

В отличие от первой неустойчивости, гравитация диска как целого здесь не принимает участие в образовании бара. Угловая скорость вращения бара, связанного с неустойчивостью вытянутых орбит, должна быть меньше угловой скорости вращения звезд диска и определяться той скоростью, с которой эти орбиты прецессируют. Такие бары называют медленными. Вопрос о частоте их возникновения пока остается открытым.

11.4.11. Принципы оценки масс E-галактик

Особенность E-галактик в том, что в них нет динамически холодных газовых дисков (за исключением иногда встречающихся маленьких околоядерных дисков), и поэтому даже для грубой оценки массы требуется знать как дисперсию скоростей звезд на данном расстоянии от центра, так и радиальное распределение плотности. Это требует построения самосогласованных моделей, которые воспроизводят наблюдаемые значения усредненной по лучу зрения дисперсии скоростей на различном расстоянии от центра.

Оценки показали, что отношения массы к светимости M/L_B в B -диапазоне в центральных областях E-галактик в большинстве случаев составляют 5–10 солнечных единиц. Это вполне совместимо с моделями проэволюционировавшего звездного населения. Однако на периферии галактик локальные значения M/L_B растут, что говорит о сильном влиянии темной массы. Нагляднее всего присутствие последней проявляется в существовании горячих газовых корон с температурой порядка миллиона градусов, наблюдаемых по рентгеновскому излучению в E-галактиках большой массы. Распределение плотности и температуры горячего газа требует, чтобы масса гигантских E-галактик достигала или даже превышала $10^{12} M_{\odot}$. При этом интегральные значения M/L_B оказываются порядка сотни солнечных единиц. Это означает, что в E-галактиках доля массы, приходящейся на темное вещество, еще выше, чем в S-галактиках в пределах оптических границ их дисков, где массы темного и светящегося вещества, как правило, сопоставимы.

11.5. Физическая природа спиральной структуры

11.5.1. Спиральные ветви: наблюдаемые свойства

Большинство наблюдаемых галактик относятся к числу спиральных. Однако правильный, четкий и симметричный спиральный узор

встречается довольно редко, и там, где он есть, число основных рукавов почти всегда равно двум. Такую структуру называют упорядоченной (по-английски *Grand Design*). Чаще всего симметрия спиральной структуры нарушается, особенно на периферии галактик. Спирали дробятся на короткие дугообразные участки, слабо связанные между собой, ветвятся, разбиваются на отдельные яркие островки. Такую структуру называют *флоккулентной*. В одной и той же галактике, как правило, есть элементы и упорядоченной, и флоккулентной структуры.

Спиральный узор никогда не охватывает всего диска. Четкий узор обычно начинается не от самого центра галактики, а формируется на некотором расстоянии от него, причем в галактиках с перемычкой ветви часто отходят от концов бара или от окружающего его кольца. На большом расстоянии от центра четкий спиральный узор исчезает, хотя диск продолжается дальше, и его можно проследить как фотометрически, так и по линии излучения $\text{H}\alpha$ 21 см. В центральной области галактики и/или на периферии диска спирали нередко вырождаются в кольцо, что объясняется резонансными эффектами, возникающими при орбитальном движении звезд.

Вид спиралей и их контрастность сильно меняются в зависимости от того, в каком диапазоне спектра наблюдается галактика. Наиболее яркими и контрастными ветви предстают в коротковолновой (ультрафиолетовой, голубой) области спектра, что связано с концентрацией в них голубых сверхгигантов. В красных и ближних инфракрасных лучах контрастность спиралей падает, но они обычно выглядят более гладкими, упорядоченными, и, если спирали слабые, часто именно в ИК области их бывает легче выделить на фоне «зашумленного» диска. В этом диапазоне излучение приходит в основном от старых звезд, яркость которых распределена более однородно. Наконец, в далеком ИК диапазоне (10–100 мкм) ветви вновь становятся более яркими, поскольку излучение приходит от межзвездной пыли, нагреваемой звездами, которая, как и вся межзвездная среда, имеет наиболее высокую плотность в спиральных ветвях. Особенно яркими и клочковатыми, богатыми мелкими деталями, спирали выглядят в эмиссионных линиях, излучаемых газовыми туманностями, и в инфракрасных линиях излучения молекул, прежде всего, полиароматических углеводородных соединений (самые сильные линии — на 6–20 мкм). В радиодиапазоне спиральные ветви выделяются в линиях нейтрального водорода и простых молекул.

