АКТИВНЫЕ ЯДРА СРЕДИ ГАЛАКТИК С ПОЛЯРНЫМИ КОЛЬЦАМИ

© 2020 г. Д. В. Смирнов¹, В. П. Решетников^{1*}

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия Поступила в редакцию 11.05.2020 г. После доработки 20.06.2020 г.; принята к публикации 25.06.2020 г.

На основе данных обзора SDSS рассмотрен вопрос о встречаемости активных ядер среди галактик с полярными кольцами. Найдены свидетельства в пользу избытка сейфертовских галактик и лайнеров среди галактик с полярными кольцами по сравнению с обычными объектами. Наблюдаемая активность ядер галактик с полярными кольцами, возможно, связана с аккрецией газа из области полярных структур на центральные галактики.

Ключевые слова: галактики, активность ядер.

DOI: 10.31857/S0320010820080045

ВВЕДЕНИЕ

Галактики с полярными кольцами (ГПК) очень редкий класс внегалактических объектов. ГПК состоят из центральной галактики, окруженной примерно вдоль своей малой оси протяженным кольцом или диском. В дальнейшем мы будем использовать термин ГПК для обозначения класса объектов с околополярными структурами, не различая, как это иногда делается, полярные кольца и диски. Многочисленные примеры таких систем приведены в каталогах PRC (Polar-Ring Galaxy Catalogue, Вайтмо и др., 1990), SPRC (SDSSbased Polar Ring Catalogue, Моисеев и др., 2011) и в работе Решетникова и Мосенкова (2019) (далее PM2019).

У большинства ГПК центральные объекты являются бедными газом галактиками ранних типов (E/S0) (см., например, Вайтмо и др., 1987; Финкельман и др., 2012). Полярные структуры показывают вращение вокруг больших осей центральных галактик, они содержат звезды и газ, у них относительно голубые показатели цвета, есть признаки идущего звездообразования, газ в полярных структурах часто имеет субсолнечную металличность (Вайтмо и др., 1987; Решетников, Комб, 1994, 2015; Егоров, Моисеев, 2019, и пр.). Относительная доля ГПК среди близких галактик составляет ~ 10^{-3} (Решетников и др., 2011), и они избегают плотного пространственного окружения (Финкельман и др., 2012; Савченко, Решетников, 2017).

Для того чтобы объяснить присутствие в одном объекте двух крупномасштабных подсистем, выделенных морфологически и кинематически, чаще всего допускают, что ГПК образовались в два этапа. Сначала сформировалась центральная галактика, а затем за счет некоего "вторичного" события возникла полярная структура. Этим вторичным событием могло быть, например, слияние галактик с взаимно ортогональными дисками, захват на околополярную орбиту и разрушение спутника, захват вещества от сблизившейся галактики, аккреция вещества из межгалактического пространства (см., например, Бекки, 1997; Решетников, Сотникова, 1997; Бурно, Комб, 2003; Маччио и др., 2006; Брук и др., 2008).

Перечисленные выше процессы могли оставить определенные следы на периферии галактик в виде слабых протяженных структур (оболочек, приливных хвостов). С другой стороны, формирование полярных колец должно было сопровождаться аккрецией вещества на центральную галактику. Например, численные расчеты образования ГПК при слиянии эллиптической и спиральной галактик показывают, что 10-20% газа падает к центру сформировавшейся ГПК (Бурно, Комб, 2003). Эволюция полярных колец с учетом их взаимодействия с основными галактиками также может приводить к потере углового момента газа и его аккреции к центру (см., например, Вакаматсу, 1993).

