АСТРОФИЗИКА

ТОМ 61 ФЕВРАЛЬ, 2018 ВЫПУСК 1

ИСПРАВЛЕННЫЕ ЗА ПЫЛЬ ТЕМПЫ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ В ГАЛАКТИКАХ С ВНЕШНЕЙ КОЛЬЦЕВОЙ СТРУКТУРОЙ

И.П.КОСТЮК[1], О.К.СИЛЬЧЕНКО[2]

Поступила 22 августа 2017
Принята к печати 14 декабря 2017

Для 34-х дисковых галактик ранних морфологических типов, у которых присутствует внешняя кольцевая структура и имеется ультрафиолетовое излучение в кольце, были определены и исправлены за внутреннее поглощение в галактиках темпы звездообразования SFR, их поверхностные плотности Σ_{SFR} и абсолютные AB звездные величины M_{AB} как во внешних кольцевых деталях, так и для всей галактики. Использовались данные космических миссий GALEX (в ультрафиолетовых полосах NUV и FUV) и WISE (в инфракрасной полосе W4 22 μm). Среднее относительное отклонение исправленных SFR и Σ_{SFR}, полученных в полосах NUV и FUV, составляет всего 19.0%, и поэтому для статистических сопоставлений использовались их средние значения. Приводятся зависимости исправленных темпов звездообразования в кольце и во всей галактике, а также их ультрафиолетовых цветов от их абсолютных звездных величин.

Ключевые слова: *эволюция галактик: структура галактик: спиральные галактики: линзовидные галактики: звездообразование: пыль в галактиках*

1. *Введение.* В работе [1] мы приводили результаты вычислений наблюдаемых темпов звездообразования (SFR), их поверхностных плотностей (Σ_{SFR}) и AB звездных величин (m_{AB}) для кольцевых деталей в выборке галактик с внешними кольцами. Для вычисления темпов звездообразования использовались данные космической миссии GALEX (http://galex.stsci.edu/GR6/) в ультрафиолетовых (УФ) полосах NUV (1750-2800 A) и FUV (1350-1750 A). Однако ультрафиолетовое излучение, благодаря коротким длинам волн, сильно поглощается пылью. В работе [1] мы исправляли ультрафиолетовые данные только за пыль переднего фона, сосредоточенную в нашей Галактике на луче зрения, направленном от нас на исследуемые галактики с кольцами. В настоящей работе мы сделали попытку исправить наблюдаемые УФ излучения молодых звезд в галактиках и соответствующие им темпы звездообразования за возможное присутствие внутренней пыли в галактиках. Пыль, погруженная в области звездообразования, нагревается молодыми массивными звездами и излучает в инфракрасном диапазоне спектра. Таким образом, величину поглощения в ультрафиолете можно оценить, измеряя интенсивность излучения

галактики на длинах волн в десятки микрон. Мы применили этот подход также к исправлению ультрафиолетовых звездных величин как во внешних кольцевых деталях, так и для всей галактики в целом.

