

ПЕКУЛЯРНЫЕ ГАЛАКТИКИ

В. А. ЯКОВЛЕВА

Санкт-Петербургский государственный университет

THE PECULIAR GALAXIES

V. A. YAKOVLEVA

After familiarizing with the Hubble classification of galaxies the peculiar objects of that type are described, especially interacting galaxies and galaxies with polar rings. The properties of the latter ones are considered in detail.

После знакомства с хаббловской классификацией галактик описываются пекулярные объекты. Более детально рассматриваются свойства взаимодействующих галактик и галактик с полярными кольцами.

ВВЕДЕНИЕ

Еще в XVIII веке знаменитый астроном Вильям Гершель обнаружил объекты, непохожие на звезды, которые он назвал туманностями, и составил их каталог. Гершель установил, что туманности различаются как по цвету, так и по внешнему виду, и часть из них – это плотные скопления звезд.

В 1845 году лорд Росс закончил сооружение крупнейшего по тому времени 72-дюймового (180-см) телескопа и начал наблюдения туманностей из каталога Гершеля. Вскоре он обнаружил, что некоторые туманности разрешаются на звезды (звездные скопления нашей галактики), а туманность M51¹ имеет спиральную структуру. Затем он нашел и другие спиральные туманности.

Какова природа спиральных туманностей? В начале нашего столетия шел спор о том, расположены ли спиральные туманности во внешних частях нашей звездной системы (Галактики), или они являются самостоятельными звездными системами.

В 1924 году американский астроном Эдвин Хаббл нашел в районе спиральных ветвей переменные звезды определенного типа (цефеиды), по которым достаточно точно можно определить расстояние до туманности. Эти расстояния оказались столь велики, что не осталось сомнений в том, что спиральные туманности – это гигантские звездные системы, аналогичные нашей Галактике. Можно считать, что с того момента началась эра внегалактических исследований.

ХАББЛОВСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ГАЛАКТИК

Мир галактик весьма разнообразен, и, для того чтобы разобраться в нем, необходимо упорядочить наши знания. В 1925 году Хаббл предложил свою первую классификацию, в которой галактики по внешнему виду делятся на эллиптические (E), нормальные спирали (S), пересеченные спирали (SB) и неправильные (Irr). При попытке усовершенствования этой классификации были разработаны более сложные классификационные

¹ M51 – это номер по каталогу туманностей и звездных скоплений, составленному в конце XVIII столетия французским астрономом Ш. Мессье.

ФИЗИКА

схемы. Однако классификация Хаббла до сих пор широко используется. Основывается она только на морфологии галактик и никак не связана с их эволюцией, хотя сам Хаббл использовал термины “ранний” и “поздний” при описании спиральных подтипов галактик. На рис. 1 представлена несколько расширенная классификация Хаббла, опубликованная в 1961 году А. Сэндиджем в “Хаббловском атласе галактик”.

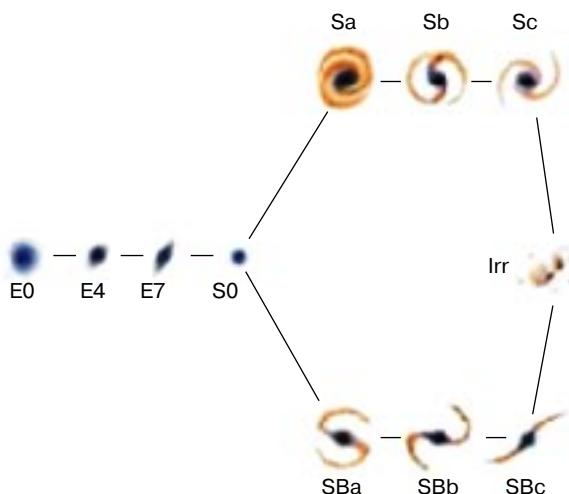


Рис. 1. Хаббловская классификация галактик

Примерно 25% всех изученных к настоящему времени галактик имеют сферическую или эллипсоидальную форму. Эллиптические галактики разделяются на подклассы в зависимости от их видимой сплюснутости. Всего имеется восемь подтипов от E0 до E7, где цифра есть целая часть выражения $10 \cdot (1 - b/a)$, а a и b – большая и малая оси соответственно. При этом следует помнить, что степень сжатия определяется как самой природой галактики, так и эффектом проекции, например галактики E0-типа могут быть истинно сферическими системами или сфероидальными, на которые мы смотрим вдоль большой (вытянутый эллипсоид) или малой (сплюснутый) оси.

