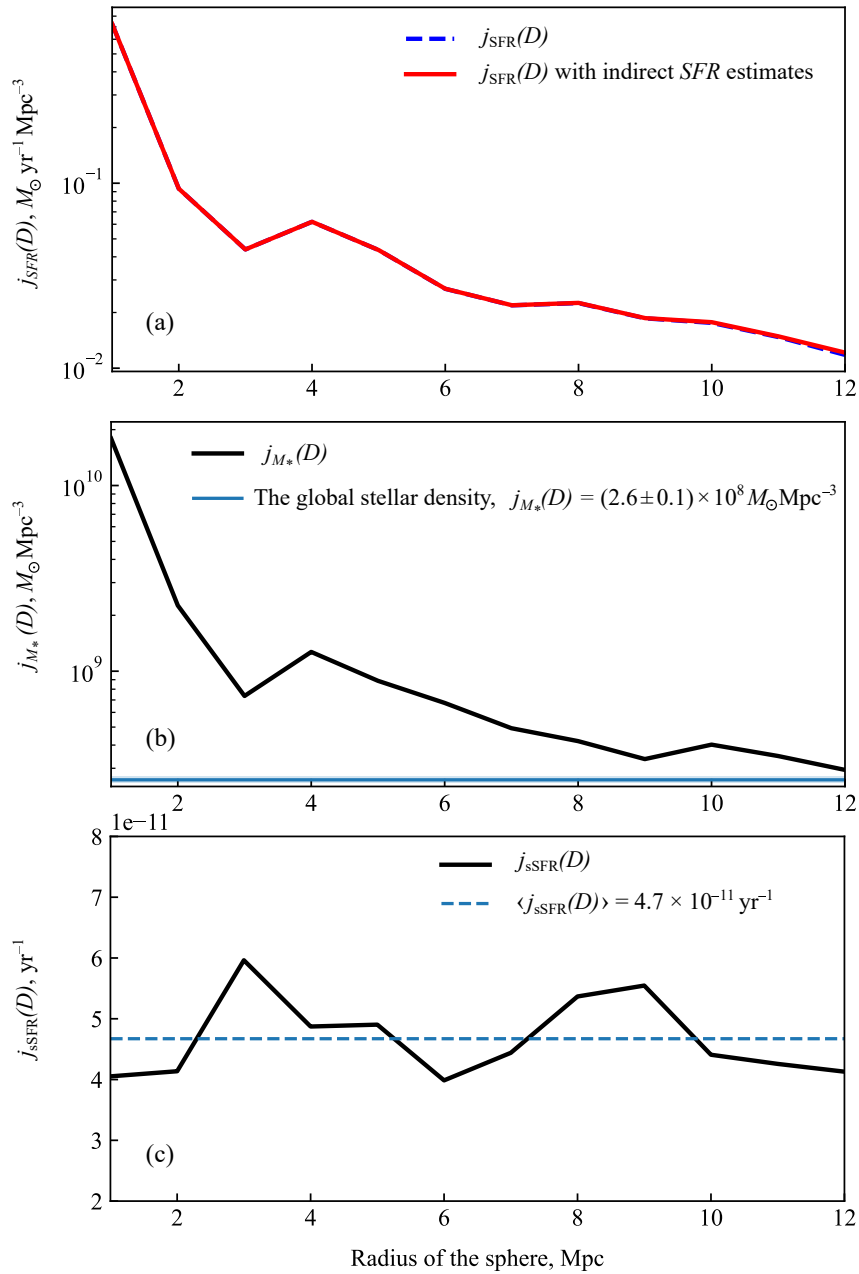
запас нейтрального газа в МО может поддерживать наблюдаемый темп звездообразования в нем на шкале еще 5 млрд лет. Следует отметить, однако, что по данным Zhou et al. (2023) примерно половина нейтрального газа галактик может находиться под порогом чувствительности выполненных HI-обзоров.

Малая величина отношения  $M_{\text{gas}}/M_*$  свидетельствует о том, что процесс звездообразования в Местном объеме уже затухает, приближаясь к своему завершению.