2. *Исправление ультрафиолетового излучения за поглощение пылью в галактиках.* Вычисления наблюдаемых и исправленных за внутреннее поглощение пылью потоков УФ излучения молодых звезд в галактиках, а также соответствующих им значений SFR ($M_\odot$ год$^{-1}$), Σ_{SFR} ($M_\odot$ год$^{-1}$ кпк$^{-2}$), m_{AB} проводились для 34-х галактик из списка дисковых галактик ранних типов с внешними кольцеобразными структурами [2], составленного на основе каталога ARRAKIS (Atlas of resonance rings as known in the S^{4}G, [3]). На картах GALEX кольцевые детали этих галактик имеют заметное УФ излучение, что доказывает присутствие звездообразования в кольцах в течение последних нескольких сотен миллионов лет. В процессе оценки УФ излучения колец мы удаляли из суммарного потока вклад звезд переднего фона и галактик заднего фона: в диафрагмах разного размера, центрированных на фоновые объекты, вычислялся их поток, который потом вычитался из изображения галактики и заменялся средним значением потока галактики вокруг диафрагмы. Морфологический тип исследуемых галактик - от S0 до Sb, согласно каталогу ARRAKIS, в котором использовались результаты первой фазы классификации галактик [4] по изображениям в полосе 3.6 мкм из каталога S^{4}G (The Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies, [5]). В данной работе для исследования свойств кольцевых галактик использовался оптический морфологический тип галактик, приведенный в S^{4}G ([5], http://irsa.ipac.caltech.edu/data/SPITZER/S4G/). Поскольку при классификации галактик по инфракрасным изображениям в [4] отмечается эффект более ранней классификации по сравнению с оптическими данными, то при использовании оптического морфологического типа из S^{4}G две галактики, как оказалось, имеют тип Sbc. Размеры и отношения осей кольцевой детали брались из каталога ARRAKIS. Параметры для всей галактики брались из каталога S^{4}G на длине волны 3.6 μm . Учитывались поправки за поглощение пылью нашей Галактики, как описано в [1]. Расстояния до галактик брались из базы данных NED.

Наблюдаемые и исправленные значения SFR ($M_\odot$ год$^{-1}$) вычислялись через наблюдаемые и исправленные значения светимости L (эрг с$^{-1}$) по формулам из [6,7] в полосах NUV и FUV космической миссии GALEX. Мы использовали начальную функцию масс звезд Солпитера [8] с пределами масс 0.1-100 $M_\odot$ и допущение постоянных по времени в течение последних 100-400 млн. лет темпов звездообразования. Формулы для исправленных светимостей: L(FUV)corr = L(FUV)obs + 3.89L(25 μm), L(NUV)corr = L(NUV)obs

+ 2.26L(25 μm) [6,7]. В данной работе для расчета исправленных УФ-светимостей как колец, так и галактик в целом, использовались инфракрасные изображения галактик на длине волны 22 μm, полученные на космическом телескопе WISE [9] (http://irsa.ipac.caltech.edu/applications/wise/). Переход от светимостей L(22 μm), получаемых по картам космической миссии WISE, к L(25 μm), используемых для определения Lcorr, осуществлялся по формуле из [10]: L(25 μm)/L(22 μm) = = 1.05 ± 0.22. Среди исследуемых 34-х галактик имеется галактика с мощным активным ядром, NGC1068, центральная часть которой при оценке интегральных потоков вырезалась из ультрафиолетовых и инфракрасного изображений. Для работы с изображениями космических миссий GALEX и WISE использовались программы DS9 [11]. Наблюдаемые m_{AB} вычислялись по формулам, приведенным на сайте GALEX. А исправленные за внутреннее поглощение в галактиках абсолютные звездные величины M_{AB} определялись из исправленных значений светимости Lcorr.

Наблюдаемые и исправленные темпы звездообразования SFR определялись отдельно в полосах NUV и FUV. Их сравнение между собой приведено на рис.1. Среднее отклонение исправленных logSFR(FUV) и logSFR(NUV) от диагонали (рис.1 справа, верхняя часть) составляет 0.08, среднее квадратичное

