

УДК 524.74-52

## ВНЕШНИЕ КОЛЬЦА В ДИСКОВЫХ ГАЛАКТИКАХ РАННИХ ТИПОВ

© 2015 И. П. Костюк<sup>1\*</sup>, О. К. Сильченко<sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>2</sup>Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

Поступила в редакцию 16 февраля 2015 года; принята в печать 11 июня 2015 года

В работе исследована частота встречаемости текущего звездообразования во внешних звездных кольцах дисковых галактик ранних типов по представительной выборке близких галактик из каталога ARRAKIS. Показано, что в регулярных кольцах текущее звездообразование, с возрастом звездного населения менее 200 млн лет, наблюдается примерно в половине случаев. В псевдокольцах (разомкнутых кольцах), которые встречаются только в спиральных галактиках, текущее звездообразование наблюдается практически всегда.

Ключевые слова: галактики: структура — галактики: звездообразование — галактики: эволюция — галактики: статистика

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Крупномасштабные звездные кольца в дисковых галактиках — довольно частый атрибут структуры. Воронцов-Вельяминов [1, 2] призывал рассматривать их как элемент морфологии, не менее важный, чем спирали или бары. Действительно, кольцевые структуры разного масштаба имеются у более половины дисковых галактик [3]. Эти структуры, как и спирали, могут быть регулярного гладкого вида, а могут быть клочковатыми и иррегулярными, могут иметь ядро галактики в своем геометрическом центре, а могут быть сдвинутыми относительно центра галактики [4]. Все эти особенности явно имеют эволюционный смысл и связаны с происхождением кольца. На сегодняшний день два самых популярных сценария происхождения кольцевых структур в галактиках — резонансный и импактный. В первом случае образование кольца связывают с присутствием бара в галактике: наличие неосесимметричного возмущения плотности (и, соответственно, гравитационного потенциала), которое вращается, как твердое тело, с постоянной вдоль радиуса диска угловой скоростью, приводит к динамическому выделению локализованных зон диска на определенном расстоянии от центра галактики, где вращение бара входит в резонанс с квазикруговым дифференциальным вращением газа. В областях Линдбладовских резонансов орбиты облаков сгущаются, газ уплотняется, и возникают условия для интенсивного, очень эффективного

звездообразования, в результате которого формируются радиальные уплотнения в распределении звезд — звездные кольца [5–8]. Модификацией резонансного механизма является теория трубок (the flux tube manifold theory) — устойчивых газовых орбит вокруг «точек равновесия» в трехосном (барном) потенциале [9]. Импактный механизм [4, 10–12] предполагает внешнее воздействие: считается, что особо контрастные кольца формируются как результат падения на диск галактики, вблизи ее центра, спутника с высоко наклоненной орбиты. Ударное воздействие приводит к раскачке плоскости диска в вертикальном направлении и порождает бегущую по диску галактики наружу кольцевую волну плотности. Если в диске есть газ, то начинается интенсивное звездообразование на расстоянии, где газ уплотнился до критической плотности, и в результате появляется импактное звездное кольцо. Однако и в случае чисто звездного диска импактное воздействие может породить транзитное, движущееся наружу по радиусу кольцо поверхностной плотности [13]. Надо отметить, что наиболее популярный резонансный механизм воздействует только на газ. Важно, что с динамической точки зрения газ представляет собой столкновительную систему, лишенную «упругости» звездной составляющей дисков. Газ не может преодолеть локализованные в местах резонансов области хаотических орбит. Он «застревает» и уплотняется на выделенном радиусе, а далее следует звездообразование, и газовое кольцо становится звездной структурой диска.

Третий вариант происхождения внешних коль-

\*E-mail: kostiuk@sao.ru

\*\*E-mail: sil@sai.msu.su

цевых структур в галактиках, который, как будет показано ниже, нам самим представляется наиболее вероятным, — натекание внешних колец из газовой компоненты соседней галактики в результате гравитационного приливного воздействия или из космологического филамента в ходе иерархического гравитационного сгущивания материи — пока не слишком популярен среди астрономического сообщества. Одно время он активно обсуждался в связи с открытием объекта Хоага (Hoag) [14], поскольку в этой галактике кольцо очень массивное, а в его центре располагается совершенно круглая (осесимметричная?) галактика раннего типа. Ни резонансный сценарий, ни импультное воздействие на предполагаемый собственный газовый диск галактики не дали бы такой экзотической конфигурации. Однако уже в обзоре [7] отмечалось, что других похожих на объект Хоага галактик не найдено, что практически везде внешнему кольцу сопутствует неосесимметричное искажение изофот в самом центре галактики, и был сделан вывод, что подавляющее большинство колец, по крайней мере видимым образом располагающихся в основной плоскости симметрии галактики, имеют резонансное происхождение.

Наблюдательная статистика кольцевых структур в галактиках имеет богатую историю. Много усилий было приложено Рональдом Бута [15–17], который, сравнивая метрические свойства колец и баров, собрал аргументы в пользу резонансного сценария для происхождения большинства рассмотренных им колец. Однако известны и многочисленные примеры присутствия колец, иногда двух-трех на разных радиусах, в галактиках без баров, и часто это галактики совершенно изолированные, без спутников и признаков взаимодействия. Сильченко и Моисеев [18] высказали убеждение, что сам факт присутствия колец в галактиках без баров и без следов столкновения с другой галактикой свидетельствует в пользу того, что вообще происхождение колец в галактиках может быть разнообразным, в том числе и аккреционным. Интересно, что вдоль хаббловской морфологической последовательности частота встречаемости баров и колец меняется в противофазе: при анализе морфологии в ближнем инфракрасном диапазоне на 2–4 мкм у совсем ранних типов дисковых галактик S0 бары встречаются значительно реже, чем даже у их ближайших соседей по классификации ранних спиральных типов Sa–Sb ( $46 \pm 6\%$  против  $64–93\%$  [19]), в то время как внешние кольцевые структуры, наоборот, есть у  $60\%$  S0-галактик и только у  $20\%$  Sb-галактик [3]. Большой каталог кольцевых структур в дисках, ARRAKIS [3], был недавно составлен по результатам морфологического обзора близких галактик со спутника Spitzer на длинах волн 3.6 и 4.5 мкм. Этот каталог,