## 8. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Данные о значениях плотности величин  $SFR$ ,  $M_*$  и  $M_{\text{gas}}$ , представленные на рис. 4 и на рис. 7, были определены в предположении равномерного распределения галактик МО на небесной сфере. При этом число галактик в разных интервалах синуса галактической широты  $\sin b$  должно быть одинаковым. Реальное распределение близких галактик искажено сильным поглощением света в зоне Млечного Пути, а также концентрацией галактик к плоскости Местного сверхскопления, которое почти перпендикулярно плоскости Млечного Пути. Рисунок 8 воспроизводит распределение числа галактик МО по интервалам  $\sin |b|$  с шагом 0.05.

Приблизительное постоянство числа галактик в этих интервалах имеет место только на средних галактических широтах в диапазоне  $|b| = 15^\circ-50^\circ$ . На высоких широтах избыток числа галактик обусловлен эффектом Местного сверхскопления. Ожидаемый недобор галактик при  $|b| < 15^\circ$  вызван

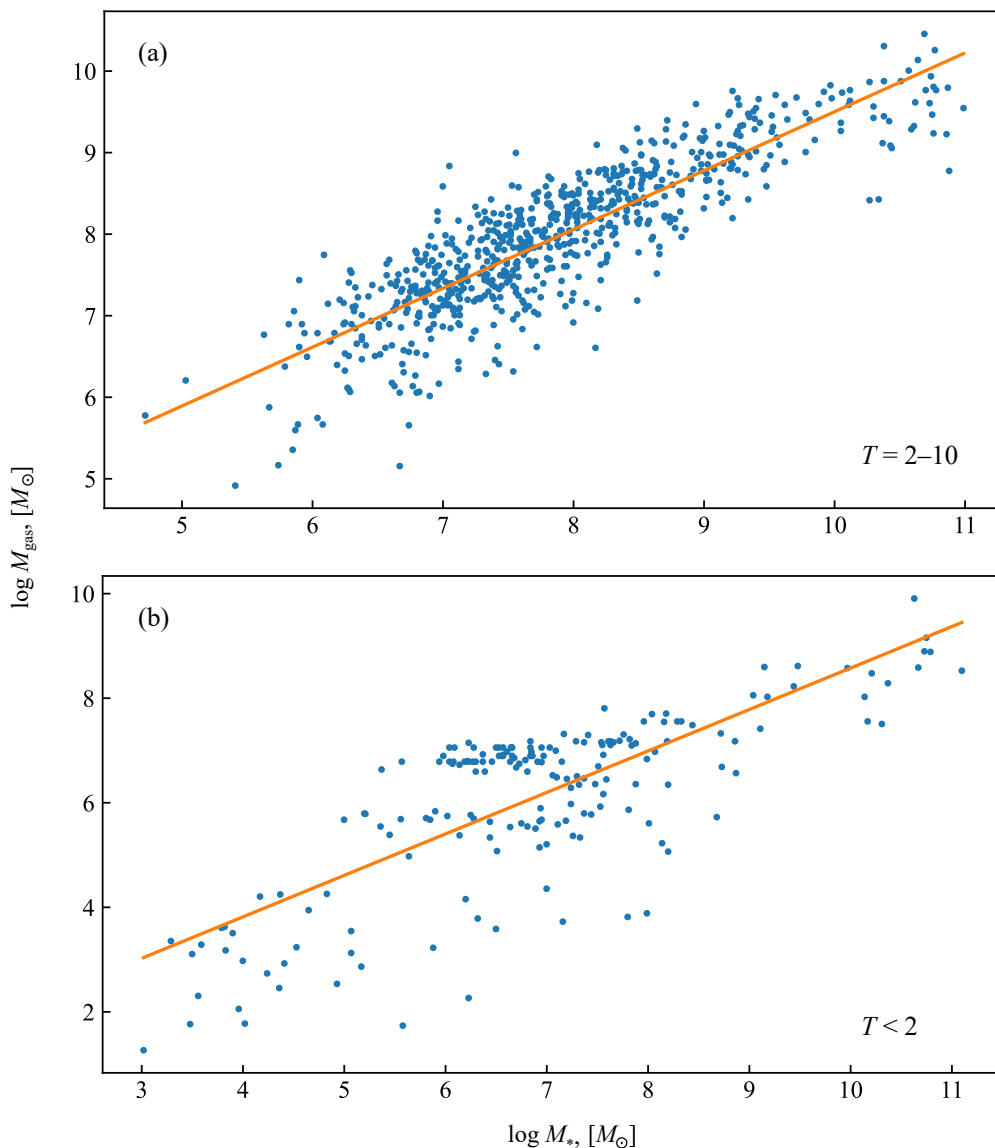


**Рис. 4.** Панель (a) — средняя плотность звездообразования в сферах Местного объема с разным радиусом  $D$ . Панель (b) — средняя плотность звездной массы в сферах Местного объема; горизонтальная полоса у нижней кромки соответствует глобальной звездной плотности. Панель (c) — распределение плотности удельного темпа звездообразования в Местном объеме.