По своей структуре эллиптические системы являются наиболее простыми, яркость в них плавно убывает от центра к краю. В них не обнаружено звезд высокой светимости (сверхгигантов), и самыми яркими являются красные звезды промежуточной светимости (гиганты). Дисперсии скоростей звезд, определяемые по значениям ширины линий поглощения, велики (порядка 200 км/с). Однако они определяются не систематическим вращением, а движениями индивидуальных звезд. Газовые и пылевые составляющие представлены слабо.

Размеры E-галактик меняются от гигантских звездных систем диаметром в сотни килопарсек¹, содержащих триллионы звезд, до карликовых эллиптических галактик размером порядка килопарсека, где число звезд меньше миллиона.

Самым распространенным классом галактик (50%) являются спиральные галактики, которые отличаются большим разнообразием структур. Наша Галактика и ее ближайший сосед, туманность Андромеды (M31), суть спиральные галактики.

Спиральные галактики состоят из плоских звездных дисков с экспоненциальным распределением яркости, спиральных ветвей (чаще всего двух), расположенных в плоскости диска и сферической составляющей с центральным уярчением, называемым балджем. При мерно у половины галактик рукава начинаются сразу же от ядра – это нормальные спирали S. Другую половину составляют SB-галактики, у которых ядро пересекается состоящей из звезд и межзвездной материи яркой перемычкой (баром), от концов которой начинают закручиваться спиральные ветви.

В зависимости от формы спиральных рукавов и размера центрального балджа спиральные галактики делятся на подтипы: Sa, Sb, Sc или SBa, SBb, SBc. К группе Sa и SBa относятся спиральные галактики со слабыми, тую закрученными спиральными ветвями и, как правило, мощным и ярким балджеем. Подтип Sb и SBb имеет более открытые спиральные ветви и меньший балдж. Галактики с сильно раскрытыми, довольно яркими, иногда ключковатыми спиральными и малым балджеем относятся к группе Sc или SBc. Наша Галактика и галактика M31 являются типичными SB-галактиками.

Сферическая составляющая спиральных галактик содержит старые звезды, которые двигаются по орбитам, хаотически ориентированным в пространстве.

Плоские диски типичных спиральных галактик богаты газом и пылью и содержат как молодые (обычно голубые), так и старые звезды. Некоторые спиральные системы, видимые с ребра, похожи на толстое или тонкое веретено, часто пересеченное темной полосой поглощающей материи. Если угол между лучом зрения и плоскостью галактики мал, то возникают трудности с классификацией галактики, однако наличие областей с молодыми звездами, газом и пылью свидетельствует о том, что галактика спиральная.

В спиральных ветвях наблюдается много ярких эмиссионных туманностей, свечение которых вызывается молодыми, недавно сформировавшимися звездами. Галактики Sc содержат больше межзвездного газа, чем Sa. Примерно 20% галактик относится к промежуточному

¹ Парсек – единица длины, принятая в астрономии (пк), 1 пк = 10^{18} см.

классу между эллиптическими и спиральными галактиками. Это линзовидные галактики (S0 или SB0), содержащие балдж и тонкий диск, но не имеющие спиральных ветвей. В отличие от эллиптических галактик у S0-галактик, видимых плашмя, падение яркости от центра менее сильное. Иногда в наружных частях линзы видны зачатки спиральных ветвей, перемычки и наружные кольца.

Еще около 5% составляют иррегулярные галактики, которые из-за своей неправильной формы не могут быть отнесены ни к одному из перечисленных типов. Иррегулярные галактики богаты межзвездной материи. Они делятся на два подкласса: IrrI и IrrII.

Наиболее распространенными являются галактики IrrI (типа Магеллановых облаков). Большое и Малое Магеллановы облака – это ближайшие спутники нашей Галактики, видимые в южном полушарии даже неооруженным глазом. Можно сказать, что это предельный случай спиральных систем. В этих довольно плоских звездных системах отсутствует центральное ядро, но возможно наличие следов спиральной структуры, свидетельствующей о вращении всей системы.