несомненно, описывает чисто звездные структуры, поскольку на длинах волн около 4 мкм мы видим основную массу старого звездного населения. Поскольку все популярные модели связывают появление кольцевых структур с уплотнением газа и вспышкой звездообразования на определенном радиусе, интересно определить, насколько часто звездные кольцевые структуры в галактиках показывают признаки текущего звездообразования, особенно, если такого звездообразования нет в остальном диске (как это по определению имеет место в S0-галактиках). Обзор морфологии ближайших галактик в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне космическим телескопом GALEX предоставил необходимый наблюдательный материал для решения этой задачи [20]. В ближнем УФ диапазоне мы можем видеть только звездные населения моложе нескольких сотен миллионов лет. Таким образом, доля колец, видимых в ближнем УФ, по отношению к общему числу звездных колец дает нам примерную оценку времени жизни колец, или времени их диссипации. Такую работу недавно проделал Себастьян Комерон [21] для внутренних колец в галактиках: он взял выборку внутренних колец из каталога ARRAKIS и поискал их на картах GALEX и в данных узкополосной фотометрии в эмиссионной линии H $\alpha$ . Результат его анализа показал, что в галактиках ранних типов (S0–Sab) только  $21\% (\pm 3\%)$  колец не видны в УФ (правда, в далеком УФ, на  $1500 \text{ \AA}$ , что еще сокращает возраст наблюдаемого в этой полосе звездного населения). Соответственно, время диссипации внутренних колец в рамках гипотезы об их резонансном происхождении получается не менее 200 млн лет, что примерно соответствует времени одного орбитального оборота в центральной части галактики. В данной работе мы проделали похожий анализ наличия недавнего звездообразования для выборки внешних колец в дисковых галактиках ранних типов из каталога ARRAKIS.

## 2. СОСТАВЛЕНИЕ И АНАЛИЗ ВЫБОРКИ

Выборка галактик ранних морфологических типов, от S0 до Sb, у которых присутствует внешняя кольцеобразная структура, была создана на основе атласа и каталога ARRAKIS [3]. В этом атласе для классификации и описания галактик использовались изображения обзора S4G (The Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies [22]), которые находятся в открытом доступе. Выборка галактик в S4G имеет следующие ограничения: расстояние  $D < 40 \text{ Мpc}$ , галактическая широта  $|b| > 30^\circ$ , интегральная звездная величина, исправленная за поглощение в Галактике, за наклон диска к лучу зрения и за K-поправку,  $m_{B, \text{corr}} < 15.5$ , и угловой диаметр до 25-й изофоты в B больше одной минуты дуги. Внешняя кольцеобразная деталь

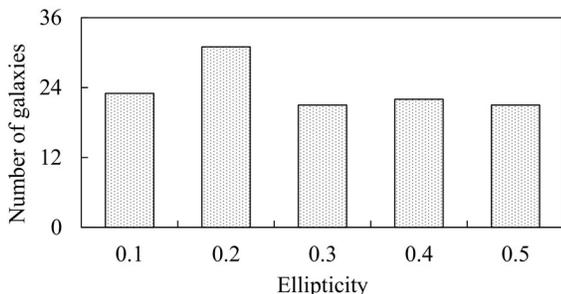


Рис. 1. Распределение выбранных кольцеобразных галактик по значению эллиптичности изофот.

в ARRAKIS, как и другие детали в этом каталоге, отождествлялась по остаточным изображениям, получавшимся в результате вычитания из инфракрасных изображений галактик модельного изображения, составленного из четырех компонент (ядро, балдж, диск, бар). Все галактики из S4G были подвергнуты такой конвейерной обработке (S4G pipeline 4, P4). Мы отобрали из ARRAKIS галактики, включенные в S4G, с наличием внешней кольцеобразной детали в виде колец типа R, RL, R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>. Далее эта группа колец будет рассматриваться вместе и обозначаться буквой R, и, соответственно, R' в случае псевдоколец. Ввиду небольшого количества отображенных объектов, более детального деления на подтипы (R, R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, RL) не проводилось. Основное различие колец и псевдоколец заключается в наличии у первых замкнутой внешней детали и провала в яркости между кольцеобразной деталью и более внутренней частью галактики. Если в ARRAKIS в галактике были указаны две внешних кольцеобразных структуры, то в настоящей работе учитывалась только самая внешняя из них. Как и в ARRAKIS, галактики из S4G с эллиптичностью изофот более 0.5 (диски, сильно наклоненные к лучу зрения) не включались в выборку из-за большой неопределенности в классификации. В S4G входит 2331 галактика, из них, по данным ARRAKIS, 277 галактик имеют внешнюю кольцеобразную деталь R или R' (для 18 из них отмечаются по две внешних кольцеобразных детали). После дополнительной селекции по морфологическому типу (202 галактики имеют морфологический тип S0–Sb) и по эллиптичности (менее 0.5) в нашей выборке осталось 145 галактик.

Отметим, что в работе [23] ранее приводился список 143 кольцеобразных галактик, визуально отображенных на фотографических копиях карт Паломарского обзора северного неба POSS. Если ввести дополнительные ограничения по размеру, больше 1', и галактической широте,  $|b| > 30^\circ$ , то остается 51 галактика. И всего 18 галактик

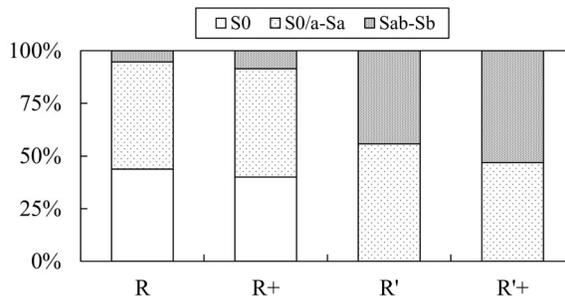


Рис. 2. Доля галактик различных морфологических типов (S0, S0/a–Sa, Sab–Sb) среди кольцеобразных галактик. R — кольцевые галактики, R+ — кольцевые галактики с УФ излучением в кольце, R' — псевдокольцевые галактики, R'+ — псевдокольцевые галактики с УФ излучением в кольце.

из списка [23] имеют лучевые скорости меньше  $3000 \text{ км с}^{-1}$ , из них 11 галактик включены в ARRAKIS. Мы полагаем, что визуальный отбор «проигрывает» конвейерной обработке, но в вышеуказанном списке есть очень интересные и не включенные в ARRAKIS галактики, детальное изучение которых нами планируется впоследствии.