поглощением света межзвездной пылью, которое особенно сильно в FUV-диапазоне. Экстраполируя горизонтальную линию на рис. 8 в области низких галактических широт, мы получаем недобор общего числа галактик МО:  $\Delta N = 258$ . Следовательно, представленные на рис. 4а оценки плотности необходимо умножить на фактор  $(1428 + 258)/1428 = 1.18$ . С учетом этого фактора мы принимаем значение средней плотности  $SFR$  в пределах расстояния  $D = 11$  Мпк, равное

$(1.95 \pm 0.18) \times 10^{-2} M_{\odot} \text{ год}^{-1} \text{ Мпк}^{-3}$ . Кроме того, поскольку избыток звездной плотности в данном объеме над глобальным значением составляет фактор  $1.46 \pm 0.10$  (Karachentsev and Telikova, 2018), то для глобальной величины темпа звездообразования в единичном объеме мы получаем оценку  $j_{SFR} = (1.34 \pm 0.16) \times 10^{-2} M_{\odot} \text{ год}^{-1} \text{ Мпк}^{-3}$ , которая представлена в последней строке таблицы 1.

Следует отметить, однако, что фактор 1.18 по-



**Рис. 5.** Соотношение между массой газа и звездной массой для галактик поздних типов  $T = [2-10]$  (a) и ранних типов  $T < 2$  (b).

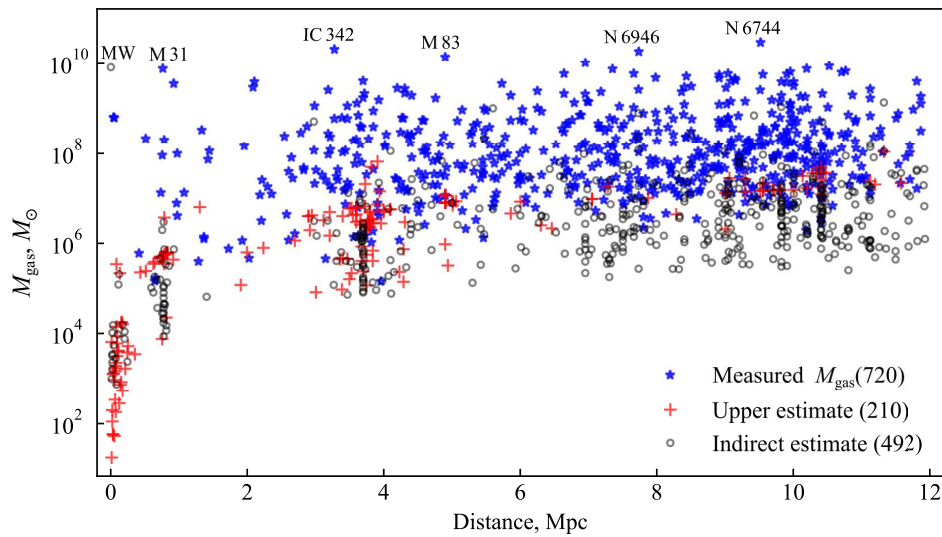
лучен исходя из соображений, что число недоучтенных галактик на низких галактических широтах не зависит от их массы (светимости). Это предположение может оказаться спорным, если процент скрытых от нас карликовых галактик существенно выше, чем у массивных спиральных галактик, дающих наибольший вклад в интегральный темп звездообразования. Очевидно, что это обстоятельство все же мало влияет на конечный результат.