С наблюдательной точки зрения, ветви в спиральных галактиках представляют собой области диска, выделяющиеся более высокой яркостью, главным образом, благодаря концентрации в них молодых звездных комплексов и газопылевой среды, нагреваемой молодыми звездами. В галактиках Sc и Sd спирали обычно выглядят просто как цепочки из наиболее ярких областей звездообразования. Помимо плотности молодых объектов, в спиральных ветвях значительно выше поверхностная плотность газопылевой среды (особенно молекулярного газа), индукция магнитного поля и плотность релятивистских частиц (об этом говорит усиление яркости синхротронного радиоизлучения). В Sb–Sd галактиках спиральные ветви хорошо прослеживаются по отдельным гигантским газовым комплексам, получившим название «сверхоблаков», часть которых охвачена процессом звездообразования.

Долгое время не было ответа на вопрос о том, как вращается спиральный узор галактик — внешними концами вперед (лидирующие спирали) или назад (отстающие спирали). Обычно это не просто определить, поскольку даже если измерена скорость вращения галактического диска, не всегда очевидно, в какую сторону он вращается — по часовой стрелке или против, поскольку для этого надо знать, какая половина галактики ближе, а какая — дальше от нас⁵. Как показали исследования, за редкими исключениями, встречающимися у взаимодействующих галактик, спиральный узор является «отстающим», то есть спирали вращаются «концами назад».

Контрастные и протяженные спирали встречаются лишь у галактик, в которых высокое содержание межзвездного газа сочетается с быстрым вращением диска. Эти два условия должны выполняться одновременно. В галактиках с медленным вращением (менее 100–150 км/с) спиральный узор наблюдается редко и не отличается четкостью. При малом количестве газа (диски S0-галактик) даже при быстром вращении диска спирали либо имеют низкий контраст, либо вообще отсутствуют. Все это говорит о том, что решающую роль в формировании спиралей играют «холодные» компоненты диска (газ, молодые звезды), дисперсия скоростей которых мала по сравнению с круговой скоростью.

⁵При достаточно большом угле наклона диска ближнюю сторону галактики от дальней можно отличить по асимметрии в распределении пылевых полос или общему ослаблению яркости, обусловленного пылью в диске галактики. Но это не всегда удается сделать.

Спиральный узор может проявлять себя не только по излучению или поглощению света, но и по полю скоростей газа или звезд. Наблюдения показывают, что скорость газа в спиральных заметно отличается от круговой (на 10–30 км/с). Эти отличия, как правило, имеют регулярный характер, свидетельствующий о систематических движениях газа, накладывающихся на его общее вращение, благодаря которым и возникает спиральный узор.

11.5.2. Два типа спиральных ветвей

Тот факт, что спиральная структура наблюдается у большей части дисковых галактик, говорит о ее долговечности. В этом заключается основной парадокс: поскольку диски галактик вращаются дифференциально, а не как твердое тело, вращение неизбежно должно закручивать любой узор на диске и приводить к его исчезновению за 1–2 оборота. Однако этого не происходит. Возможны два варианта объяснения: либо спирали непрерывно исчезают и возобновляются, причем исчезают раньше, чем успели очень сильно «закрутиться», либо же спиральный узор вращается твердотельно, несмотря на дифференциальное вращение диска, так что угловые скорости узора и диска совпадают только на определенном расстоянии от центра. Допустимы оба варианта. В первом случае говорят о «материальных» ветвях, во втором — о волновом спиральном узоре.

«Материальные» спиральные ветви, по определению, «сцеплены» с вращающимся диском. Поскольку в спиральных ветвях концентрируется газ и молодые звезды, появление и исчезновение спиралей может быть связано со вспышками звездообразования в локальных областях диска, которые продолжаются доли периода оборота (менее 10^8 лет). Этот промежуток времени достаточен для того, чтобы успели проэволюционировать и погаснуть массивные звезды. За время их существования яркая область, содержащая молодые звезды, вытягивается дифференциальным вращением диска в короткую дугу. Непрерывно возникающие локальные вспышки звездообразования создадут множественность таких дуг. Их положение на диске будет не вполне случайным, они будут тяготеть друг к другу, поскольку звезды, появившиеся в одном месте, в состоянии стимулировать звездообразование в соседних областях (через расширяющиеся области НII, звездный ветер и вспышки сверхновых). В итоге, моментальная картина распределения ярких молодых звезд будет иметь вид флоккулентного спирального узора.

Такой механизм образования ветвей не должен, однако, «задевать» распределение старых звезд, поскольку эти ветви практически не возмущают гравитационное поле диска. Поэтому обрывки флоккулентных спиралей исчезают при наблюдении в ближнем ИК диапазоне, где вклад молодых звезд в излучение мал. Но при этом в ИК свете часто вырисовывается слабоконтрастная картина упорядоченных спиралей в старом звездном диске. Таким образом, газовая флоккулентная структура, отражающая распределение областей звездообразования, сосуществует в галактиках с регулярным спиральным звездным узором.