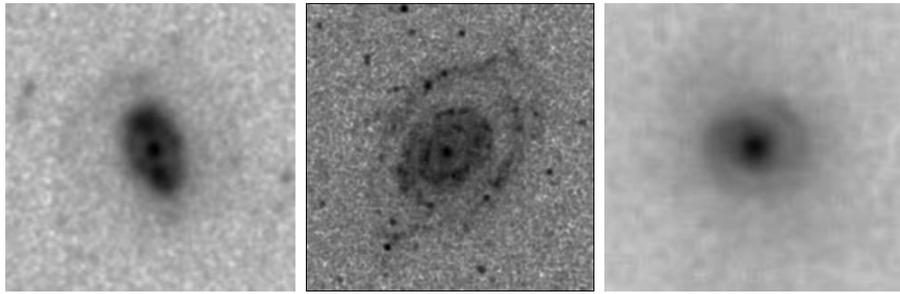
### 3. ТЕКУЩЕЕ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЕ ВО ВНЕШНИХ КОЛЬЦАХ

Все 145 галактик выборки были просмотрены в архиве изображений космического телескопа GALEX<sup>1</sup> в полосе ближнего УФ (NUV) 1770–2730 Å на картах интенсивностей. В ближнем УФ диапазоне светят относительно массивные звезды с возрастом до 200 млн лет [24, 25]. Данные для девяти галактик из списка отсутствуют в обзоре GALEX. Для 16 галактик на изображениях GALEX хорошо заметна спиральная структура за пределами внешнего кольца. Для двух галактик рядом расположены яркие объекты, которые не дают возможности провести отождествление кольцевой детали. Эти 18 галактик были исключены из нашей выборки.

Всего в списке для исследования УФ морфологии внешних колец в дисковых галактиках ранних типов осталось 118 галактик. На рис. 1 приводится распределение этих кольцеобразных галактик по величинам эллиптичности внешних изофот по данным из обзора S4G<sup>2</sup>. Это распределение является довольно однородным, и можно сказать, что селекции по наклону галактики (после исключения дисков, наклоненных под углом больше  $60^\circ$ ) нет. Доли различных морфологических типов среди

<sup>1</sup><http://galex.stsci.edu/GR6/>

<sup>2</sup><http://irsa.ipac.caltech.edu/data/SPITZER/S4G/>

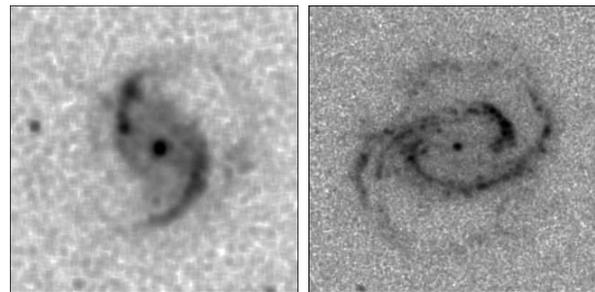


**Рис. 3.** Примеры изображений GALEX, фильтр NUV, для галактик с кольцевыми структурами R, которые соответствуют различным видам, отмеченным в последнем столбце таблицы 1. Левый рисунок: тип кольца 1 — незамкнутое (NGC 3380, поле 2'5); в центре: тип кольца 2 — клочковатое (IC 5267, поле 8'); справа: тип кольца 3 — заполненный диск (NGC 2681, поле 2').

кольцевых и псевдокольцевых галактик отличаются (рис. 2). Среди галактик с псевдокольцами, R', не встречается морфологический тип S0. У галактик с замкнутыми кольцами типа R, напротив, тип S0 доминирует, а доля морфологического типа Sab—Sb в несколько раз меньше, чем у галактик с псевдокольцами R'.

Наличие или отсутствие УФ потока во внешнем кольце галактик мы оценивали количественно, с учетом отношения сигнал/шум в накопленном телескопом GALEX изображении. На УФ изображение каждой галактики наносился эллипс с большой и малой осями  $D_r$  и  $d_r$  (по данным ARRAKIS). Они были получены при составлении каталога ARRAKIS из приближения эллипсом отмеченных вручную точек, принадлежащих кольцевой детали, на остаточном изображении диска. Внешние кольца в основном являются слабыми деталями в галактиках. Галактики, у которых в УФ заметно внешнее по отношению к кольцу продолжение диска без структуры, не исключались из нашей выборки. Для оценки яркости кольца в УФ изображение галактики из GALEX сглаживалось окном в 5–10 пикселей. Если среднее сглаженное значение отсчетов в пикселе в области кольцеобразной детали составляло два и больше значений окружающего фона, то галактика отмечалась нами как имеющая УФ излучение в своей внешней кольцеобразной детали.

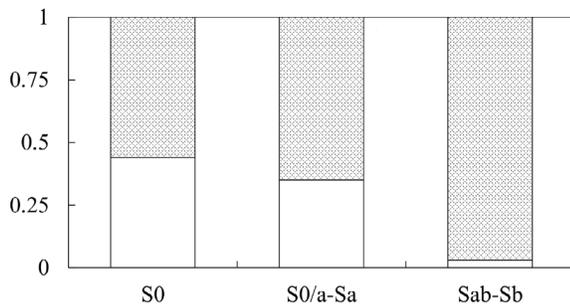
Наши оценки величин фона неба на картах интенсивности GALEX в окрестностях 117 галактик списка дают среднее значение  $0.00274 \text{ отсч. с}^{-1}$  в одном пикселе, что соответствует средней поверхностной яркости  $27^m 36/\square''$  в полосе NUV в системе AB. Значения фона неба около различных галактик изменяются в диапазоне  $0.0020\text{--}0.0042 \text{ отсч. с}^{-1}$ , стандартное выборочное отклонение равно  $0.00049 \text{ отсч. с}^{-1}$ . Одна галактика (NGC 1068) не включалась в выборку по оценке фона, так как только для нее одной из нашего списка значение фона неба составляет  $0.0070 \text{ отсч. с}^{-1}$ .



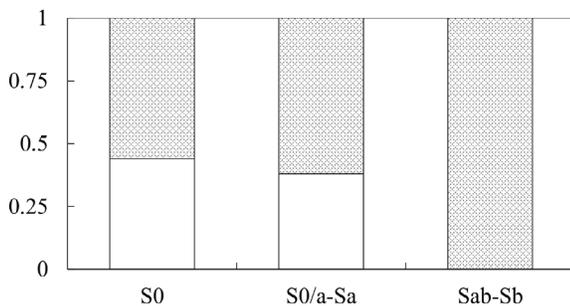
**Рис. 4.** Примеры изображений GALEX, фильтр NUV, для галактик с псевдокольцевыми структурами R', которые соответствуют различным видам, отмеченным в последнем столбце таблицы 1. Левый рисунок: тип кольца 1 — незамкнутое (NGC 986, поле 5'); справа: тип кольца 2 — клочковатое (NGC 1300, поле 8').