К неправильным галактикам второго типа относятся галактики, практически неразрешимые на звезды, у которых наряду с иррегулярностью формы наблюдаются и другие особенности: волокна, необычные показатели цвета и т.д. Часто необычный вид этих галактик наводит на мысль, что, вероятно, некоторые из них появились в результате близкого прохождения или даже столкновения двух нормальных систем.

Иррегулярные галактики, как правило, меньше спиральных, но больше карликовых эллиптических галактик. Они содержат от сотен миллионов до десятков миллиардов звезд. Количество карликовых эллиптических и карликовых неправильных галактик примерно одинаково, и они составляют большинство галактик во Вселенной. Часто они являются спутниками большой родительской галактики.

КАКАЯ ГАЛАКТИКА НАЗЫВАЕТСЯ ПЕКУЛЯРНОЙ

Полистав любой из атласов галактик, можно убедиться, что наряду с нормальными галактиками есть объекты особенные, не укладывающиеся в рамки приведенной выше классификации. Это могут быть как галактики, которые нельзя отнести к какому-либо из перечисленных типов, так и галактики, принадлежащие к определенному классу, но в то же время обладающие особенностями, не предусмотренными классификацией. Обычно при классификации подобных объектов к обозначению типа добавлялся индекс *r* (первая буква английского слова *peculiar*, что в переводе

означает “особенный”, “необычный”). Из сказанного выше следует, что не существует четкого определения понятия “пекулярная галактика”. Иногда отнесение галактики к пекулярному типу оспаривалось. Так, например, Б.А. Воронцов-Вельяминов считал, что взаимодействующие галактики не являются пекулярными, поскольку видимые изменения их формы вызваны возмущениями близких соседей. Однако среди взаимодействующих систем встречаются объекты столь причудливой формы, что их трудно не назвать пекулярными. Пекулярность галактики может выражаться в искажении узора спиральных рукавов из-за присутствия спутника, в наличии петель, волокон, струйных выбросов и всевозможных внутренних искажений (формы изофот, структуры пылевых полос и т.д.). Этот перечень особенностей далеко не полный.

Первый атлас пекулярных галактик был опубликован Арпом (H. Arp) в 1966 году [2]. Он содержит 338 прекрасных фотографий, полученных на крупнейших телескопах того времени, в том числе и на 5-метровом телескопе Паломарской обсерватории (США). На рис. 2 приведены четыре изображения галактик, включенных в этот атлас. Что же это за объекты? Рассмотрим каждый из них более подробно.

На рис. 2, *a* дано оптическое изображение эллиптической галактики NGC5128¹. Характерной особенностью, сразу бросающейся в глаза, является мощная

¹NGC – New General Catalog, каталог галактик и туманностей.

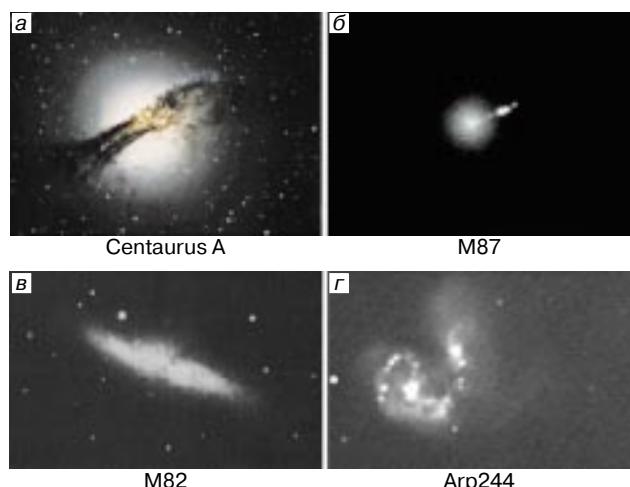


Рис. 2. Пекулярные галактики из атласа Арпа: *a* – мощная радиогалактика Центавр А, оптическое изображение получено на Англо-Австралийском телескопе; *б* – галактика M87 (Hubble Space Telescope (HST)); *в* – M82 – бывшая “взрывающаяся” галактика; *г* – известная взаимодействующая система “Антенны”

ФИЗИКА

темная полоса сложной структуры, пересекающая галактику. Этот факт удивителен, так как в нормальных эллиптических галактиках пыль отсутствует. Эта галактика является одной из ближайших радиогалактик (Центавр А). Распределение радиоизлучения показывает присутствие протяженного двойного радиоисточника, размеры которого во много раз превышают размеры оптической галактики.