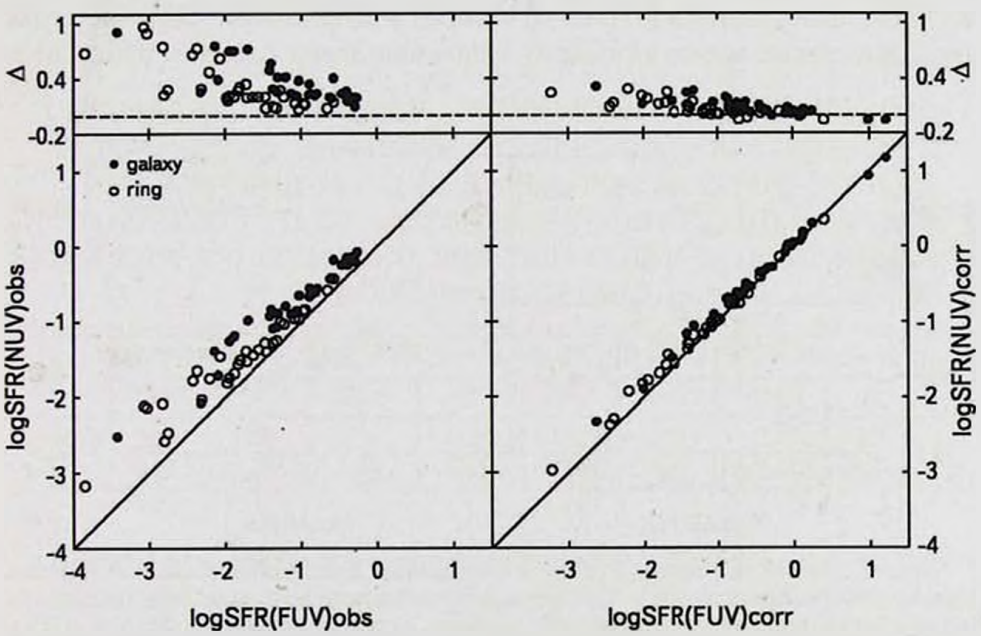

Рис.1. Сравнение наблюдаемых (слева) и исправленных за поглощение внутренней пылью УФ излучения (справа) значений logSFR($M_\odot$ год$^{-1}$) для 34-х галактик (заполненные кружки) и их кольцевых деталей (пустые кружки) в полосах NUV и FUV космической миссии GALEX. В верхних частях рисунков приводится отклонение Δ = logSFR(NUV) - - logSFR(FUV). Пунктирная линия соответствует нулевому значению Δ.

отклонение 0.08, максимальное отклонение 0.29dex. Соответствующие величины для наблюдаемых logSFR (рис.1 слева) до исправления за внутреннюю пыль: 0.33, 0.23, 0.97. Мы видим, что применяемый метод исправления светимостей в полосах NUV и FUV за поглощение пылью в дисках галактик УФ излучения сильно улучшает сходимость оценок темпов звездообразования по разным ультрафиолетовым полосам. Далее используются средние значения между logSFR(FUV)corr и logSFR(NUV)corr, которые обозначаются как logSFRcorr. Средняя ошибка значений logSFRcorr составляет 0.12 (квадратура ошибок на верхнем рис.1 справа и ошибок вычислений logSFR из [1]). Соответственно, для средних значений $\log\Sigma_{SFRcorr}$ средняя ошибка составляет 0.09. Средние ошибки исправленных AB звездных величин составляют $0^m.07$ для NUV и $0^m.09$ для FUV полосы.

3. ***Исправленные темпы звездообразования в галактиках с внешними кольцами и в их кольцевых деталях.*** В работе [12] приводится зависимость наблюдаемых показателей цвета (FUV-NUV) и наблюдаемых абсолютных AB звездных величин M_{AB} в ультрафиолетовой полосе FUV для разных морфологических типов. В работе [1] была представлена такая же зависимость для кольцевых деталей 34-х галактик, которая соответствует приведенной в [12], но со сдвигом в более слабые светимости. На рис.2 для разных морфологических типов кольцевых галактик приводится