Особый тип «материальных» спиралей — это длинные спиралевидные хвосты взаимодействующих галактик, возникающие при благоприятных условиях, когда гравитационное поле в диске одной галактики возмущается полем соседней галактики, движущейся под небольшим углом к плоскости диска. Такие хвосты называются приливными, и они состоят из покидающих родительскую галактику звезд и газа. Долговечность этих образований связана с низкой скоростью движения вещества относительно галактики.

Другой тип спирального узора — волновые спирали, представляющие собой результат механических колебаний, распространяющихся в звездной и газовой подсистемах диска. Механизмы возбуждения этих колебаний могут быть различными, они связаны либо с гравитационной неустойчивостью звездного диска, либо с гидродинамической неустойчивостью газового слоя (в общем случае, могут «работать» оба процесса). Но в большинстве спиральных галактик решающая роль, по-видимому, принадлежит гравитационному механизму. Рассмотрим его подробнее.

Представление о существовании волн плотности в звездном диске было впервые развито в работах Б. Линдблада в 1960-е годы, а затем — рядом теоретиков — на языке гидродинамики и динамики бесстолкновительного гравитирующего звездного газа. Была показана возможность существования самоподдерживающихся спиральных волн плотности, имеющих постоянную угловую скорость Ω_p в диске, который вращается с угловой скоростью, меняющейся с радиусом. Распространение волны обусловлено самосогласованной замкнутой цепочкой процессов. В системе отсчета, вращающейся вместе со спиральным узором, это выглядит следующим образом: небольшой избыток плотности звездного диска в спирали (недостаток плотности между спиральями) создает возмущение гравитационного поля,

которое меняет траектории звезд диска. Как результат, траектории звезд «сближаются» в области спирали, поддерживая тем самым исходный избыток плотности и связанное с ним возмущение потенциала на том же уровне. Поскольку спиральный узор вращается относительно звездного диска, в каждый момент времени его будут образовывать и поддерживать разные звезды, так что можно говорить о волне сжатия, распространяющейся в диске. Дисперсия скоростей звезд невозмущенного диска при этом не должна быть значительно выше критической для гравитационной устойчивости (см. раздел 11.4.8), иначе случайные скорости звезд «замоют» всю картину. Но и в случае большой дисперсии скоростей звезд возможно существование волновых спиралей, только их распространение будет обусловлено уже гравитацией газа, а не звезд, поскольку газ в плоскости диска всегда представляет собой динамически более холодный компонент.

Если спирали имеют волновую природу, то и плотность диска, и гравитационный потенциал, и скорости движения звезд испытывают волновые колебания, причем линии, соединяющие точки, колеблющиеся в одной фазе, являются спиралями, вращающимися с определенной угловой скоростью. Но если о колебаниях плотности свидетельствует сама картина спиралей в ИК диапазоне спектра, в котором основной вклад дают старые звезды, то доказать существование колебаний скоростей газа, согласованные по длинам волн и фазе с колебаниями плотности, оказалось нелегкой задачей, осложняющейся тем, что измерениям доступна только одна компонента скорости — вдоль луча зрения. Тем не менее, именно такие колебания удалось обнаружить по высокоточному измерению полей скоростей газа в галактиках с хорошо развитой спиральной структурой, окончательно доказав тем самым их волновую природу.

Механические колебания возможны лишь при существовании положения устойчивого равновесия системы и сил упругости, возвращающих ее к нему. В бесстолкновительных звездных дисках распространение колебаний оказалось возможным только потому, что эти диски вращаются, и роль упругих сил играет сила Кориолиса. Простое аналитическое решение, описывающее распространение волн, получено только для туго закрученных ветвей, мало отличающихся по форме от окружности, и только для линейных волн, когда амплитуды изменения плотности, скорости вращения и потенциала значительно меньше их невозмущенных значений.

Механические колебания принято описывать дисперсионным уравнением, связывающим частоты колебаний ω с длиной волны и с параметрами, характеризующими свойства среды. Область положительных значений ω^2 соответствует гармоническим колебаниям, отрицательных — неустойчивому состоянию. Например, для звуковой волны в однородной среде дисперсионное уравнение имеет тривиальный вид: $\omega^2 = k^2 C_s^2$, где C_s — скорость звука, причем всегда $\omega^2 > 0$. Дисперсионное уравнение, описывающее линейные колебания частиц в тонком диске для чисто радиальных колебаний или туго закрученных спиралей, выглядит следующим образом:

$$\omega^2 = \kappa^2 + C_s^2 k^2 - 2\pi G \sigma_g |k|. \quad (11.25)$$

Здесь C_s — скорость звука (в случае газа) или радиальная дисперсия скоростей (в случае звезд), σ_g — поверхностная плотность газа, а $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число. Частота колебаний ω частицы, периодически пересекающей спиральную волну, зависит от модуля разности угловых скоростей диска Ω и спирального узора Ω_p :

$$\omega = m|\Omega_p - \Omega(R)| \quad (11.26)$$

(m — число спиральных рукавов в диске). Первый член в правой части дисперсионного уравнения описывает «упругость» среды, обусловленную вращением, второй — учитывает влияние дисперсии скоростей (облаков газа, звезд) на частоту колебаний, наконец, третий, отрицательный член учитывает действие гравитационной силы, стремящейся сдержать расширение среды, испытавшей сжатие, и тем самым замедлить колебательный процесс.