На рис. 2, б приведено оптическое изображение эллиптической галактики M87. Самой заметной оптической деталью является яркий голубой выброс, исходящий из ядра. Следует отметить, что эта деталь хорошо видна лишь на снимках, сделанных с короткой экспозицией. На снимках с большой экспозицией выброс маскируется, и мы видим нормальную гигантскую эллиптическую галактику. В выбросе обнаружена большая поляризация, которая объясняется необычным механизмом его оптического излучения. Эта галактика – один из ярчайших членов хорошо известного скопления галактик в созвездии Девы. Кроме того, она является сильным радиоисточником со сложной структурой, известным под названием Дева А. Дева А была первой галактикой, у которой обнаружено рентгеновское излучение, причем и рентгеновское, и радиоизлучение переменны.

На рис. 2, в приведено изображение галактики M82. Мы видим веретенообразное тело, испещренное пылевыми включениями, с простирающейся вверх и вниз от диска галактики слабой волокнистой структурой. Характеристики спектральных линий в волокнистой структуре были интерпретированы как признаки взрыва в ядре галактики. С этой галактикой оказался связан дискретный радиоисточник. Была обнаружена высокая поляризация излучения, приписываемая необычному (синхротронному) излучению. Подобные факты возбудили интерес к этой галактике, и ее исследованию посвящены десятки, если не сотни работ, причем во многих из них о ней говорили как о взрывающейся. Однако сейчас страсти поутихли. Большой наблюдательный материал, накопленный за эти годы, позволил отнести идею о взрыве. Расширяющиеся оболочки объясняются как остатки вспышек сверхновых; поляризационные особенности связывают теперь с рассеянием излучения на пыли, которой в этой галактике довольно много.

Последнее изображение на этом рисунке (рис. 2, г) дает пример совершенно другого типа пекулярности. Хорошо видно главное тело в виде петли в туманной оболочке и выходящие из нее “усы”. Этот объект, часто называемый “Антенны”, представляет собой пару взаимодействующих галактик NGC4038–4039. Одно из возможных объяснений этой сложной структуры состоит в следующем: примерно 100 млн лет назад про-

изошло тесное сближение двух дисковых галактик, близких по размеру, при этом образовались приливные хвосты. В настоящее время мы наблюдаем повторное прохождение.

Продолжая листать атлас Арпа [2], мы видим, сколь причудлив и разнообразен мир галактик. Возникает вопрос: какие же процессы привели к образованию столь необычных форм? Для ответа на него нужно понять, как сформировались галактики и как они эволюционировали. Теория образования и эволюции галактик пока находится на ранней стадии развития. Однако за два последних десятилетия представления о том, что галактики эволюционируют в изоляции, существенно изменились.

ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИЕ ГАЛАКТИКИ

Среднее расстояние между объектами в скоплениях галактик невелико и всего лишь раз в десять превышает размер типичной галактики, поэтому столкновения между галактиками – частое событие. Расстояния между звездами в галактике велики по сравнению с размерами звезд, поэтому при столкновении галактик звезды одной галактики проходят не сталкиваясь со звездами другой.

Скорости галактик в малых группах низки, поэтому взаимодействие галактик ведет к их слиянию. В больших группах галактики двигаются быстрее, что препятствует их слиянию. При этом могут не только возникнуть отдельные особенности, но и измениться такие их фундаментальные характеристики, как морфологический тип.

К началу 80-х годов XX века был накоплен большой наблюдательный материал и получены результаты численного моделирования, свидетельствующие в пользу того, что столкновения галактик приводят к существенным изменениям их структуры: изменяется морфологический тип, звездные и межзвездные компоненты существенно перестраиваются, при этом усиливаются процессы звездообразования и активность ядер галактик. Некоторые исследователи утверждают, что столкновения в прошлом оказали сильное влияние на большинство галактик.

Последствия взаимодействия или слияния наблюдаются и у одиночных галактик. Например, есть галактики с двойными или кратными ядрами, слившиеся галактики с приливными хвостами, галактики с полярными кольцами и другие экзотические объекты.

Существует большое количество обзоров, посвященных наблюдательным и теоретическим аспектам взаимодействия. Сошлемся на один из них, опубликованный на русском языке [3].

