

## 11.2. Основные характеристики галактик

Идея о том, что наша Галактика имеет конечные размеры, и существуют другие сходные с ней звездные острова, высказывалась учеными и философами еще в середине XVIII в. (Э. Сведенборг в Швеции, И. Кант в Германии, Т. Райт в Англии). Естественно было предположить, что такими «внешними» галактиками являются светлые туманные пятна низкой яркости с размытыми очертаниями, которые во все возрастающем количестве открывались астрономами по мере увеличения размеров используемых ими телескопов. Первый список (каталог) обнаруженных туманностей содержал координаты более чем ста объектов (Ш. Мессье, Франция, 1781 г.). Позднее, в конце XIX в. выяснилось, что природа этих туманностей не одинакова, некоторые из них оказались газовыми облаками, некоторые разделялись (разрешались) на звезды при телескопических наблюдениях, но в большинстве случаев звезды были не различимы.

В середине XIX в. была впервые обнаружена спиральная структура туманностей (лорд Росс, Великобритания). Однако внегалактическая природа туманностей, не разделявшихся на звезды, долгое время оставалась неочевидной, и, поскольку расстояние до них было неизвестным, нельзя было исключить того, что перед нами просто далекие звездные скопления. На помощь пришла фотография, давшая возможность документально фиксировать вид галактик.

В начале XX в. с помощью новых больших телескопов обсерватории Маунт Вильсон (США) впервые удалось обнаружить изображения очень слабых звезд на фотографиях нескольких туманностей, но поскольку тип и светимость этих звезд была неизвестной, проблема расстояния оставалась. В 1923–1924 гг. американский астроном Э. Хаббл на 2,5-метровом телескопе этой обсерватории нашел в нескольких туманностях знакомый тип звезд высокой светимости — цефеид, регулярно меняющих свой блеск. Расстояние до цефеид уже умели определять по зависимости периода изменения их яркости от средней светимости (глава 6).

Полученные оценки расстояний убедительно показали, что эти звездные системы действительно находятся далеко за пределами нашей Галактики. С этого времени стало возможным говорить об открытии галактик.

В 1929 г. Эдвин Хаббл обнаружил существование линейной зависимости между скоростями удаления от нас галактик и расстоянием до них, которое он измерял по видимым звездным величинам

ярчайших звезд. Эта зависимость, впоследствии подтвержденная по большому числу галактик, отражает происходящее расширение Вселенной, при котором средние расстояния между галактиками непрерывно возрастают со временем. Зависимость Хаббла имеет простой вид:  $D = V_r/H_0$ , где  $D$  — расстояние,  $V_r = c\Delta\lambda/\lambda$  — доплеровская (лучевая) скорость системы, а  $H_0$  — постоянная Хаббла, современные оценки которой составляют 70–75 км/(с·Мпк). Это соотношение известно как закон Хаббла, и оно положено в основу наиболее часто используемого метода определения расстояний до галактик. В научных работах, как правило, указывают, к какому значению  $H_0$  привязаны расстояния.

Отдельную проблему представляет определение расстояний до наиболее близких галактик (в пределах нескольких мегапарсек). Скорости их собственных движений, имеющие случайный характер, оказываются сопоставимыми с «хаббловскими» скоростями, что «зашумляет» зависимость Хаббла, особенно если галактики образуют гравитационно связанные группы, не подверженные космологическому расширению. В этом случае расстояния оцениваются по отдельным объектам: чаще всего по ярчайшим звездам (цефеидам, голубым сверхгигантам или красным гигантам) или ярчайшим шаровым скоплениям.

Расстояния, определяемые по отдельным объектам внутри галактик, используются также и для калибровки зависимости Хаббла, то есть для определения  $H_0$ . Но для многих сравнительно близких галактик, скорость удаления которых не превышает нескольких сотен километров в секунду, оценка расстояния до сих пор остается неуверенной.

Галактики являются системами более высокого порядка по сравнению со звездными скоплениями, входящими в их состав. Они отличаются от скоплений в тысячи раз большими размерами, и хотя минимальная масса наблюдаемых карликовых галактик близка к максимальной массе шаровых скоплений, средняя плотность звезд в галактиках на несколько порядков ниже, чем в этих скоплениях.