Значения средней плотности темпа звездообразования во Вселенной из таблицы 1, скорректированные к эпохе  $z = 0$ , воспроизведены на рис. 9 с указанием ошибок среднего. Оценки, сделанные по  $\text{H}\alpha$ - и FUV-потокам, изображены соответственно кружками и квадратами. Горизонталь-

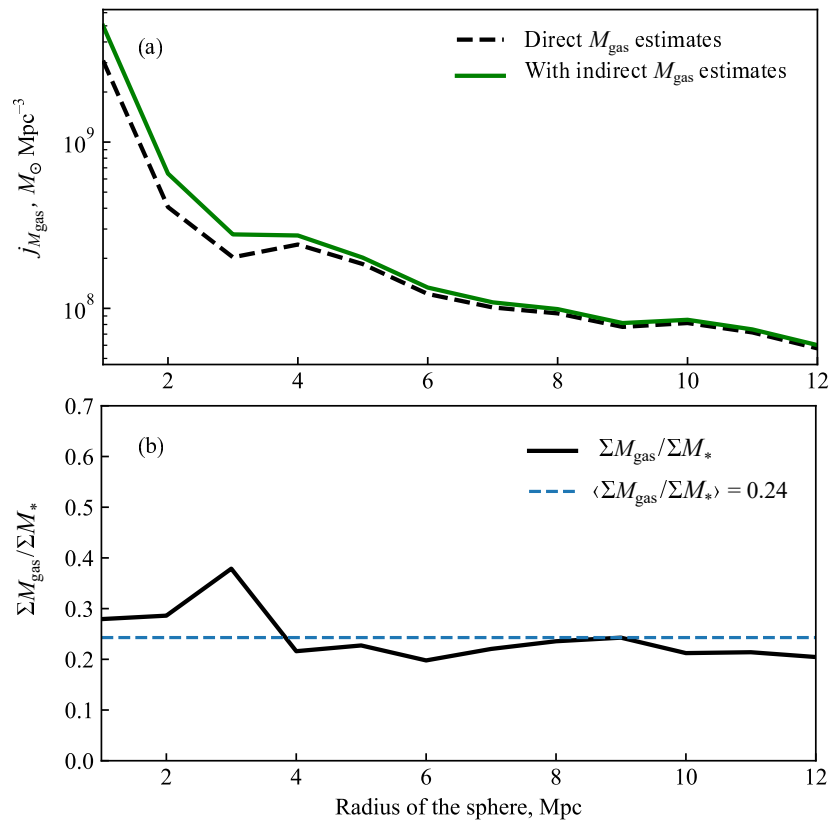
ная пунктирная линия обозначает среднее значение  $j_{\text{SFR}}(0) = 0.015 M_{\odot} \text{год}^{-1} \text{Mпк}^3$ , фиксированное Madau and Dickinson (2014) как самое оптимальное.

Как видим, оценки  $j_{\text{SFR}}(0)$  при значении  $H_0 = 70 \text{ км с}^{-1} \text{Mпк}^{-1}$  и с поправкой за эффект эволюции хорошо согласуются друг с другом в пределах ошибок их измерения. Систематические различия между значениями  $j_0(\text{SFR})$  по  $\text{H}\alpha$ - и FUV-потокам невелики. Оценки этой величины по инфракрасным потокам галактик (Sanders et al., 2003; Takeuchi et al., 2003) также согласуются с оптическими данными в пределах погрешностей. Можно полагать, что в настоящее время имеется согласие оценок средней космической плотности





**Рис. 6.** Распределение галактик Местного объема по величине массы газа и расстоянию. Галактики с прямыми оценкам  $M_{\text{gas}}$  обозначены звездочками, галактики с верхним пределом HI-потока показаны крестиками, а галактики с косвенными оценками  $M_{\text{gas}}$  по калибровочным зависимостям обозначены светлыми кружками.