На рис. 3 представлено несколько взаимодействующих систем. Три из них (изображения а, в и г), а также

NGC4038–4039 (см. рис. 2, *г*) являются хорошо известными взаимодействующими галактиками, которые различаются, по-видимому, лишь силой взаимодействия. Результаты численного моделирования показали, что приливные структуры в виде мостов и перемычек возникают при взаимодействии главного компонента с маломассивной галактикой. M51 (см. рис. 3, *а*) – хороший пример такого взаимодействия, хотя остается неясным, почему не наблюдается других признаков приливного взаимодействия у обоих компонентов. Возникновение хвостов имеет место при столкновении двух дисковых галактик, массы которых примерно равны.

Примерами подобных столкновений могут служить иррегулярная галактика NGC2207 (рис. 3, *г*), а также описанная раньше NGC4038–4039. В случае галактики “Колесо телеги” (рис. 3, *в*) центральная галактика взаимодействует с двумя маломассивными спутниками. Подобные структуры в виде расширяющихся колец могут возникать при прохождении компаний почти перпендикулярно плоскости центральной галактики. В зависимости от параметров столкновения возможны различные формы колец вплоть до открытых приливных спиралей.

На рис. 3, *б* представлена известнейшая группа галактик, получившая название “Квинтет Стефана”. У четырех галактик лучевые скорости близки, да и внеш-

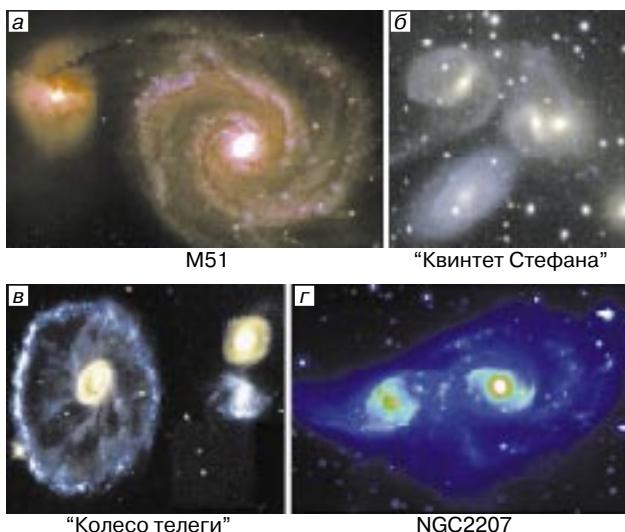


Рис. 3. Взаимодействующие галактики: *а* – M51 – пара взаимодействующих галактик (Канарские острова, телескоп Nordic); *б* – группа из пяти галактик “Квинтет Стефана” (Кит-Пик, телескоп 2,1 м); *в* – система из трех галактик “Колесо телеги” (HST); *г* – взаимодействующая галактика NGC2207 (Астрофизический ин-т им. М. Планка, телескоп 3,6 м)

ний вид этой группы не оставляет сомнений в тесном взаимодействии.

Мы рассмотрели лишь только некоторые примеры взаимодействия галактик. Совершенно незатронутыми оказались аспекты взаимодействия, связанные с процессами звездообразования и активностью ядер галактик. Эти проблемы заслуживают отдельного рассмотрения, а мы остановимся лишь на одном классе довольно редких пекулярных объектов, демонстрирующих признаки взаимодействия или слияния с другой галактикой, – галактиках с полярными кольцами.

ГАЛАКТИКИ С ПОЛЯРНЫМИ КОЛЬЦАМИ

По мнению многих астрономов, галактика NGC2685 (рис. 4, *а*) является пекулярнейшей из всех пекулярных. Главное тело этой галактики имеет веретенообразную форму. Примерно перпендикулярно большой оси галактики заметны темные полосы, которые продолжаются вне главного тела в виде светящихся колец. На глубоких снимках обнаруживается внешняя слабосветящаяся оболочка.