Основные наблюдаемые составляющие галактик включают:

- 1) нормальные звезды различных масс и возрастов, часть которых объединена в звездные скопления;
- 2) компактные остатки проэволюционировавших звезд (белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры звездных масс);

3) холодная газопылевая среда, пронизываемая крупномасштабным магнитным полем (атомарный и молекулярный газ, области ионизованного газа, межзвездная пыль), и, наконец,

4) наиболее разреженный горячий газ с температурой  $10^5 - 10^6$  К, который может заполнять существенную долю всего объема галактики.

Характерная светимость галактик в различных областях спектра и основные источники излучения приведены в таблице 11.1 (светимость в оптическом диапазоне принята за единицу). Светимость галактик с наиболее активными ядрами может быть более чем на порядок выше указанной в таблице за счет излучения ядра и прилегающих к нему областей.

Гамма и рентгеновское излучение не проходит сквозь атмосферу, и исследуется с использованием космических обсерваторий. То же относится и к далекому ИК излучению, хотя в отдельных спектральных интервалах, сильно ослабленное атмосферой, оно все же может наблюдаться и с Земли.

Звезды и газопылевая среда состоят из атомов, и их совокупность называют барионной составляющей галактик. Однако галактики включают в себя и иную материю, не проявляющую себя по излучению. Это так называемая темная, или скрытая масса, преобладающая на периферии галактик, а также сверхмассивные черные дыры с массами от нескольких сотен тысяч до нескольких миллиардов  $M_{\odot}$  в ядрах галактик.

Следует подчеркнуть, что физические параметры галактик, получаемые из наблюдений, зависят от принятого расстояния или принятой постоянной Хаббла:

- оценка светимости  $L$  пропорциональна  $D^2$  или  $H_0^{-2}$ ;
- оценка линейного размера  $d$  пропорциональна  $D$  или  $H_0^{-1}$ ;
- оценка массы галактики  $M$ , определяемая по динамике звезд или газа, пропорциональна  $D$  или  $H_0^{-1}$ ;
- оценка массы газа  $M_{gas}$  по его излучению пропорциональна  $D^2$  или  $H_0^{-2}$ ;
- оценка периода вращения  $T$  пропорциональна  $D$  или  $H_0^{-1}$ ;
- оценка скорости внутренних движений  $V$  не зависит от  $D$  или  $H_0$ .

Большинство других величин, характеризующих галактики, определяется комбинацией перечисленных. Например, поверхностная яркость диска пропорциональна  $L/d^2$  и поэтому не зависит от принятого расстояния (на очень больших расстояниях поверхностная

Таблица 11.1. Основные источники излучения в галактиках по отношению к оптической светимости

Диапазон	Относительная светимость	Основные источники излучения
Гамма	$< 10^{-4}$	Активные ядра нек. галактик; источники, дающие одиночные короткие всплески излучения, по-видимому, связанные с компактными звездами (нейтронными звездами, черными дырами)
Рентген	$10^{-3} \div 10^{-4}$	Аккреционные диски тесных двойных звездных систем; горячий газ, иногда заполняющий большую часть объема галактики; активные ядра
Оптика	1	Звезды различной температуры: (ОВ-сверхгиганты и горячие звезды горизонтальной ветви — в голубой и УФ-области, звезды типа Солнца — в видимом диапазоне; сверхгиганты, гиганты и карлики классов К-М — в красной и ближней ИК-области); околозвездные пылевые диски — в ближней ИК области; эмиссионное излучение газа в областях НII — от УФ до ИК
Далекый ИК (FIR)	$0.5 \div 2$	Межзвездная пыль, нагретая светом звезд (гл. обр. в областях звездообразования); в нек. галактиках — активные ядра и пыль, содержащаяся в околядерных дисках, охваченных звездообразованием
Радио	$10^{-2} \div 10^{-4}$ (для радиогалактик $10^{-3} \div 1$ )	Синхротронное излучение релятивистских электронов, рождающихся в галактическом диске или в активном ядре галактики; остатки Сверхновых, тепловое излучение областей НII; эмиссионные радиолинии HI и различных молекул межзвездного газа

яркость галактик все же падает — из-за красного смещения, уменьшающего интенсивность излучения). То же относится и к поверхностной плотности газа, пропорциональной  $M_{gas}/d^2$ . Однако сред-

ная поверхностная плотность диска, пропорциональная отношению его массы, определенной по скорости вращения  $M_d \sim v^2 d$ , к площади ( $\sim d^2$ ), будет меняться как  $D^{-1}$ .