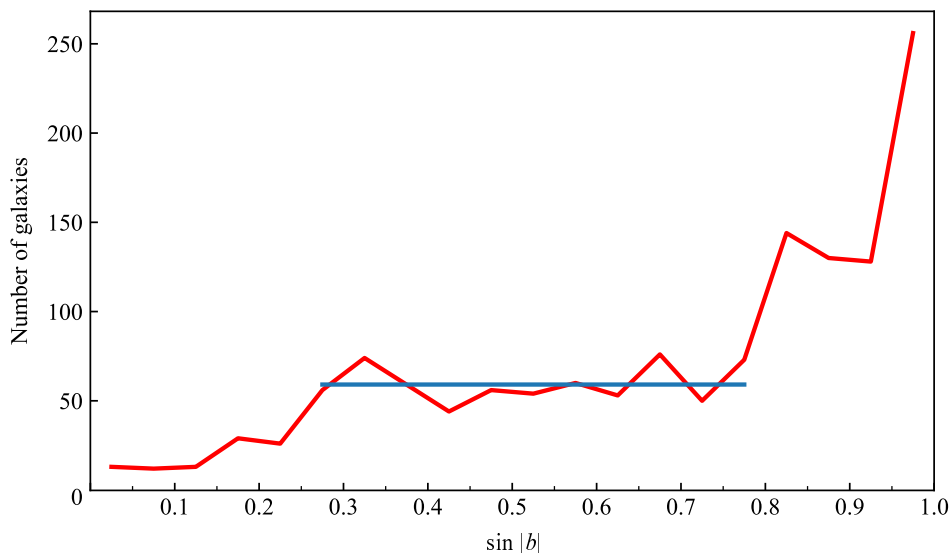


**Рис. 7.** Панель (а) — зависимость средней плотности массы газа от расстояния в Местном объеме: разность между верхней и нижней линиями соответствует вкладу галактик с косвенными оценками массы. Панель (б) — среднее отношение массы газа к звездной массе в сферах Местного объема разного радиуса.

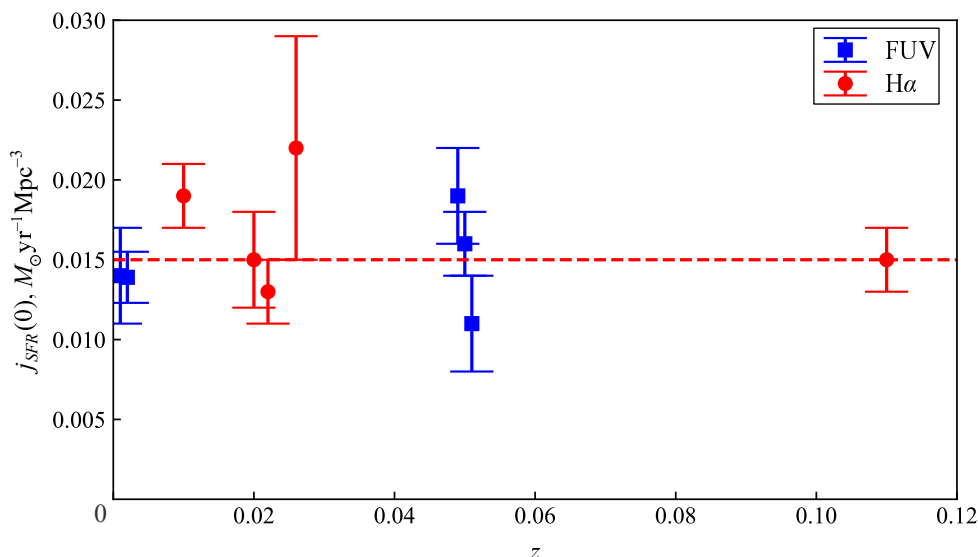
темпа звездообразования при  $z = 0$  с точностью примерно 10%.

В заключение отметим, что анализ и моделирование наблюдательных данных о  $SFR$  и  $M_*$  у

галактик Местного объема, недавно проведенные Haslbauer et al. (2023), заметно меняют историю космического звездообразования во Вселенной, делая зависимость  $SFR(z)$  более пологой и пони-



**Рис. 8.** Распределение числа галактик Местного объема в интервалах синуса галактической широты с шагом 0.05. Горизонтальная линия соответствует предполагаемым значениям, свободным от эффектов Местного сверхскопления и поглощения света в Млечном Пути.