Падение вещества на массивный центральный объект в центрах галактик является общепринятым механизмом нетепловой активности их ядер. Поэтому с учетом особенностей формирования и эволюции ГПК встает вопрос о встречаемости активных ядер среди ГПК. Этот вопрос до сих пор

^{*}Электронный адрес: v.reshetnikov@spbu.ru

| Выборка | Число ГПК | $\langle M_r \rangle$ | $\langle g-r angle$ | Итоговое число ГПК |
|-------------------|-----------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| SPRC (BCe) | 274 | -21.10 ± 1.21 | $+0.65\pm0.21$ | 176 |
| Лучшие кандидаты | 70 | -21.20 ± 0.77 | $+0.72\pm0.13$ | 45 |
| Хорошие кандидаты | 115 | -20.79 ± 1.36 | $+0.58\pm0.19$ | 81 |
| Связанные объекты | 52 | -21.43 ± 1.15 | $+0.71\pm0.28$ | 29 |
| Кольца плашмя | 37 | -21.36 ± 1.20 | $+0.66\pm0.23$ | 21 |
| PM2019 | 31 | -20.97 ± 1.01 | $+0.70\pm0.14$ | 7 |

Таблица 1. Выборки кандидатов в ГПК

остается почти неизученным (Решетников и др., 2001; Финкельман и др., 2012), что, по крайней мере отчасти, связано с малым числом известных ГПК. В последние годы появились новые выборки кандидатов в ГПК, отобранных в из обзора SDSS¹ (SPRC; PM2019), что позволяет рассмотреть эту проблему на большем, чем это было доступно ранее, материале.

Все числовые величины в статье приведены для космологической модели с постоянной Хаббла 70 км с⁻¹ Мпк⁻¹ и $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_{\Lambda} = 0.7$.

ВЫБОРКА ГАЛАКТИК

Для изучения активности ядер галактик с полярными кольцами мы рассмотрели объекты из двух работ, основанных на обзоре SDSS. Большая часть галактик нашей выборки была взята из каталога SPRC (Моисеев и др., 2011), в котором приведены данные для 275 кандидатов в ГПК. Эти кандидаты разбиты на 4 группы. 70 галактик отнесены к наилучшим кандидатам в ГПК, 115 — к хорошим кандидатам. В третью группу вошли 53 объекта, возможно, связанные с ГПК (галактики с сильными изгибами звездных дисков, взаимодействующие и сливающиеся галактики). Галактика SPRC-198 из этой группы, как оказалось, дублирует галактику SPRC-102, и поэтому в подклассе связанных с ГПК объектов мы оставили 52 объекта. Следовательно, общее число оригинальных объектов в SPRC составляет 274. Четвертая группа включает 37 кандидатов, у которых предполагаемые полярные структуры, возможно, видны в ориентации плашмя. Спектральные наблюдения объектов SPRC показывают, что большая часть первой группы (наилучшие кандидаты) являются кинематически-подтвержденными ГПК (Моисеев и др., 2011; Моисеев и др., 2015; Егоров, Моисеев, 2019). Работа РМ2019 может рассматриваться как дополнение к SPRC — в ней описывается

31 галактика из SDSS, морфологически подобная наилучшим кандидатам в каталоге SPRC.

В табл. 1 суммированы основные характеристики изучаемых выборок. Во втором столбце этой таблицы указано число объектов в соответствующей выборке, в третьем столбце приведены средние абсолютные звездные величины галактик в фильтре r, в четвертом — средние показатели цвета g - r. Абсолютные звездные величины и показатели цвета исправлены за поглощение в Галактике (Шлафли, Финкбейнер, 2011) и за k-поправку (Чилингарян и др., 2010).

Далее для выборок ГПК с помощью пакета ТОРСАТ (Тейлор, 2005) из SDSS были извлечены потоки для используемых в классификации эмиссионных линий (см. следующий раздел). При этом в выборках были оставлены только те галактики, у которых у всех эмиссионных линий отношение сигнал/шум превышало 3 (это же условие было использовано и при формировании выборок сравнения — см. далее). Это ограничение уменьшило размеры исходных выборок. В последнем столбце табл. 1 приведены итоговые числа объектов, использованных для классификации типов ядерной активности.