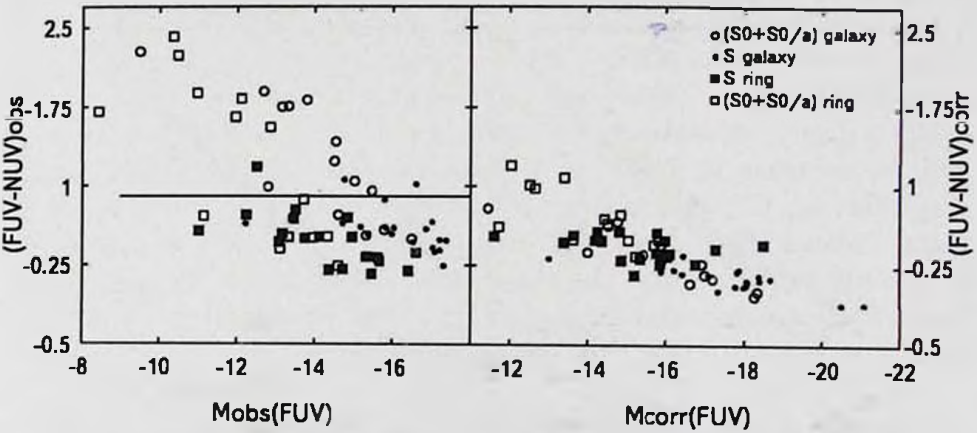

Рис.2. Зависимость наблюдаемых (слева) и исправленных за поглощение пылью УФ излучения (справа) показателей цвета (FUV-NUV) и абсолютных звездных величин M(FUV) для 34-х кольцеобразных галактик (пустые квадраты - кольца, морфологический тип S0+S0/a; пустые кружки - галактики, морфологический тип S0+S0/a; заполненные квадраты - кольца, морфологический тип S; заполненные кружки - галактики, морфологический тип S). Прямая горизонтальная линия соответствует (FUV-NUV)obs = 0.9, которая, согласно [12], отделяет спиральные и неправильные галактики от большинства галактик ранних типов, в которых, по мнению [12], в ультрафиолетовом излучении доминируют старые звезды.

зависимость их показателей цвета (FUV-NUV) от абсолютной AB звездной величины в полосе FUV, как наблюдаемых значений (по аналогии с данными из [12]), так и значений, исправленных за внутреннее поглощение в галактиках. Галактики в целом (рис.2 слева), как и их кольцеобразные детали [1], показывают такой же тренд, как и в [12]. После исправления за поглощение пылью (рис.2 справа) видно, что разброс по значениям (FUV-NUV) становится в два раза меньше, и корреляция между цветом и абсолютной звездной величиной в ультрафиолете значительно улучшается. Морфологические типы S0 и S0/a объединены, так как между этими типами различия в ультрафиолетовых показателях цвета статистически не значимы (как для наблюдаемых, так и исправленных значений).

В табл.1 приводятся средние значения (FUV-NUV) и их среднеквадратичные отклонения (σ) для галактик в целом и для их кольцевых деталей в зависимости от морфологического типа галактики (T). Значения исправленных цветов (FUV-NUV) различаются статистически значимо как между галактикой и кольцом внутри одного морфологического типа, так и между различными морфологическими типами внутри совокупностей галактик и колец. Исправленные цвета (FUV-NUV) в кольцах по сравнению со всей галактикой краснее для всех морфологических типов.

Таблица 1

СРЕДНИЕ НАБЛЮДАЕМЫЕ (FUV-NUV)obs И ИСПРАВЛЕННЫЕ (FUV-NUV)corr ЗНАЧЕНИЯ, ИХ СРЕДНЕКВАДРАТИЧНЫЕ ОТКЛОНЕНИЯ (σ) И КОЛИЧЕСТВО ГАЛАКТИК (N) В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО ТИПА (T) ИЗ КАТАЛОГА S^{4}G ОТДЕЛЬНО ДЛЯ ГАЛАКТИКИ В ЦЕЛОМ (galaxy) И ЕЕ КОЛЬЦЕВОЙ ДЕТАЛИ (ring)

T	(FUV-NUV)obs		(FUV-NUV)corr		(FUV-NUV)obs		(FUV-NUV)corr		N
	galaxy	σ	galaxy	σ	ring	σ	ring	σ	
S0+S0/a	1.25	0.58	0.34	0.25	1.22	0.75	0.73	0.28	14
S	0.59	0.20	0.14	0.13	0.48	0.24	0.42	0.11	20