Для 36 галактик списка со слабыми (менее трех значений фона неба) кольцеобразными деталями среднее значение фона равно  $0.00278 \text{ отсч. с}^{-1}$  в одном пикселе при таком же диапазоне значений и стандартном отклонении, как указано выше для всей выборки. Это соответствует поверхностной яркости фона в фильтре NUV  $27^m 35/\square''$ .

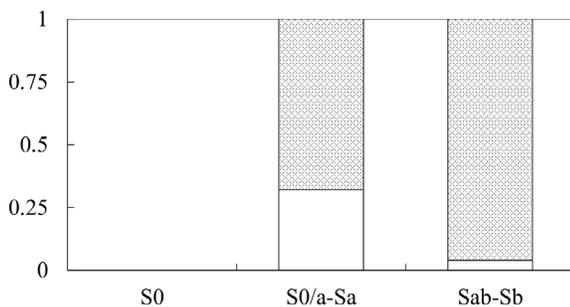
Список 118 галактик с внешней кольцеобразной структурой, исследованных нами, приведен в таблице 1. В таблице приводятся последовательно по столбцам: имя галактики; классификация галактики из ARRAKIS без детализации; большая и малая оси внешней кольцеобразной структуры  $D_r$  и  $d_r$  в угловых минутах (из ARRAKIS); большая  $2a$  и малая  $2b$  оси изофот диска галактики на уровне поверхностной яркости  $25^m/\square''$  в B-полосе (из каталога RC3 [26]); тип кольцеобразной структуры из ARRAKIS; наличие или отсутствие в кольцеобразной структуре УФ излучения в полосе NUV по данным GALEX (отмечается значком соответственно «+» или «-»); коэффициент  $k$  — приближенное усредненное значение УФ потока в кольце в одном пикселе в единицах окружающего фона по



**Рис. 5.** Доля галактик с УФ излучением в кольце (заштриховано) для разных морфологических типов среди всех кольцеобразных галактик  $R+R'$ . Общее число галактик  $R+R'$  в каждом морфологическом типе нормировано на единицу.



**Рис. 6.** Доля галактик с УФ излучением в кольце (заштриховано) для разных морфологических типов среди кольцевых галактик  $R$ . Общее число галактик  $R$  в каждом морфологическом типе нормировано на единицу.



**Рис. 7.** Доля галактик с УФ излучением в кольце (заштриховано) для разных морфологических типов среди псевдокольцевых галактик  $R'$ . Общее число галактик  $R'$  в каждом морфологическом типе нормировано на единицу. У S0-галактик псевдокольца нет.

данным GALEX (при  $k < 2$  в этом столбце ставился минус); примечания к виду кольцеобразной структуры в УФ: 1 — неполная, 2 — клочковатая, 3 — заполненный диск. Таким образом, галактика без примечаний и со знаком «+» в столбце 6 имеет видимую на всех позиционных углах довольно

однородную кольцеобразную структуру в УФ. На рис. 3 и 4 показаны примеры всех типов кольцеобразной структуры, отраженных в примечаниях таблицы 1.

В таблице 2 приводятся данные о количестве кольцеобразных галактик списка в зависимости от морфологического типа и наличия УФ излучения в кольце. В нашем списке всего 24 галактики без баров (тип SA, отмечен во втором столбце таблицы 1) и 94 галактики с барами (типы SB и SAB). Хотя галактик с барами и кольцами в четыре раза больше, чем галактик без баров и с кольцами, по данным в таблице 2 мы заключаем, что наличие бара в галактике не влияет на то, насколько часто в кольце галактики обнаруживается УФ излучение, то есть насколько часто в кольцах встречается текущее звездообразование. В дальнейшем обсуждении нами не проводилось деления галактик на галактики с баром и без бара.

На рис. 5–7 представлены гистограммы, на которых показаны доли галактик с УФ излучением в кольце (заштрихованная часть столбцов) среди всех кольцеобразных галактик  $R+R'$ , а также отдельно для кольцевых  $R$  и псевдокольцевых  $R'$  галактик среди разных морфологических типов. Для всех типов кольцеобразной структуры характерно увеличение такой доли при переходе от галактик S0 к Sb. Но даже в минимуме, для S0-галактик, она составляет 56% — около половины всех колец. Практически все спиральные галактики Sab–Sb (29 из 30) имеют УФ излучение в кольцеобразной детали.

Среднее отношение большой оси кольца  $D_r$  (третий столбец таблицы 1) по данным ARRAKIS к большой оси внешней изофоты диска галактики по данным RC3 (четвертый столбец таблицы 1) составляет 0.81 с дисперсией 0.25. В интервал отношений 0.6–1.0 попадает 70% галактик списка. Среди галактик списка с УФ излучением в кольцеобразной структуре (84 галактики) чаще встречается тип 2 (восьмой столбец в таблице 1, 61 галактика), то есть клочковатая структура, причем среди всех морфологических типов галактик. Среднее значение коэффициента  $k$  (седьмой столбец в таблице 1) равно 6, и оно увеличивается от S0 к Sb. Среди типов УФ колец, отмеченных в восьмом столбце таблицы 1, клочковатые кольца — тип 2 — имеют среднее значение коэффициента  $k$  почти в два раза больше, чем остальные типы.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Мы исследовали частоту встречаемости текущего звездообразования во внешних кольцах дисковых галактик ранних типов на материале достаточно представительной — более 100 объектов —

Таблица 1. Список дисковых галактик ранних типов с внешними кольцеобразными структурами (ARRAKIS)