Для каждой из подгрупп ГПК в табл. 1 по данным SDSS (DR15, Агуадо и др., 2019) были построены выборки сравнения. Выборки были сформированы таким образом, чтобы распределения объектов в них по светимости, показателю цвета g - r и красному смещению были близки к наблюдаемым распределениям для ГПК (см. пример на рис. 1). Для этого из обзора SDSS случайным образом извлекались галактики в соответствии с плотностями вероятности, задаваемыми наблюдаемыми распределениями характеристик ГПК. Объемы выборок сравнения варьируются от примерно 17 тысяч для объектов, связанных с ГПК, до 55 тысяч для суммарной выборки ГПК.

Отметим, что мы рассматриваем ГПК как единые объекты, не выделяя отдельно вклад центральной галактики. Если это сделать, то при типичных

¹ https://www.sdss.org



Рис. 1. Распределения лучших кандидатов в ГПК (с добавлением объектов из РМ2019) по абсолютной звездной величине, показателю цвета g - r и красному смещению (непрерывная линия). Штриховой линией изображены соответствующие распределения для выборки сравнения.

параметрах ГПК (Решетников, Комб, 2015) поправки будут относительно невелики — абсолютные светимости галактик в фильтре r надо уменьшить в среднем на 0^{*m*},3, а показатель цвета g - rувеличить на 0^{*m*},03.

КЛАССИФИКАЦИЯ ГАЛАКТИК

Для классификации типов ядер ГПК мы использовали классические "ВРТ-диаграммы" (Балдвин и др., 1981), расширенные позднее другими авторами (см., например, Вейо, Остерброк,



Рис. 2. ВРТ-диаграммы для лучших кандидатов в ГПК (черные точки) и галактик из обзора SDSS (серые точки). Линиями показаны границы для разных типов активных ядер галактик, согласно Кьюли и др. (2006).

1987; Кьюли и др., 2001). На этих диаграммах для разделения объектов с разными источниками ионизации сравниваются отношения потоков эмиссионных линий [OIII] λ 5007/H β , [NII] λ 6583/H α , $[SII]/H\alpha$ (здесь и далее [SII] означает сумму потоков линий [SII] λ 6717+[SII] λ 6731) и [OI] λ 6300/Н α . Диаграмму [OIII] λ 5007/[OII] λ 3727 — [OI]/Н α мы не включили в рассмотрение, поскольку она не разделяет галактики со звездообразованием и галактики с составными ядрами (см. далее). Кроме того, ее включение уменьшает выборку ГПК. Наблюдаемые интенсивности линий ГПК и объектов выборок сравнения были исправлены за поглощение с использованием Бальмеровского декремента (истинное значение отношения $I(H\alpha)/I(H\beta)$ было принято равным 2.86, см. Остерброк, Ферланд, 2006) и кривой межзвездного поглощения Калцетти (1997).

На рис. 2 показаны диагностические ВРТдиаграммы для лучших кандидатов в ГПК (с учетом объектов из РМ2019) и для выборки сравнения из обзора SDSS. Штрихами на рисунке изображены линии, отделяющие области галактик со звездообразованием (они находятся ниже этих линий) от галактик с активными ядрами (они соответственно расположены выше). Отрезками прямых на диаграммах показаны граничные линии для разделения активных ядер на сейфертовские галактики (SyG) и лайнеры (LINÉR - Low-Ionization Narrow Emission-line Region). Галактики с составными ядрами, у которых спектры носят признаки ионизации как активным ядром, так и молодыми звездами, были отнесены нами, как это иногда делается, к активным ядрам (см., например, Хванг и др., 2012; Сабатер и др., 2013, 2015; Ким и др., 2020) С одной стороны, это было сделано для увеличения статистики. С другой стороны, на диагностических диаграммах другого типа составные ядра могут попадать в область активных ядер (см., например, Труи и др., 2011).