На рис.3 сопоставляются средние поверхностные плотности темпов звездообразования в кольцевой детали $\log\Sigma_{SFR}\mathrm{corr}(\mathrm{ring})$ с темпом звездообразования во всей кольцеобразной галактике logSFRcorr(galaxy) и с ее линейным размером R. Корреляция очевидным образом отсутствует. Средние значения поверхностной плотности темпов звездообразования в кольцах $\log\Sigma_{SFR}\mathrm{corr}(\mathrm{ring})$ для разных морфологических типов не отличаются: -3.14 для S0 галактик, -3.13 для S0/a, -3.06 для S и -3.09 для всех галактик при практически одинаковом

стандартном отклонении, которое составляет 0.50. Можно отметить, что не обнаружена зависимость величины $\log\Sigma_{SFRcorr}(ring)$ от темпа звездообразования всей галактики, от линейного размера галактики и морфологического типа галактики, хотя разброс точек довольно большой.

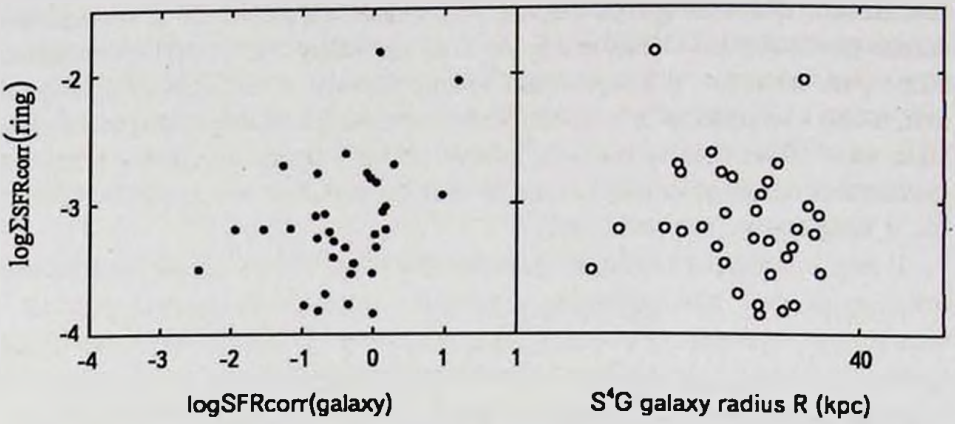

Рис.3. Зависимость поверхностной плотности темпа звездообразования $\log\Sigma_{SFRcorr}(ring)$ ($M_\odot$ год$^{-1}$ кпк$^{-2}$) кольцевой детали от темпа звездообразования logSFRcorr(galaxy) ($M_\odot$ год$^{-1}$) всей галактики (слева) и линейного радиуса галактики по S^{4}G (справа).

На рис.4 справа показана зависимость логарифма доли кольца в темпе звездообразования всей галактики. Эта доля не зависит от морфологического