Galaxy	Type (ARRAKIS)	Ring size (ARRAKIS), arcmin	Disk size (RC3), arcmin	Ring type (ARRAKIS)	Is UV present?	$k$	Comments
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
NGC 210	SABab	$4.08 \times 2.90$	$5.01 \times 3.31$	R <sub>2</sub> L	+	8	2
NGC 254	SAB0	$1.59 \times 1.25$	$2.46 \times 1.52$	R	-	-	-
NGC 474	SAB0/a	$2.23 \times 2.07$	$7.08 \times 6.30$	R'	-	-	-
NGC 615	SABa	$2.26 \times 0.70$	$3.63 \times 1.45$	R' <sub>2</sub>	+	4	2
NGC 691	SAab	$2.74 \times 1.93$	$3.47 \times 2.63$	R	+	3	2
NGC 718	SABa	$1.42 \times 1.09$	$2.34 \times 2.04$	R'	-	-	-
NGC 986	SBab	$3.52 \times 2.59$	$3.89 \times 2.96$	R'	+	10	1
NGC 1022	SAB0/a	$2.08 \times 1.66$	$2.40 \times 1.99$	RL	-	-	-
NGC 1068	SAa	$5.81 \times 4.89$	$7.08 \times 6.02$	R	+	2	2
NGC 1258	SABa:	$0.78 \times 0.35$	$1.35 \times 0.93$	R'	+	20	2
NGC 1291	SAB0	$8.47 \times 7.08$	$9.77 \times 8.11$	R	+	5	2
NGC 1300	SBb	$5.63 \times 4.90$	$6.17 \times 4.07$	R'	+	8	2
NGC 1326	SAB0	$2.83 \times 1.87$	$3.89 \times 2.88$	R <sub>1</sub>	+	5	2
ESO 548-23	SA0	$0.66 \times 0.35$	$1.05 \times 0.47$	RL	+	3	3
NGC 1350	SAB0/a	$5.35 \times 2.60$	$5.25 \times 2.83$	R	+	7	2
NGC 1357	SA0/a	$2.74 \times 2.20$	$2.81 \times 1.95$	R'L	-	-	-
NGC 1398	SBa	$4.64 \times 3.17$	$7.08 \times 5.38$	R	+	9	2
NGC 1433	SBa	$6.26 \times 4.48$	$6.46 \times 5.88$	R' <sub>1</sub>	+	3	1,2
NGC 1436	SABab	$1.59 \times 0.99$	$2.95 \times 2.01$	R'	+	16	2
NGC 1452	SB0/a	$2.54 \times 1.43$	$2.24 \times 1.48$	RL	-	-	-
IC 1993	SABab	$1.47 \times 1.44$	$2.46 \times 2.14$	R'	+	14	2
NGC 1533	SB0	$1.66 \times 1.43$	$2.76 \times 2.34$	RL	+	3	3
NGC 1566	SABb	$7.55 \times 6.34$	$8.32 \times 6.57$	R' <sub>1</sub>	+	6	2
NGC 1640	SBa	$1.74 \times 1.55$	$2.63 \times 2.05$	R'	+	6	2
NGC 1808	SABa	$6.38 \times 4.62$	$6.46 \times 3.87$	R <sub>1</sub>	+	3	1,2
NGC 2681	SAB0/a	$2.35 \times 2.13$	$3.63 \times 3.30$	R	+	3	3
NGC 2685	S0	$4.08 \times 1.80$	$4.47 \times 2.37$	R	-	-	-
NGC 2712	SABab	$2.73 \times 1.16$	$2.88 \times 1.59$	R'	+	3	2
NGC 2780	SBa	$0.67 \times 0.49$	$0.89 \times 0.66$	R'	+	8	3
NGC 2859	SAB0	$3.42 \times 2.73$	$4.26 \times 3.80$	R	+	2	-

Таблица 1. (Продолжение)

Galaxy	Type (ARRAKIS)	Ring size (ARRAKIS), arcmin	Disk size (RC3), arcmin	Ring type (ARRAKIS)	Is UV present?	$k$	Comments
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
NGC 2893	SAB0	0.87 × 0.69	1.12 × 1.02	RL	+	5	1, 2
NGC 2962	SAB0	2.13 × 1.42	2.63 × 1.95	R	+	4	2
NGC 3166	SB0	4.11 × 1.73	4.79 × 2.35	RL	+	2	3
NGC 3185	SABa	2.51 × 1.65	2.35 × 1.59	RL	–	–	–
NGC 3248	SA0	1.77 × 1.10	2.51 × 1.56	RL	–	–	–
NGC 3266	SB0	0.79 × 0.60	1.55 × 1.32	RL	–	–	–
NGC 3368	SAB0	5.94 × 3.57	7.58 × 5.23	RL	+	4	2
NGC 3380	SAB0/a	1.35 × 1.29	1.70 × 1.34	RL	+	2	1
NGC 3489	SB0	1.53 × 0.45	3.55 × 2.02	R	+	8	2
NGC 3504	SABa	2.03 × 1.89	2.69 × 2.10	R <sub>1</sub> '	+	6	2
NGC 3507	SABb	2.34 × 2.11	3.39 × 2.88	R'	+	8	2
NGC 3583	SABab	1.96 × 1.04	2.81 × 1.83	R'	+	13	2
NGC 3637	SB0	1.44 × 1.12	1.59 × 1.55	RL	–	–	–
NGC 3675	SAb	2.42 × 0.89	5.89 × 3.12	R'	+	10	2
IC 2764	SA0	0.84 × 0.70	1.62 × 1.41	R	+	6	2
NGC 3687	SABab	1.43 × 1.34	1.91 × 1.91	RL	+	6	2
NGC 3786	SA0/a	1.77 × 0.79	2.19 × 1.29	R	–	–	–
NGC 3892	SAB0	2.55 × 2.20	2.95 × 2.24	RL	–	–	–
NGC 3941	SB0	1.78 × 0.94	3.47 × 2.29	R	+	3	3
NGC 4045	SABab	1.91 × 0.95	2.69 × 1.86	R <sub>1</sub> 'L	+	4	2
NGC 4050	SABa	3.36 × 2.01	3.09 × 2.10	RL	–	–	–
NGC 4102	SABab	1.24 × 0.67	3.02 × 1.72	R'	+	20	2
IC 3102	SAB0/a	2.76 × 1.45	2.57 × 1.36	R'L	–	–	–
NGC 4245	SB0	2.65 × 1.89	2.88 × 2.19	RL	–	–	–
NGC 4286	SA0	0.78 × 0.55	1.59 × 1.00	RL	+	4	3
NGC 4314	SBa	3.72 × 3.03	4.17 × 3.71	R <sub>1</sub> '	–	–	–
NGC 4355	SAB0/a	0.97 × 0.49	1.45 × 0.71	R'L	+	2	3
NGC 4369	SB0/a	1.42 × 1.30	2.09 × 2.05	R	+	2	3
NGC 4378	SAa	2.93 × 2.45	2.88 × 2.68	R'	+	3	2, 3
NGC 4380	SAab	2.02 × 1.07	3.47 × 1.91	R	+	7	2, 3

Таблица 1. (Продолжение)