Характеристики демаркационных линий взяты из работы Кьюли и др. (2006). Аналогичным образом были построены ВРТ-диаграммы для всех указанных в табл. 1 выборок галактик. В дальнейшем мы принимаем, что галактика имеет активное ядро только в случае, если она была отнесена к активным ядрам на всех трех диагностических диаграммах.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты нашего анализа суммированы в табл. 2. Во втором столбце этой таблицы приведена доля активных ядер (в процентах) для данной подгруппы ГПК (в скобках указано число галактик с активными ядрами в этой подгруппе), в третьем —

| Выборка | ГПК | Выборка сравнения | |
|--------------------------------|---------------------|----------------------|--|
| Все ГПК | $26\% \pm 3\%~(48)$ | 25% | |
| Лучшие кандидаты + + РМ2019 | $50\% \pm 7\% (26)$ | 40% | |
| Хорошие кандидаты | $12\% \pm 4\%$ (10) | 16% | |
| Связанные объекты | $24\% \pm 8\%$ (7) | 29% | |
| Кольца плашмя | $24\% \pm 9\%$ (5) | 26% | |

Таблица 2. Встречаемость галактик с активными ядрами среди ГПК и галактик обзора SDSS

аналогичная доля для галактик соответствующей выборки сравнения. Указанные для выборок сравнения числа получены усреднением по 50 независимым реализациям этих выборок. Из-за большого объема выборок сравнения стандартные ошибки долей малы (~0.1%) и не приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что доли активных ядер для кандидатов в ГПК и для выборок сравнения сопоставимы. Небольшое превышение встречаемости активных ядер показывают только лучшие кандидаты, среди которых половина галактик имеют активные ядра, в то время как в выборке сравнения их около 40%. Ранее близкая оценка была получена для объектов каталога Вайтмо и др. (1990), правда по меньшей выборке ГПК и с менее однородными спектроскопическими данными (Решетников и др., 2001).

Рассмотрим статистику активных ядер среди лучших кандидатов в ГПК подробнее. По нашей классификации 6 галактик среди них могут быть отнесены к SyG ($11.5\% \pm 4.4\%$), 16 ($30.8\% \pm$ ± 6.4%) — к лайнерам и 4 (7.7% ± 3.7%) — к галактикам с составными ядрами. Соответствующие числа для выборки сравнения — 6.9, 23.0 и 9.8%. Отсюда видно, что в пределах бедной статистики доли составных ядер в обеих выборках сравнимы, в то время как число SyG и LINERs среди ГПК повышено. Отметим также, что отношение числа лайнеров к числу сейфертовских галактик среди ГПК составляет ~2.7, что близко к соответствующему отношению в выборке сравнения (~ 3.3). Примерно такое же соотношение LINERs и SyG получается и в работах других авторов, хотя оно может зависеть от разных факторов, включая, в частности, массу галактик (см., например, Кьюли и др., 2006; Сабатер и др., 2013).

На рис. 3 показаны зависимости долей активных ядер разных типов от интегральной светимости галактик. На рисунке хорошо заметен известный наблюдательный тренд — с ростом светимости (и

соответственно массы) галактик увеличивается доля активных ядер (Кауффман и др., 2003). Этот тренд прослеживается как для объектов выборки сравнения, так и для всех рассмотренных нами галактик из SDSS. На рис. 3 видно, что при $M_r \leq$ $< -20^{m}$ наблюдается примерно двукратное превышение долей активных ядер среди ГПК по сравнению с обычными галактиками той же светимости. Аналогичным образом мы сравнили встречаемость активных ядер в зависимости от показателя цвета галактики g-r. Результаты оказались менее наглядными, чем для их светимостей, но в целом у нормальных галактик наблюдается тенденция к увеличению доли активных ядер с ростом величины q-r. Как и в случае светимостей, у ГПК с $q-r \approx 1$ активные ядра встречаются относительно чаще, чем у обычных галактик с таким же показателем цвета.