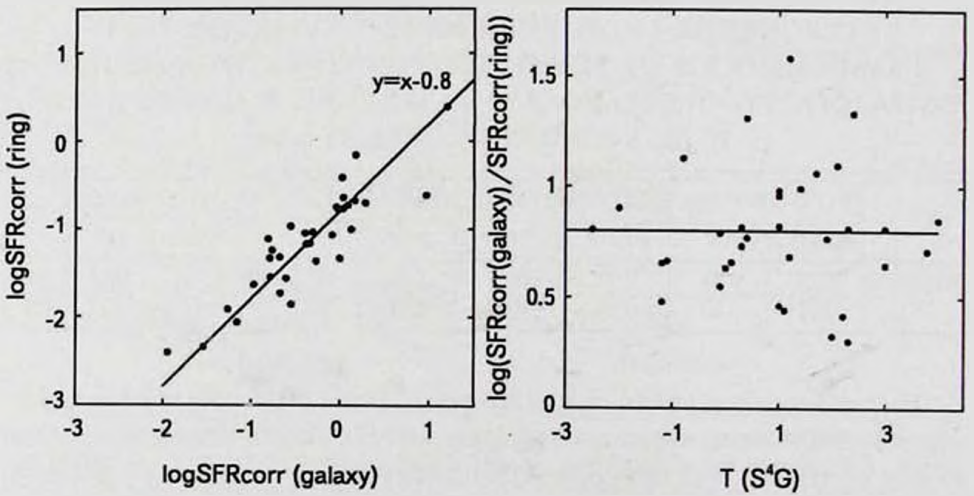

Рис.4. Слева: зависимость логарифмов темпов звездообразования в кольцевой детали logSFRcorr(ring) от темпов звездообразования во всей галактике logSFRcorr(galaxy). Справа: зависимость логарифма доли кольцевой детали в SFR всей галактики от морфологического типа из S^{4}G. Прямая линия соответствует среднему значению этой доли.

типа: среднее значение logSFR(galaxy) - logSFR(ring) составляет 0.8 со стандартным отклонением 0.28, что соответствует доле кольца в темпе звездообразования всей галактики равной 0.16. Зависимость темпов звездообразования кольца и галактики в целом хорошо аппроксимируется линейным законом $y=x-0.8$ (рис.4 слева).

На рис.5 представлена гистограмма распределения величины logSFRcorr для спиральных галактик (20 из 34 галактик), для кольцевой детали и для всей галактики в целом. Распределение для кольцевой детали значимо уже, чем для галактики в целом. Такой универсальный характер звездообразования во внешнем кольце может быть связан с единой природой формирования внешних колец. Поскольку в выборке в равной мере присутствуют как галактики с барами, так и галактики заведомо без баров, мы скорее объясним эту универсальность происхождением газа в кольце, чем динамическими механизмами выделения радиальной зоны его накопления.

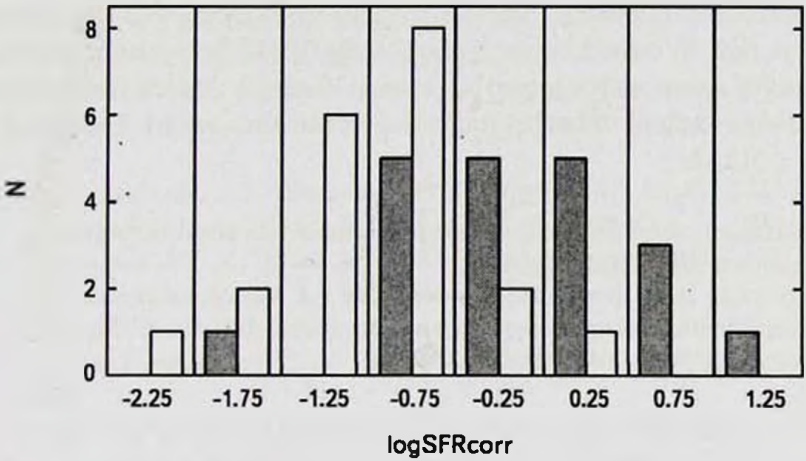

Рис.5. Гистограмма распределения значений logSFRcorr для кольцевых спиральных галактик (серые столбики) и их кольцевых деталей (белые столбики).

4. *Выводы*. Исправленные за внутреннее поглощение на основании данных миссии WISE в полосе 22 μm темпы звездообразования в УФ полосах NUV и FUV миссии GALEX показали хорошее согласие между собой.

Исправленный за внутреннее поглощение в галактиках показатель цвета (FUV-NUV) как у галактик в целом, так и у их колец, имеет узкий интервал в 1 звездную величину (в 2 раза уже наблюдаемого без исправления за пыль интервала) и, по критериям, обоснованным в [12], соответствует недавнему (в пределах нескольких сотен миллионов лет) звездообразованию - как в спиральных, так и в линзовидных галактиках с ультрафиолетовыми кольцами.