**Рис. 9.** Оценки глобальной величины темпа звездообразования в единичном объеме Вселенной по данным FUV-потоков (квадраты) и H $\alpha$ -потоков (кружки), приведенные к эпохе  $z = 0$  при параметре Хаббла  $H_0 = 70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ . Горизонтальная штриховая линия соответствует среднему значению этой величины, согласно Madau and Dickinson (2014).

жая пик на диаграмме Madau при  $z \sim 2$  в 2.2 раза. Haslbauer et al. (2023) использовали данные каталога UNGC о средней плотности  $SFR$  и  $M_*$  для проверки различных моделей истории звездообразования в массивных и карликовых галактиках. Авторы показали, что модель эволюции темпа звездообразования в единичном объеме,  $j_{SFR}(z)$ , с крутым пиком при  $z \sim 2$ , представленная в работах Madau et al. (1998) и Madau and Dickinson (2014), находится в противоречии с наблюдаемым значением средней плотности звездной массы в МО.

Чтобы согласовать историю звездообразования в близких галактиках с наблюдаемым количеством их звездной массы, необходимо предположить, что реальный всплеск звездообразования в эпоху  $z \sim 2$  был в 2–3 раза менее интенсивным, чем предсказываемый классической диаграммой Madau.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использована база данных о галактиках Местного объема, обновление которой поддержано грантом № 075-15-2022-262 (13.МНРМУ.21.0003) Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. K. N. Abazajian, J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agüeros, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **182** (2), 543 (2009). DOI:10.1088/0067-0049/182/2/543
2. G. S. Anand, L. Rizzi, R. B. Tully, et al., *Astron. J.* **162** (2), id. 80 (2021). DOI:10.3847/1538-3881/ac0440
3. J. Brinchmann, S. Charlot, S. D. M. White, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **351** (4), 1151 (2004). DOI:10.1111/j.1365-2966.2004.07881.x
4. L. Chomiuk and M. S. Povich, *Astron. J.* **142** (6), article id. 197 (2011). DOI:10.1088/0004-6256/142/6/197
5. S. P. Driver, A. S. G. Robotham, L. Kelvin, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **427** (4), 3244 (2012). DOI:10.1111/j.1365-2966.2012.22036.x
6. J. Gallego, J. Zamorano, A. Aragon-Salamanca, and M. Rego, *Astrophys. J.* **455**, L1 (1995). DOI:10.1086/309804
7. A. Gil de Paz, S. Boissier, B. F. Madore, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **173** (2), 185 (2007). DOI:10.1086/516636
8. D. J. Hanish, G. R. Meurer, H. C. Ferguson, et al., *Astrophys. J.* **649** (1), 150 (2006). DOI:10.1086/504681
9. M. Haslbauer, P. Kroupa, and T. Jerabkova, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **524** (3), 3252 (2023). DOI:10.1093/mnras/stad1986
10. M. P. Haynes, R. Giovanelli, A. M. Martin, et al., *Astron. J.* **142** (5), article id. 170 (2011). DOI:10.1088/0004-6256/142/5/170
11. W. K. Huchtmeier, I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, and M. Ehle, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **141**, 469 (2000). DOI:10.1051/aas:2000324
12. P. A. James, J. H. Knapen, N. S. Shane, et al., *Astron. and Astrophys.* **482** (2), 507 (2008). DOI:10.1051/0004-6361:20078560
13. T. H. Jarrett, T. Chester, R. Cutri, et al., *Astron. J.* **119** (5), 2498 (2000). DOI:10.1086/301330
14. E. I. Kaisina, D. I. Makarov, I. D. Karachentsev, and S. S. Kaisin, *Astrophysical Bulletin* **67** (1), 115 (2012). DOI:10.1134/S1990341312010105
15. I. D. Karachentsev and E. I. Kaisina, *Astrophysical Bulletin* **74** (2), 111 (2019). DOI:10.1134/S1990341319020019
16. I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, W. K. Huchtmeier, and D. I. Makarov, *Astron. J.* **127** (4), 2031 (2004). DOI:10.1086/382905