Galaxy	Type (ARRAKIS)	Ring size (ARRAKIS), arcmin	Disk size (RC3), arcmin	Ring type (ARRAKIS)	Is UV present?	$k$	Comments
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
NGC 4394	SB0/a	2.74 × 2.45	3.63 × 3.23	R	+	9	2
NGC 4405	SABa	1.05 × 0.66	1.78 × 1.16	R	+	3	3
NGC 4407	SBab	2.81 × 1.52	2.35 × 1.52	R'L	–	–	–
NGC 4424	SB0/a	3.18 × 1.53	3.63 × 1.82	R <sub>2</sub> L	–	–	–
NGC 4450	SABa	3.43 × 2.20	5.25 × 3.88	R'	+	3	2
NGC 4454	SAB0/a	2.00 × 1.83	2.00 × 1.70	RL	–	–	–
NGC 4457	SAB0	4.04 × 3.76	2.69 × 2.29	R	–	–	–
NGC 4579	SBa	4.33 × 3.10	5.89 × 4.65	RL	–	–	–
NGC 4580	SAa	1.86 × 1.26	2.09 × 1.63	R'	–	–	–
NGC 4593	SBa	3.54 × 2.51	3.89 × 2.88	R'	+	4	2
NGC 4596	SB0/a	3.40 × 2.66	3.98 × 2.95	RL	–	–	–
NGC 4639	SBab	2.36 × 1.38	2.76 × 1.87	R'	+	7	2
NGC 4659	SAB0	1.04 × 0.64	1.74 × 1.25	R	+	2	3
NGC 4691	S0/a	2.79 × 2.15	2.81 × 2.28	R'L	–	–	–
NGC 4698	SA0/a	7.91 × 2.73	3.98 × 2.47	R	+	2	–
NGC 4699	SB0/a	1.95 × 1.48	3.80 × 2.62	R'	+	7	2
NGC 4736	SABa	10.58 × 8.68	11.22 × 9.09	R	+	2	–
NGC 4750	SAa	1.52 × 1.33	2.04 × 1.86	R'	+	18	2
NGC 4772	SA0/a	3.85 × 1.93	3.38 × 1.69	R'	–	–	–
NGC 4795	SBa	1.38 × 1.13	1.86 × 1.58	R'	–	–	–
NGC 4800	SAa	1.22 × 0.97	1.58 × 1.17	R'	+	8	3
NGC 4826	SAa	7.17 × 3.10	10.00 × 5.40	R'	+	2	3
NGC 4856	SB0	2.44 × 0.65	4.26 × 1.19	RL	–	–	–
NGC 4880	SAB0	2.05 × 1.48	3.16 × 2.47	RL	–	–	–
NGC 4941	SA0/a	3.33 × 2.36	3.63 × 1.96	RL	+	2	1, 2
NGC 4984	SAB0/a	5.07 × 2.82	2.76 × 2.18	R'	–	–	–
IC 863	SBb	0.51 × 0.30	1.82 × 1.20	R'	+	4	3
IC 4214	SAB0/a	2.03 × 1.25	2.24 × 1.28	R <sub>1</sub>	+	3	2
NGC 5101	SB0/a	5.31 × 4.61	5.37 × 4.56	R <sub>2</sub>	+	2	2
NGC 5134	SAB0/a	3.53 × 2.99	2.76 × 1.65	R	–	–	–

Таблица 1. (Продолжение)

Galaxy	Type (ARRAKIS)	Ring size (ARRAKIS), arcmin	Disk size (RC3), arcmin	Ring type (ARRAKIS)	Is UV present?	$k$	Comments
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
NGC 5375	SBa	2.24 × 1.82	3.24 × 2.75	R'	+	4	2
NGC 5377	SAB0/a	4.05 × 2.03	3.72 × 2.08	R <sub>1</sub>	+	2	2
NGC 5534	SBa	1.21 × 0.83	1.41 × 0.83	R'L	+	6	2
NGC 5602	SA0	1.05 × 0.54	1.45 × 0.77	RL	–	–	–
NGC 5678	SAb	2.31 × 1.17	3.31 × 1.62	R'	+	6	2
NGC 5701	SB0/a	3.21 × 2.72	4.27 × 4.05	R' <sub>1</sub>	+	9	2
NGC 5713	SBab:	1.67 × 1.48	2.76 × 2.45	R'	+	2	3
NGC 5728	SB0/a	3.61 × 2.34	3.09 × 1.76	R <sub>1</sub>	–	–	–
NGC 5750	SAB0/a	2.70 × 1.30	3.02 × 1.60	RL	–	–	–
NGC 5757	SBab	1.35 × 1.19	2.00 × 1.62	R' <sub>2</sub>	+	3	2
NGC 5806	SABab	2.68 × 1.46	3.09 × 1.58	R'	+	2	2
NGC 5850	SBab	4.00 × 3.31	4.27 × 3.71	R'	+	2	2
NGC 5957	SBa	2.38 × 2.08	2.82 × 2.62	R'	+	3	2
NGC 6012	SBab	2.57 × 2.32	2.09 × 1.50	R'	+	4	2
NGC 6217	SBb	2.72 × 2.46	3.02 × 2.51	R'	+	3	1
NGC 6340	SA0/a	1.80 × 1.52	3.24 × 2.94	R	+	2	–
NGC 7051	SABb	1.12 × 0.97	1.32 × 1.09	R' <sub>2</sub>	+	2	1
NGC 7098	SAB0/a	3.63 × 2.26	4.07 × 2.65	R	+	3	2
NGC 7140	SABab	3.72 × 2.60	4.17 × 3.00	R'	+	2	2
NGC 7191	SABb	0.83 × 0.37	1.59 × 0.55	R'	+	8	2
NGC 7219	SABa	1.36 × 0.83	1.74 × 1.04	R' <sub>2</sub>	+	10	2
IC 1438	SAB0/a	1.77 × 1.32	2.40 × 2.04	R <sub>1</sub>	+	3	2
NGC 7421	SBab	1.68 × 1.54	2.04 × 1.82	R'	+	6	2
IC 5267	SA0/a	4.65 × 3.31	5.25 × 3.88	RL	+	3	2
NGC 7479	SBb	2.77 × 2.13	4.07 × 3.10	R'	+	20	2
NGC 7552	SBa	3.08 × 2.52	3.39 × 2.68	R' <sub>1</sub>	+	10	2
NGC 7724	SABa	0.88 × 0.54	1.45 × 1.00	R'	+	5	2
NGC 7731	SABa	1.09 × 0.85	1.41 × 1.12	R' <sub>2</sub>	+	2	2

**Таблица 2.** Распределение кольцеобразных галактик по типу кольцевой детали (R — кольца, R' — псевдокольца) и морфологическому типу галактики