Природа звездообразования в кольцах спиральных и линзовидных галактик, возможно, не одна и та же; или же различаются геометрия пространственного распределения молодых звезд и пыли. Это выражается в том, что исправленный ультрафиолетовый цвет (FUV-NUV) колец в линзовидных галактиках систематически краснее, чем в спиральных. Но интересно, что доля кольца в темпе звездообразования всей галактики постоянна и не зависит от морфологического типа галактики T.

Работа основана на данных ультрафиолетового космического телескопа GALEX, собранных в общедоступном архиве The MultiMission Mikulski Archive for Space Telescopes (MAST) в STScI, США. Также мы использовали данные космического телескопа WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer), который является совместным проектом Университета Калифорнии в Лос-Анжелесе и Лаборатории реактивного движения в Калифорнийском технологическом институте, финансируемой NASA; инфракрасные данные собраны в архиве NASA/IPAC Infrared Science Archive. Характеристики исследуемых галактик брались из базы данных NED (NASA/IPAC Extragalactic Database), которая, как и архив инфракрасных данных, поддерживается Лабораторией реактивного движения Калифорнийского технологического института по контракту с NASA.

[1] Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия, e-mail: kostiuk@sao.ru

[2] Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга, Москва, Россия, e-mail: olga@sai.msu.su

DUST-CORRECTED STAR FORMATION RATES IN GALAXIES WITH OUTER RINGS

I.KOSTIUK[1], O.SILCHENKO[2]

We have determined star formation rates, SFR, corrected for the intrinsic dust effect as well as the corrected SFR surface densities and absolute AB magnitudes in the ultraviolet, M_{AB}, for 34 early-type disk galaxies where outer rings are detected and where we have revealed UV-signal in the rings; the characteristics have been determined for the outer rings separately and for the galaxies as a whole. We have used the public data of the space telescopes GALEX (in the UV-bands

NUV and FUV) and WISE (in the NIR-band W4, 22 μm). The mean relative difference between the corrected SFR and Σ_{SFR}, measured in the bands NUV and FUV, is equal now only to 19.0%, so for statistical consideration we take the SFR values averaged over FUV and NUV estimates. We demonstrate the relations between the dust-corrected SFR characteristics, UV colours, the galaxy morphological type, absolute magnitude for the galaxies and its ring structure.

Key words: *galaxy evolution: structure of galaxies: spiral galaxies: lenticular galaxies: star formation: dust*

ЛИТЕРАТУРА

1. *I.P.Kostiuk, O.K.Silchenko*, Baltic Astronomy, **25**, 331, 2016.
2. *I.P.Kostiuk, O.K.Silchenko*, Astrophys. Bull., **70**, 280, 2015.
3. *S.Comerón, H.Salo, E.Laurikainen et al.*, Astron. Astrophys., **562**, 121, 2014.
4. *R.J.Buta, E.Athanassoula, A.Bosma et al.*, Astrophys. J. Suppl. Ser., **217**, 32, 2015.
5. *K.Sheth, M.Regan, J.L.Hinz et al.*, Publ. Astron. Soc. Pacif., **122**, 1397, 2010.
6. *C.-N.Hao, R.C.Kennicutt Jr., B.D.Johnson et al.*, Astrophys. J., **741**, 124, 2011.
7. *R.C.Kennicutt Jr., N.J.Evans II*, Ann. Rev. Astron. Astrophys., **50**, 531, 2012.
8. *E.E.Salpeter*, Astrophys. J., **121**, 161, 1955.
9. *E.L.Wright, P.R.M.Eisenhardt, A.Mainzer et al.*, Astron. J., **140**, 1868, 2010.
10. *C.Catalán-Torrecilla, A.Gil de Paz, A.Castillo-Morales et al.*, Astron. Astrophys., **584**, 87, 2015.
11. *W.A.Joye, E.Mandel*, ASP Conference Series, **295**, 489, 2003.
12. *A.Gil de Paz, S.Boissier, B.F.Madore et al.*, Astrophys. J. Suppl. Ser., **173**, 185, 2007.