Определение размера и массы галактик требует уточнения, поскольку у галактик нет резких границ, и в большинстве случаев нельзя сказать, где она кончается. Чаще всего под размером понимают фотометрический размер, ограниченный определенным уровнем яркости в пределах условно выбранной «пороговой» изофоты. В большинстве каталогов этот уровень привязывается к изофоте 25 зв. величины с квадратной секунды дуги в голубом (В) диапазоне (для сравнения: яркость темного ночного неба — около 22 зв. вел. с кв. сек., то есть более чем вдесятеро выше). Стандартное обозначение такого изофотного диаметра —  $D_{25}$ . Этот порог яркости примерно соответствует внешним областям галактик на хороших фотографических снимках, хотя слабое продолжение галактики можно проследить и дальше от центра.

Скорость вращения и ее зависимость от радиуса  $V(R)$  — одна из самых важных характеристик галактики. Как правило, она достигает максимума на расстоянии нескольких килопарсек от центра, после чего мало меняется. Максимальная скорость вращения коррелирует со светимостью дисковых галактик или массой диска (зависимость Талли–Фишера). Эта зависимость широко используется для оценки расстояний до галактик, особенно ближайших, находящихся на расстоянии нескольких мегапарсек, для которых метод красных смещений ненадежен.

Для описания свойств галактик широко используются смешанные фотометрическо-динамические характеристики: отношения массы к светимости  $M/L$  и массы газа к интегральной массе  $M_{gas}/M$ . И то, и другое отношение обычно выражается в солнечных единицах. Первое отношение характеризует звездный состав и, прежде всего, содержание маломассивных звезд, для которых  $M/L \gg 1$ , а также темной массы в галактике. Как правило, интегральное значение  $M/L \approx 2 \div 20$  для галактики в целом. Второе отношение —  $M_{gas}/M$  — сильно зависит от типа галактики и обычно лежит в пределах  $10^{-3} \div 10^{-1}$ .

Для некоторых карликовых галактик  $M_{gas}/M > 0.5$ , т. е. большая часть вещества в галактике находится в форме разреженного газа. Такие объекты лишь с некоторой натяжкой можно называть звездными системами. Обнаружены и отдельные межгалактические

Таблица 11.2. Важнейшие интегральные характеристики галактик

Параметр	Основной метод измерения	Интервал значений	Примерное значение для Галактики
Диаметр $D_{25}$	фотометрия	5–50 кпк	30 кпк
Радиальная шкала диска $R_0$	фотометрия	1–7 кпк	3 кпк
Толщина звездного диска	фотометрия дисков, наблюдаемых «с ребра»	0.3–1 кпк	0.7 кпк
Светимость $L$	фотометрия	$10^7$ – $10^{11} L_{\odot}$	$5 \cdot 10^{10} L_{\odot}$
Масса $M_{25}$ в пределах $D_{25}$	измерение скоростей газа и/или звезд по эффекту Доплера	$10^7$ – $10^{12} M_{\odot}$	$2 \cdot 10^{11} M_{\odot}$
Относительная масса газа $M_{gas}/M_{25}$ в пределах $D_{25}$	измерение интенсивностей линий нейтрального и молекулярного газа	0.1%–30%	2%
Скорость вращения $V$ внешних областей галактик	измерение скоростей газа и/или звезд по эффекту Доплера	50–300 км/с	220 км/с (для окрестности Солнца)
Период обращения внешних областей галактик	измерение скоростей газа и/или звезд по эффекту Доплера	$10^8$ – $10^9$ лет	$2 \cdot 10^8$ лет (для окрестности Солнца)
Масса центральной черной дыры	измерение скоростей звезд и газа вблизи ядра; эмпирическая зависимость от центральной дисперсии скоростей звезд	$3 \cdot 10^5$ – $3 \cdot 10^9 M_{\odot}$	$4 \cdot 10^6 M_{\odot}$

газовые облака больших размеров, которые имеют массу, сопоставимую с массами галактик, но тем не менее с ними связано крайне слабое свечение звезд, а в отдельных случаях никакого свечения не обнаруживается вообще. Но такие почти или полностью «невидимые» в оптике галактики крайне редки и плохо изучены.

Интервалы наблюдаемых значений важнейших интегральных характеристик галактик приведены в таблице 11.2. В редких случаях наблюдаются галактики, параметры которых выходят за указанные интервалы.