Type	All			Among them, those having “+” in the UV column		
	R + R'	R	R'	R + R'	R	R'
S0	25	25	0	14 (56% ± 10%)	14 (56% ± 10%)	0
Among them, SB	19	19	0	11 (58% ± 11%)	11 (58% ± 11%)	0
Among them, SA	6	6	0	3 (50% ± 20%)	3 (50% ± 20%)	0
S0/a-Sa	63	29	34	41 (65% ± 6%)	18 (62% ± 9%)	23 (68% ± 8%)
Among them, SB	49	23	26	32 (65% ± 7%)	13 (56% ± 10%)	19 (73% ± 9%)
Among them, SA	14	6	8	9 (64% ± 13%)	5 (83% ± 15%)	4 (50% ± 18%)
Sab-Sb	30	3	27	29 (97% ± 3%)	3 (100%)	26 (96% ± 4%)
Among them, SB	26	1	25	25 (96% ± 4%)	1 (100%)	24 (96% ± 4%)
Among them, SA	4	2	2	4 (100%)	2 (100%)	2 (100%)
All	118	57	61	84 (71% ± 4%)	35 (61% ± 6%)	49 (80% ± 5%)
Among them, SB	94	43	51	68 (72% ± 5%)	25 (58% ± 6%)	43 (84% ± 5%)
Among them, SA	24	14	10	16 (67% ± 10%)	10 (71% ± 12%)	6 (60% ± 16%)

выборки из каталога ARRAKIS [3], содержащего список галактик со *старыми звездными* кольцами, отобранными по изображениям на 4 мкм. Оказалось, что регулярные звездные кольца S0-галактик примерно в половине случаев содержат молодые звезды, а псевдокольца спиральных галактик — практически всегда.

Хотя линзовидные галактики считаются (по определению этого морфологического типа) лишены крупномасштабного звездообразования в дисках, на самом деле при внимательном рассмотрении это оказывается не так. В 21% S0-галактик космический телескоп GALEX отмечает присутствие протяженного сигнала, то есть протяженных областей текущего звездообразования [27]. Интересна морфология этого протяженного звездообразования. Недавно Салим с соавторами [27] изучили выборку галактик ранних типов с ультрафиолетовыми избытками на космическом телескопе Hubble и построили УФ изображения с высоким пространственным разрешением. Тип морфологии УФ изображений разделился строго: в шести эллиптических галактиках оно оказалось сконцентрировано в небольшом объеме, тогда как в 15 из 17 S0-галактик отмечено протяженное звездообразование, и во всех 15 случаях морфология звездообразования — кольцевая. Кольца могут быть разного размера: для узких колец звездообразования в [27] получен средний радиус 6.5 кпк, для широких колец — 16–20 кпк. Есть еще

редкий морфологический подтип «диск с дырой» — но и это на самом деле кольца с большим внешним радиусом. Среди дисковых галактик ранних типов S0 и Sa, обладающих кольцами звездообразования, в выборке [27] оказалось примерно поровну галактик с барами (8 объектов) и без баров (11), так что резонансная природа большинства этих колец совершенно не очевидна. Надо сказать, что вывод о доминировании кольцевой морфологии в распределении областей звездообразования в линзовидных галактиках делался и ранее. Еще в 1993 г. Подж и Эскридж [28] отмечали, что при глубоком поиске H $\alpha$  эмиссии в дисках линзовидных галактик, богатых нейтральным водородом, в половине случаев действительно удается обнаружить звездообразование, и оно всегда организовано в кольца. Удивительным тогда показалось этим авторам, что присутствие или отсутствие звездообразования не связано с количеством топлива для звездообразования (количеством водорода), а что, вероятно, оно запускается каким-то (кинематическим?) «спусковым крючком», совершенно отличным от гравитационных неустойчивостей, управляющих звездообразованием в тонких дисках спиральных галактик поздних типов. Отдельные заявления о наличии звездообразовании во внешних кольцах, которые с точки зрения динамики газового компонента должны вроде бы быть устойчивыми против процессов фрагментации, поступали и по результатам детального исследования внешних колец в дисках

спиральных галактик ранних типов [29]. Самым естественным дополнительным механизмом запуска звездообразования в газе со *средней* плотностью ниже пороговой по Кенникату [30] было бы привлечение ударных волн. Это приводит нас к предположению об аккреции холодного газа извне, возможно, с наклонных орбит (чтобы обеспечить ударную волну сжатия в газе), как доминирующему механизму формирования регулярных внешних колец звездообразования в дисках галактик ранних типов, где поверхностная плотность газа, как известно (см., например, [31, 32]), значительно меньше, чем в галактиках поздних типов, и сама по себе, как правило, недостаточна для начала звездообразования. При этом само распределение нейтрального водорода в галактиках ранних типов (там, где нейтральный водород есть) оказывается намного более протяженным, чем в спиральных галактиках — регулярные структуры HI в S0 могут иметь до 200 кпк в диаметре [33]. В работе [34] по результатам многоцветной фотометрии было показано, что кольцеобразные галактики из списка [23] принадлежат к ранним морфологическим типам, что перекликается с выводами [3]. Однако при этом в [34] еще отмечалось, что галактики с кольцами имеют более протяженные звездные диски, чем галактики без колец, а это более сильное указание на достройку внешних частей дисков через стимулированное звездообразование во внешних кольцах в результате аккреции внешнего холодного газа.

Возможно, что внешние псевдокольца в спиральных галактиках ранних типов, где практически в 100% случаев идет звездообразование, генетически связаны с явлением так называемых XUV-дисков (eXtended UltraViolet disks [35, 36]), наблюдаемых примерно в 20–30% всех дисковых галактик ближней вселенной. Разомкнутые псевдокольца вполне могут быть спиральными волнами плотности с тугой закруткой, распространяющимися наружу в протяженный газовый диск из внутренних областей звездного диска. Это тоже ударные волны, способные стимулировать звездообразование в газовой среде низкой плотности [37, 38]. Впрочем, происхождение XUV-дисков, которые одинаково часто встречаются и у спиральных галактик поздних типов, и у массивных галактик, населяющих «красную последовательность» и «зеленую долину» [39], в последнее время также связывают с актами недавней аккреции внешнего холодного газа [36, 40, 41]. Так что и для внешних псевдоколец сценарий формирования через аккрецию холодного газа с высоким моментом вращения на периферию диска галактики остается самым привлекательным. Возможно, для этих структур более предпочтительной выглядит медленная, плавная аккреция

близко к плоскости симметрии галактического диска.