Отметим, что наши результаты основаны на небольшой статистике ГПК и являются предварительными. В поддержку вывода об увеличенной доле активных ядер среди ГПК говорит то, что избыток сейфертовских галактик и лайнеров среди ГПК прослеживается почти по всем независимо рассмотренным интервалам светимости при $M_r \leq \leq -20^m$ (рис. 3).

Более простым способом выделить активные ядра среди ГПК является использование оригинальной классификации, приведенной в SDSS. Согласно данным SDSS, среди наилучших кандидатов в ГПК 9 галактик классифицируются как "AGN" или "QSO", что дает долю активных ядер $17 \pm 5\%$. В выборке сравнения таких галактик меньше — лишь $6.8\% \pm 0.2\%$. Отметим, что спектральная классификация в SDSS менее подробна, чем наша, и в ней нет разделения на сейфертовские галактики и лайнеры.

В табл. З приведены основные характеристики 6 галактик из SPRC и PM2019, которые, по нашим данным, могут быть отнесены к SyG, и в то же время они классифицированы как активные ядра и в SDSS. В первом столбце таблицы указано название галактики по SPRC или номер объекта, согласно табл. 1 в РМ2019. во втором — классификация спектра в SDSS, в третьем и четвертом абсолютная звездная величина и показатель цвета (Агуадо и др., 2019), исправленные за поглощение в Галактике, и k-поправку (Шлафли, Финкбейнер, 2011; Чилингарян и др., 2010). В следующих трех столбцах суммированы найденные нами по изображениям в фильтре *r* характеристики полярных образований: наблюдаемый угол между большими осями центральной галактики и полярной структуры ($\Delta P.A.$), диаметр (D_r), отношение диаметра полярной структуры к диаметру центральной галактики (D_r/D_h) . (У SPRC-258, относящейся к объектам с предположительно видимым почти плашмя



Рис. 3. Зависимость доли сейфертовских галактик (заполненные кружки) и лайнеров (открытые кружки) от абсолютной звездной величины галактики в фильтре *r* среди наилучших кандидатов в ГПК. Непрерывными линиями показаны зависимости для SyG по выборке сравнения (тонкая линия) и для всей выборки галактик из SDSS (толстая линия). Штриховыми линиями изображены зависимости для лайнеров по выборке сравнения (тонкая линия) и выборке всех SDSS галактик (толстая линия).

полярным кольцом, измерения $\Delta P.A$. не проводились.) Данные табл. З показывают, что по своим характеристикам ГПК с активными ядрами близки к обычным ярким ГПК (см. табл. 2 в РМ2019). Можно лишь отметить небольшой относительный размер полярных образований ($\langle D_r/D_h \rangle = 1.20 \pm \pm 0.34$) и их почти ортогональную ориентацию ($\langle 90^\circ - \Delta P.A. \rangle = 8^\circ \pm 5^\circ$). У большинства объектов из табл. З видны связанные с полярными кольцами пылевые полосы, что свидетельствует о наличии в них газа.

Вопрос о том, что может стимулировать нетепловую активность ядер галактик (локальное и глобальное окружение, гравитационное взаимодействие и слияния галактик, их вековая эволюция и пр.), до сих остается предметом дискуссий (см., например, Сабатер и др., 2013), и поэтому мы ограничимся лишь несколькими замечаниями.

Необходимым, но недостаточным условием для инициирования активности ядер является наличие холодного газа во внутренних областях галактик. Окружение галактик, их взаимодействие и слияния влияют на активность ядер косвенным образом, поставляя газ к центрам галактик, однако за транспортировкиу газа в непосредственную близость к черной дыре, по-видимому, отвечают другие механизмы (Рейхард и др., 2009; Сабатер и др., 2015).