17. I. D. Karachentsev, D. I. Makarov, and E. I. Kaisina, *Astron. J.* **145** (4), article id. 101 (2013). DOI:10.1088/0004-6256/145/4/101
18. I. D. Karachentsev and K. N. Telikova, *Astronomische Nachrichten* **339** (615), 615 (2018). DOI:10.1002/asna.201813520
19. R. C. Kennicutt, Jr., *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **36**, 189 (1998). DOI:10.1146/annurev.astro.36.1.189
20. B. S. Koribalski, L. Staveley-Smith, V. A. Kilborn, et al., *Astron. J.* **128** (1), 16 (2004). DOI:10.1086/421744
21. J. C. Lee, A. Gil de Paz, R. C. Kennicutt, Jr., et al., *Astrophys. J. Suppl.* **192** (1), article id. 6 (2011). DODOI:10.1088/0067-0049/192/1/6I:10.1088/0067-0049/192/1/6
22. J. C. Lee, A. Gil de Paz, C. Tremonti, et al., *Astrophys. J.* **706** (1), 599 (2009a). DOI:10.1088/0004-637X/706/1/599
23. J. C. Lee, J. Kennicutt, Robert C., S. J. J. G. Funes, et al., *Astrophys. J.* **692** (2), 1305 (2009b). DOI:10.1088/0004-637X/692/2/1305
24. F. Lelli, S. S. McGaugh, and J. M. Schombert, *Astron. J.* **152** (6), article id. 157 (2016). DOI:10.3847/0004-6256/152/6/157
25. P. Madau and M. Dickinson, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **52**, 415 (2014). DOI:10.1146/annurev-astro-081811-125615
26. P. Madau, L. Pozzetti, and M. Dickinson, *Astrophys. J.* **498** (1), 106 (1998). DOI:10.1086/305523
27. D. C. Martin, J. Fanson, D. Schiminovich, et al., *Astrophys. J.* **619** (1), L1 (2005). DOI:10.1086/426387
28. P. G. Pérez-González, J. Zamorano, J. Gallego, et al., *Astrophys. J.* **591** (2), 827 (2003). DOI:10.1086/375364
29. S. Rahmani, S. Lianou, and P. Barmby, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **456** (4), 4128 (2016). DOI:10.1093/mnras/stv2951
30. M. S. Roberts and M. P. Haynes, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **32**, 115 (1994). DOI:10.1146/annurev.aa.32.090194.000555
31. A. S. G. Robotham and S. P. Driver, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **413** (4), 2570 (2011). DOI:10.1111/j.1365-2966.2011.18327.x
32. S. Salim, R. M. Rich, S. Charlot, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **173** (2), 267 (2007). DOI:10.1086/519218
33. D. B. Sanders, J. M. Mazzarella, D. C. Kim, et al., *Astron. J.* **126** (4), 1607 (2003). DOI:10.1086/376841
34. M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening, et al., *Astron. J.* **131** (2), 1163 (2006). DOI:10.1086/498708
35. T. T. Takeuchi, K. Yoshikawa, and T. T. Ishii, *Astrophys. J.* **587** (2), L89 (2003). DOI:10.1086/375181
36. T. K. Wyder, M. A. Treyer, B. Milliard, et al., *Astrophys. J.* **619** (1), L15 (2005). DOI:10.1086/424735
37. R. Zhou, M. Zhu, Y. Yang, et al., *Astrophys. J.* **952** (2), id. 130 (2023). DOI:10.3847/1538-4357/acdcf5

**Average Star Formation Parameters in the Local Volume of the Universe****I. D. Karachentsev<sup>1</sup> and A. A. Popova<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia<sup>2</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, 195251 Russia

Based on the fluxes of 1400 nearby galaxies observed in far ultraviolet (FUV) and in the  $H\alpha$  line, we determined the global star formation rate per unit Universe volume,  $j_{\text{SFR}} = (1.34 \pm 0.16) \times 10^{-2} M_{\odot} \text{yr}^{-1} \text{Mpc}^{-3}$ . With the current star formation rate ( $SFR$ ),  $(65 \pm 4)\%$  of the observed stellar mass is reproduced in the cosmological time of 13.8 billion years. The neutral gas reserves in the Local Volume with a radius of 11 Mpc will facilitate the current  $SFR$  on a scale of approximately another 5 billion years.

Keywords: *galaxies—star formation rate: galaxies—evolution*