Совершенно неожиданными оказались результаты спектральных наблюдений. Наряду с вращением галактики вокруг малой оси, установленным по абсорбционным линиям, был обнаружен наклон эмиссионных линий при положении щели спектрографа вдоль

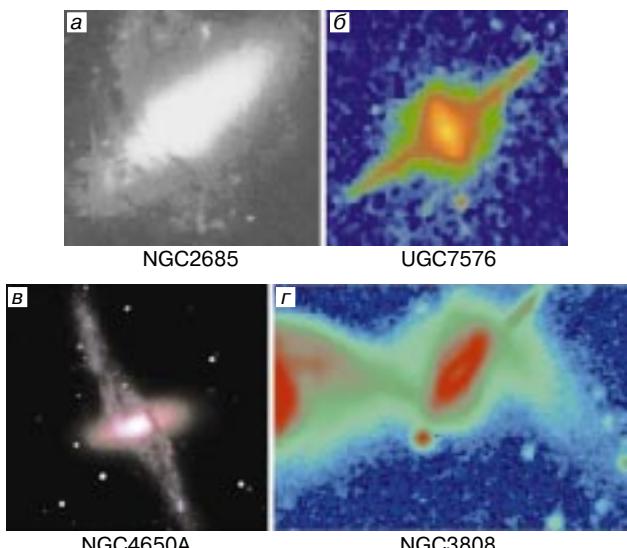


Рис. 4. Галактики с полярными кольцами: *а* – пекулярнейшая галактика NGC2685; *б* – классическая галактика с полярным кольцом UGC7576 (Специальная астрофизическая обсерватория РАН (САО), телескоп 6 м); *в* – NGC 4650A – одна из интереснейших галактик с полярным кольцом (Very Large Telescope (VLT), 8 м); *г* – NGC3808 – галактика с формирующимся кольцом (САО, 6 м)

ФИЗИКА

малой оси галактики, что указывает на вращение газовых масс вокруг большой оси галактики. Наличие двух кинематических систем, вращающихся в ортогональных плоскостях, казалось невероятным. Кроме того, наблюдения в линии нейтрального водорода на длине волны 21 см показали присутствие двух кинематических систем, одна из которых связана с системой полярных колец, а вторая – с протяженной внешней оболочкой.

В 80-х годах были обнаружены еще несколько объектов, похожих на NGC2685. Их объединили в новый класс, получивший название “Галактики с полярными кольцами” (ГПК). Как могли возникнуть галактики с двумя ортогональными кинематическими подсистемами? Устойчива ли подобная конфигурация? Как часто встречаются подобные объекты и каковы их основные характеристики? Для ответа на эти вопросы нужны были новые данные наблюдений и теоретические исследования. В конце 70-х годов XX века в обсерватории Ленинградского университета были начаты наблюдения галактики NGC2685, а позднее и других объектов из класса ГПК.

В результате наших исследований [4] и работ других астрономов было установлено, что главное тело NGC2685 – это нормальная галактика типа S0, видимая почти с ребра. Средние показатели цвета светящихся колец характерны для показателей цвета спиральных ветвей галактик позднего типа. Полярные кольца имеют множество структурных деталей, в том числе зоны ионизованного водорода, сопровождающие областям звездообразования. Светлые кольца, проектируясь на главное тело галактики, переходят в темные полосы. Наличие темных полос естественно объясняется присутствием в колцах пыли, которая экранирует излучение галактики. На присутствие пыли указывает и увеличение показателей цвета в области темных полос, и обнаружение поляризации излучения с направлением, совпадающим с направлением полос. Размер полярных колец меньше размера главного тела галактики, и по структуре (наблюдается несколько колец, лежащих в разных плоскостях) они отличаются от колец классических ГПК, для которых характерны геометрически тонкие, одиночные полярные кольца или диски (рис. 4, в, г).

Каковы сценарии образования ГПК? Рассматриваются несколько возможностей:

- 1) акреция вещества при сближении с межгалактическим облаком;
- 2) захват и погружение соседней карликовой галактики, богатой газом и пылью;
- 3) акреция части вещества слизившейся галактики вследствие приливного взаимодействия.

Для галактики NGC2685, скорее всего, подходит второй сценарий, а именно захват карликового спутника, хотя такое объяснение сталкивается с некоторыми трудностями. Что касается внешней слабосветящейся оболочки, то, вероятно, ее возраст больше полярного кольца и образовалась она либо в результате столкновения с межгалактическим облаком, либо сохранилась с эпохи формирования галактики.