У большинства ГПК бедная газом основная галактика окружена полярной структурой, которая, как правило, богата газом (ван Горком и др., 1987; ван Дриел и др., 2000). Можно предположить, что взаимодействие центральной галактики с этой структурой приводит к падению газа на центральную галактику. Признаки текущего взаимодействия газа полярного кольца и центральной галактики были обнаружены недавно в ряде ГПК (Егоров, Моисеев, 2019). Небольшой относительный размер полярных структур у галактик из табл. 3 не противоречит предположению о формировании на их внутренних границах ударных волн (Вакаматсу, 1993) и последующей аккреции вещества на галактики. Дальнейшее поведение этого газа и механизмы потери им углового момента пока остаются неизученными.

Объекты, родственные ГПК, — это так называемые галактики с внутренними полярными структурами (см. обзор Моисеева, 2012). В центральных областях таких объектов присутствует почти ортогональный к плоскости основной галактики звездно-газовый диск размером ~1 кпк. Внутренние полярные структуры встречаются чаще, чем внешние крупномасштабные полярные кольца. Согласно Сильченко (2016), они наблюдаются у ~10% S0-галактик в локальной Вселенной. Как и в случае ГПК, происхождение внутренних структур

| Галактика | SDSS тип | M_r | g-r | $\Delta P.A., ^{\circ}$ | D_r , кпк | D_r/D_h |
|--------------|----------|--------|------|-------------------------|-------------|-----------|
| SPRC-1 | QSO AGN | -22.01 | 0.80 | 82 | 16 | 0.83 |
| SPRC-90 | AGN | -21.55 | 0.71 | 86 | 37 | 1.53 |
| SPRC-156 | AGN | -20.66 | 0.73 | 73 | 19 | 0.80 |
| SPRC-161 | QSO | -20.54 | 0.80 | 84 | 15 | 1.53 |
| SPRC-258 | AGN | -21.83 | 0.61 | — | 30 | 1.42 |
| №14 (PM2019) | AGN | -20.86 | 0.75 | 85 | 18 | 1.07 |

Таблица 3. Кандидаты в сейфертовские галактики среди ГПК

связывают с внешней аккрецией вещества — например, с захватом и разрушением богатого газом карликового спутника (Сильченко и др., 2011). Тем самым в случае ГПК имеется внешний резервуар вещества, которое аккрецирует в околополярной плоскости на центральную галактику. В случае внутренних полярных структур такой резервуар, сформированный захваченным веществом, наблюдается непосредственно в околоядерной области галактик. Можно предположить, что среди галактик с внутренними полярными структурами также может наблюдаться много активных ядер. Просмотр NED^2 показал, что около трети галактик из списка Моисеева (2012) классифицируются этой базой данных как имеющие активные ядра, включая такие известные сейфертовские галактики, как NGC 1068 и NGC 3227. К сожалению, список известных галактик с внутренними полярными структурами пока очень неоднороден и отчасти случаен. Увеличение числа таких объектов и получение для них однородного спектрального материала позволит, в частности, рассмотреть возможную связь между формированием внутренних полярных структур и активностью ядер галактик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе приведенных в обзоре SDSS спектров рассмотрена встречаемость галактик с активными ядрами среди галактик с крупномасштабными оптическими полярными структурами. Анализ ВРТ-диаграмм, а также классификации типов ядер, опубликованной в SDSS, привел к выводу о возможном избытке активных ядер среди наилучших кандидатов в ГПК. Это заключение основано на пока еще относительно небольшом числе известных ГПК, и оно нуждается в дальнейшем подтверждении.

Детальное изучение и численное моделирование процессов взаимодействия полярных структур (как внешних, так и внутренних) с центральными галактиками могут дать полезную информацию о механизмах инициирования нетепловой активности ядер галактик.

Авторы благодарны рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению представления результатов.

Настоящее исследование основано на публичных данных обзора SDSS. Финансирование SDSS-IV осуществляется Фондом Альфреда П. Слоана, Управлением науки Министерства энергетики США и организациями-участниками коллаборации. SDSS выражает признательность за поддержку и ресурсы со стороны Центра высокопроизводительных вычислений Университета Юты. Beб-сайт SDSS www.sdss.org.