И наконец, о времени жизни колец со звездообразованием. При среднем возрасте звездного населения колец, обнаруженных в ближнем УФ диапазоне, менее 200 млн лет и периоде обращения внешних областей дисковых галактик, который равен примерно 800 млн лет и у гигантских, и у карликовых дисковых галактиках [42], ясно, что звездообразование в кольцах не выживает и одного периода. Это объясняет доминирование клочковатой морфологии колец в наших результатах (тип 2 в последней колонке таблицы 1) — звездообразование не успевает «размазаться» по полному азимутальному углу. Судя по тому, что примерно равное количество правильных колец показывает и не показывает сигнал в ближнем УФ, характерное время звездообразования в кольцах — менее 200 млн лет. Это согласуется с представлением об очень эффективном звездообразовании в кольцевых структурах. Например, для звездообразования в околядерных кольцах Корменди и Кенникат [43] тоже приводят характерную временную шкалу в несколько сотен миллионов лет и отмечают, что она намного короче типичной временной шкалы звездообразования в дисках спиральных галактик (в спиральных рукавах).

## БЛАГОДАРНОСТИ

В процессе работы мы использовали данные NASA/IPAC Extragalactic Database (NED) и космического телескопа Spitzer, управляемых Лабораторией реактивного движения Калифорнийского технологического института по контракту с NASA (США). Также некоторые данные (миссия NASA GALEX) были получены из архива MAST (Mikulski Archive for Space Telescopes), который поддерживается грантом NASA NNX09AF08G и другими грантами и контрактами. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-22-00041).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Б. А. Воронцов-Вельяминов, *Астрон. ж.* **37**, 381 (1960).
2. Б. А. Воронцов-Вельяминов, *Письма в АЖ* **2**, 520 (1976).
3. S. Comerón, H. Salo, E. Laurikainen, et al., *Astron. and Astrophys.* **562**, A121 (2014).
4. J. M. A. Few and B. F. Madore, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **222**, 673 (1986).
5. R. A. Schommer and W. T. Sullivan III, *Astrophys. Lett.* **17**, 191 (1976).
6. E. Athanassoula, A. Bosma, M. Creze, and M. P. Schwarz, *Astron. and Astrophys.* **107**, 101 (1982).

7. R. Buta and F. Combes, *Fundamentals of Cosmic Phys.* **17**, 95 (1996).
8. M. P. Schwarz, *Proc. Astron. Soc. Australia* **5**, 464 (1984).
9. M. Romero-Gómez, E. Athanassoula, J. J. Masdemont, and C. García-Gómez, *Astron. and Astrophys.* **472**, 63 (2007).
10. K. C. Freeman and G. de Vaucouleurs, *Astrophys. J.* **194**, 569 (1974).
11. J. C. Theys and E. A. Spiegel, *Astrophys. J.* **208**, 650 (1976).
12. E. Athanassoula, I. Puerari, and A. Bosma, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **286**, 284 (1997).
13. Y. T. Wu and I. G. Jiang, *Astrophys. J.* **745**, A105 (2012).
14. F. Schweizer, W. K. Ford Jr., R. Jedrzejewski, and R. Giovanelli, *Astrophys. J.* **320**, 454 (1987).
15. R. Buta, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **61**, 609 (1986).
16. R. Buta and D. A. Crocker, *Astron. J.* **105**, 1344 (1993).
17. R. Buta, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **105**, 654 (1995).
18. O. K. Sil'chenko and A. V. Moiseev, *Astron. J.* **131**, 1336 (2006).
19. E. Laurikainen, H. Salo, R. Buta, and J. H. Knapen, *Astrophys. J.* **692**, L34 (2009).
20. A. Gil de Paz, S. Boissier, B. F. Madore, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **173**, 185 (2007).
21. S. Comerón, *Astron. and Astrophys.* **555**, L4 (2013).
22. K. Sheth, M. Regan, J. L. Hinz, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **122**, 1397 (2010).
23. И. П. Костюк, *Сообщения САО* **13**, 45 (1975).
24. D. C. Martin, J. Fanson, D. Schiminovich, et al., *Astrophys. J.* **619**, L1 (2005).
25. R. C. Kennicutt Jr. and N. J. Evans II, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **50**, 531 (2012).
26. G. de Vaucouleurs, A. de Vaucouleurs, H. G. Corwin Jr., et al., *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies*, Vol. 1: *Explanations and References* (Springer, New York, 1991).
27. S. Salim, J. J. Fang, R. M. Rich, et al., *Astrophys. J.* **755**, A105 (2012).
28. R. W. Pogge and P. B. Eskridge, *Astron. J.* **106**, 1405 (1993).
29. E. Noordermeer, J. M. van der Hulst, R. Sancisi, et al., *Astron. and Astrophys.* **442**, 137 (2005).
30. R. C. Kennicutt Jr., *Astrophys. J.* **344**, 685 (1989).
31. T. Oosterloo, R. Morganti, and E. Sadler, *Publ. Astron. Soc. Australia* **16**, 28 (1999).
32. T. Oosterloo, R. Morganti, A. Crocker, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **409**, 500 (2010).
33. T. Oosterloo, R. Morganti, E. Sadler, et al., *Astron. and Astrophys.* **465**, 787 (2007).
34. V. L. Afanas'ev and I. P. Kostyuk, *Astrophysics* **29**, 531 (1988).
35. D. A. Thilker, L. Bianchi, G. Meurer, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **173**, 538 (2007).
36. J. J. Lemonias, D. Schiminovich, D. Thilker, et al., *Astrophys. J.* **733**, 74 (2011).
37. S. J. Bush, T. J. Cox, L. Hernquist, et al., *Astrophys. J.* **683**, L13 (2008).
38. S. J. Bush, T. J. Cox, C. C. Hayward, et al., *Astrophys. J.* **713**, 780 (2010).
39. A. J. Moffett, S. J. Kannappan, A. J. Baker, and S. Laine, *Astrophys. J.* **745**, A34 (2012).
40. K. R. Stewart, T. Kaufmann, J. S. Bullock, et al., *Astrophys. J.* **738**, A39 (2011).
41. B. W. Holwerda, N. Pirzkal, and J. S. Heiner, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **427**, 3159 (2012).
42. G. Meurer, D. Obreschkow, D. Hanish, et al., *American Astron. Soc. Meeting Abstracts*, No. 223, 410.01 (2014).
43. J. Kormendy and R. C. Kennicutt Jr., *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **42**, 603 (2004).

## Outer Rings of Early-Type Disk Galaxies

I. P. Kostiuk and O. K. Sil'chenko

We have studied the occurrence frequency of the current star formation in the outer stellar rings of early-type disk galaxies based on a representative sample of nearby galaxies from the ARRAKIS catalog. We show that regular rings reveal current star formation with a young stellar population age of less than 200 Myr in about half the cases, while in the pseudorings (open rings), which are only found in spiral galaxies, current star formation is present almost always.

Keywords: *galaxies: structure—galaxies: star formation—galaxies: evolution—galaxies: statistics*