На примере NGC2685 мы рассмотрели наиболее характерные черты класса ГПК. Особый интерес к ГПК вызван их необычной геометрией, позволяющей исследовать пространственную структуру гравитационного потенциала центральной галактики. Первый каталог ГПК, кандидатов в ГПК и связанных объектов [5] был опубликован в 1990 году, и в него вошли более 150 объектов, разбитые на четыре группы.

К категории А были отнесены всего лишь шесть галактик, для которых к моменту составления каталога имелись спектральные свидетельства присутствия двух ортогональных кинематических систем. Светящееся полярное кольцо является плоским образованием, размер которого сравним с размером главной S0-галактики. В настоящее время еще четыре объекта могут быть отнесены к этой группе. Два изображения классических ГПК приведены на рис. 4, б, в.

Группу В составили так называемые хорошие кандидаты. Мы видим галактики в проекции на картинную плоскость, и из-за ориентации центральной S0-галактики и ориентации полярного кольца в пространстве в некоторых случаях внешний вид ГПК может совпасть с внешним видом нормальных галактик, например со спиральными галактиками, видимыми с ребра. Окончательное заключение о принадлежности галактик этой группы к ГПК должны дать сведения о кинематике, которые можно получить из спектральных наблюдений.

К группам С и D относятся возможные кандидаты и галактики с особенностями, которые можно объяснить наличием полярных колец, невидимых по каким-то причинам.

Рассмотрим еще два примера галактик из каталога ГПК. Галактика NGC3808 В (рис. 4, г) является галактикой с формирующимся полярным кольцом. Это один из компонентов взаимодействующей системы. По внешнему виду эта система напоминает M51, рассмотренную нами ранее. Спиральная ветвь от главного компонента взаимодействующей системы обвивается вокруг компаньона. В результате перетекания вещества мы наблюдаем формирование полярного кольца. Наши спектральные наблюдения показывают, что главное тело галактики вращается вокруг малой, в то время как материя обвивающей ветви вращается вокруг большой оси галактики, как в случае классических ГПК.

ФИЗИКА

Другая галактика – NGC2748 была включена в группу С каталога ГПК. Наши фотометрические и спектральные наблюдения показали, что она является спиральной галактикой позднего типа. Диффузные образования, вытянутые вдоль малой оси, и другие особенности являются результатом аккреции на нормальную галактику богатого газом карликового спутника. Эта галактика является членом группы из 11 галактик, что не противоречит предположению о захвате спутника. Галактику NGC2748 можно назвать галактикой с несостоявшимся полярным кольцом. По-видимому, условия взаимодействия галактик не позволили сформироваться устойчивому кольцевому образованию в полярной плоскости главной галактики.

ГПК – редкие объекты. Согласно данным каталога [5], полярные кольца наблюдаются всего лишь у 0,5% галактик типа S0. Как уже отмечалось, предполагается, что возникновение их связано с взаимодействием или даже слиянием галактик. Подтверждением этого предположения являются результаты численного моделирования. Рассматриваются разные модели. Например, было рассчитано взаимодействие галактики, богатой газом, с галактикой раннего типа (S0), в результате которого у последней возникло полярное кольцо [3]. Однако пока еще результаты модельных расчетов не могут объяснить всего многообразия наблюдаемых фактов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chaisson E., McMillan St. // *Astronomy Today*. Apper Saddle River (N.J.): Prentice Hall, 1997. 623 p.
2. Arp H. *Atlas of Peculiar Galaxies* // *Astrophys. J.* 1966. Supp. № 123. P. 1–20.
3. Решетников В.П., Сотникова Н.Я. Взаимодействующие галактики: наблюдения и теоретические аспекты // Астрофизика. 1993. Т. 36, вып. 3. С. 435–490.
4. Макаров В.В., Решетников В.П., Яковлева В.А. Детальная фотометрия галактики с полярными кольцами NGC2685 // Там же. 1989. Т. 30, вып. 1. С. 15–26.
5. Whitmore B.C., Lucas R.A., McElroy D.B. et al. New Observation and a Photographic Atlas of Polar-Ring Galaxies // *Astron. J.* 1990. Vol. 100. P. 1489–1522.

Рецензент статьи А.В. Засов

Валерия Александровна Яковлева, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры астрофизики математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного университета. Область научных интересов – внегалактическая астрономия, активные и пекулярные галактики. Автор более 40 научных работ.