SDSS управляется Консорциумом астрофизических исследований организаций-участников Коллаборации SDSS, включающим Бразильскую группу участников, Научный институт Карнеги, Университет Карнеги-Меллона, Чилийскую группу участников, Французскую группу участников, Гарвард-Смитсонианский центр астрофизики, Канарский институт астрофизики, Университет Джона Хопкинса, Институт Кавли физики и математики Вселенной (ІРМU)/Токийский университет, Корейскую группу участников, Национальную лабораторию имени Лоуренса в Беркли, Институт астрофизики имени Лейбница в Потсдаме (AIP), Институт астрономии Макса Планка (МРІА), Институт астрофизики Макса Планка (МРА), Институт внеземной физики Макса Планка (МРЕ), Национальную астрономическую обсерваторию Китая, Университет штата Нью-Мексико, Университет Нью-Йорка, Университет университета Нотр-Дам, Национальную обсерваторию/МСТІ, Университет штата Огайо, Университет штата Пенсильвания, Астрономическую обсерваторию Шанхая, группу участников Соединенного Королевства, Национальный университет Мексики, Университет Аризоны, Университет Колорадо в

² NASA/IPAC Extragalactic Database — http://ned.ipac. caltech.edu

Боулдере, Оксфордский университет, Портсмутский университет, Университет Юты, Университет Вирджинии, Университет Вашингтона, Университет Висконсина, Университет Вандербильта и Йельский университет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Агуадо и др. (D.S. Aguado, R. Ahumada, A. Almeida, et al.), Astrophys. J. Suppl. Ser. **240**, 23 (2019).
- 2. Балдвин и др. (J.A. Baldwin, M.M. Phillips, and R. Terlevich), Publ. Astron. Soc. Pacif. **93**, 5 (1981).
- 3. Бекки (K. Bekki), Astrophys. J. 490, L37 (1997).
- 4. Брук и др. (Ch.B. Brook, F. Governato, Th. Quinn, J. Wadsley, A.M. Brooks, B. Willman, A. Stilp, and P. Jonsson), Astropiys. J. **689**, 678 (2008).
- 5. Бурно, Комб (F. Bournaud and F. Combes), Astron. Astrophys. **401**, 817 (2003).
- 6. Вайтмо и др. (В.С. Whitmore, D.B. McElroy, and F. Schweizer), Astrophys. J. **314**, 439 (1987).
- Вайтмо и др. (B.C. Whitmore, R.A. Lucas, D.B. McElroy, T.Y. Steinman-Cameron, P.D. Sackett, and R.P. Olling), Astron. J. 100, 1489 (1990).
- 8. Вакаматсу (К.-І. Wakamatsu), Astron. J. **105**, 1745 (1993).
- 9. Вейо, Остерброк (S. Veilleux and D.E. Osterbrock), Astrophys. J. Suppl. Ser. **63**, 295 (1987)
- 10. ван Горком и др. (J.H. van Grokom, P.L. Schechter, and J. Kristian), Astrophys. J. **314**, 457 (1987).
- 11. ван Дриел и др. (W. van Driel, M. Arnaboldi, F. Combes, and L.S. Sparke), Astron. Astrophys. Suppl. **141**, 385 (2000).
- 12. Егоров, Моисеев (О.V. Egorov and A.V. Moiseev), MNRAS **486**, 4186 (2019).
- 13. Калцетти (D. Calzetti), AIP Conf. Proc. **408**, 403 (1997).
- 14. Кауффман и др. (G. Kauffmann, T.M. Heckman, Ch. Tremoni, J. Brinchmann, S. Charlot, S.D.M. White, S.E. Ridgway, J. Brinkmann, et al.), MNRAS **346**, 1055 (2003).
- 15. Ким и др. (M. Kim, Y.-Y. Choi, and S.S. Kim), MNRAS **491**, 4045 (2020).
- 16. Кьюли и др. (L.J. Kewley, M.A. Dopita, R.S. Sutherland, C.A. Heisler, and J. Trevena), Astrophys. J. **556**, 121 (2001).
- 17. Кьюли и др. (L.J. Kewley, B. Groves, G. Kauffmann, T. Heckman), MNRAS **372**, 961 (2006).
- 18. Маччио и др. (A.V. Maccio, B. Moore, and J. Stadel), Astrophys. J. **636**, L25 (2006).
- 19. Моисеев А.В., Астрофиз. Бюлл. 67, 154 (2012).
- 20. Моисеев и др. (A.V. Moiseev, K.I. Smirnova, A.A. Smirnova, and V.P. Reshetnikov), MNRAS **418**, 244 (2011).

- 21. Моисеев и др. (A. Moiseev, S. Khoperskov, A. Khoperskov, K. Smirnova, A. Smirnova, A. Saburova, and V. Reshetnikov), Baltic Astron. 24, 76 (2015).
- 22. Остерброк, Ферланд (D.E. Osterbrock and G.J. Ferland), *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei* (2nd ed., Sausalito, CA: Univ. Sci. Books, (2006).
- 23. Рейхард и др. (Т.А. Reichard, Т.М. Heckman, G. Rudnick, J. Brinchmann, G. Kauffmann, and V. Wild), Astrophys. J. **691**, 1005 (2009).
- 24. Решетников, Комб (V.P. Reshetnikov, F. Combes), Astron. Astrophys. **291**, 57 (1994).
- 25. Решетников, Комб (V. Reshetnikov and F. Combes), MNRAS **447**, 2287 (2015).
- 26. Решетников, Мосенков (V.P. Reshetnikov and A.V. Mosenkov), Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 483, 1470 (2019).
- 27. Решетников, Сотникова (V. Reshetnikov and N. Sotnikova), Astron. Astrophys. **325**, 933 (1997).
- 28. Решетников и др. (V.P. Reshetnikov, M. Faúndez-Abans, and M. de Oliveira-Abans), MNRAS **322**, 689 (2001).
- Решетников В.П., Фаундез-Абанс М., де Оливейра-Абанс М., Письма в Астрон. журн. 37, 194 (2011) [V.P. Reshetnikov et al., Astron. Lett. 37, 171 (2011)].
- 30. Сабатер и др. (J. Sabater, P.N. Best, and M. Argudo-Fernández), MNRAS **430**, 638 (2013).
- 31. Сабатер и др. (J. Sabater, P.N. Best, and T.M. Heckman), MNRAS **447**, 110 (2015).
- 32. Савченко С.С., Решетников В.П., Письма в Астрон. журн. **43**, 170 (2017) [S.S. Savchenko and V.P. Reshetnikov, Astron. Lett. **43**, 146 (2017)].
- 33. Сильченко (О.К. Sil'chenko), Astron. J. **152**, 73 (2016).
- Сильченко и др. (О.К. Sil'chenko, I.V. Chilingarian, N.Ya. Sotnikova, and V.L. Afanasiev), MNRAS 414, 3645 (2011).
- 35. Тейлор (M.B. Taylor), ASP Conf. Ser. 347, 29 (2005).
- 36. Труи и др. (L. Trouille, A.J. Barger, and C. Tremoni), Astrophys. J. **742**, 46 (2011).
- 37. Финкельман и др. (I. Finkelman, J.G. Funes, and N. Brosch), MNRAS **422**, 2386 (2012).
- 38. Хванг и др. (H.S. Hwang, C. Park, D. Elbaz, and Y.-Y. Choi), Astron. Astrophys. **538**, A15 (2012).
- 39. Чилингарян и др. (I. Chilingarian, A.-L. Melchior, and I. Zolotukhin), MNRAS **405**, 1409 (2010).
- 40. Шлафли, Финкбейнер (E.F. Schlafly and D.P. Finkbeiner), Astrophys. J. **737**, 103 (2011).