Распространение колебаний возможно только при действительных значениях частоты, т. е. в гравитационно устойчивом диске. Последнее условие выполняется при $C_s \geq C_{cr} = \pi G \sigma_g / \kappa$. Ему соответствует $\omega^2 \geq 0$ для всех значений k . Это выражение для критического значения дисперсии практически совпадает с тем, которое встречалось в предыдущем разделе, когда речь шла о гравитационной устойчивости бесстолкновительного звездного диска (критерий Тоомре).

Хотя приведенное дисперсионное уравнение получено для газа, а для звезд оно имеет более сложный вид и не столь наглядно, зависимость частоты от волнового числа для колебаний звездного и газового дисков почти одинакова за исключением области коротковолновых колебаний (области больших $|k|$), где гравитационный член

в приведенном выше дисперсионном уравнении слабо влияет на частоту колебаний, и для звезд она оказывается ниже, чем для газа. Поэтому в области коротких длин волн, когда расстояния между спиральными волнами малы, звездный и газовый спиральный узоры могут не совпадать. При $\Omega = \Omega_p$ частицы диска движутся вместе с волной ($\omega^2 = 0$). Радиус $R = R_c$, на котором этот резонанс имеет место, называется радиусом коротации.

Возмущенные радиальные и азимутальные скорости нагляднее всего проявляются вблизи коротации в системе координат, вращающейся с угловой скоростью спирального узора. Как было предсказано теоретически (А. М. Фридман), сложение возмущенных радиальных и азимутальных скоростей должно привести к антициклоническим замкнутым траекториям звезд и газа в области коротации, что было подтверждено измерениями скоростей газа в галактиках (см. обзор А. М. Фридмана и О. В. Хоружева, «Природа», 1999).

Два других резонанса соответствуют случаю $(\Omega_p - \Omega) = \pm \kappa/m$. Первый случай ($\Omega_p - \Omega(R) < 0$) принято называть внутренним (ILR), а второй ($\Omega_p - \Omega(R) > 0$) – внешним (OLR) линдбладовским резонансом. Вблизи резонансов волна быстро становится нелинейной, и используемые здесь приближения не работают. В областях резонансов ILR и OLR происходит затухание колебаний звезд.

Волны плотности могут возбуждаться в результате действия самых различных процессов, приводящих к возмущению гравитационного поля. Однако остается нерешенным вопрос, какой механизм ответственен за возбуждение спиральных волн в тех или иных галактиках, и почему эти волны не затухли за миллиарды лет существования галактик. Численное моделирование распространения спиральных волн подтверждает, что даже при $C_s \approx C_{cr}$ (11.16) спиральи исчезают через несколько оборотов (в масштабах галактик – менее чем через миллиард лет), а энергия их колебаний переходит в кинетическую энергию хаотических движений звезд диска.

Исследования позволили «нащупать» те возможные причины, которые способны продлить (но не до бесконечности) жизнь волновых спиралей. К ним относятся:

– поддержка колебаний диска вращающимся баром. Будучи несимметричным образованием, бар при вращении непрерывно возмущает гравитационное поле в прилегающих областях диска, и волна возмущений распространяется наружу, вовлекая в колебательный процесс наиболее холодные динамические подсистемы;

— сложный характер распространения волн, при котором они испытывают отражение от некоторой зоны диска (вблизи коротации), меняя направление движения на противоположное, проходят через центр и вновь движутся наружу. Этот цикл может сопровождаться возрастанием энергии колебаний (за счет энергии вращения диска);

— развитие гидродинамических (не гравитационных) неустойчивостей в газовом диске (А. М. Фридман). В этом случае «первичными» должны быть волны в газе, но при наличии достаточно массивного газового диска эти волны, создавая возмущение гравитационного потенциала, в свою очередь могут инициировать колебания плотности и в звездном диске;

— распространение волн в диске, порождаемых гравитационным возмущением со стороны близко проходящих небольших спутников или соседних галактик.

Решающую роль в долговечности спиралей играют холодные компоненты — газ, легко теряющий энергию, поскольку представляет диссипативную среду, и молодые звезды, которые рождаются из него. Однако запасы газа не вечны, и через миллиарды лет спиральные галактики станут редким украшением природы.

11.6. Межзвездный газ в галактиках

Поскольку свойства нашей Галактики типичны для гигантских спиралей, все то, что говорилось о межзвездной галактической среде (см. главу 4), может быть применимо и к другим дисковым галактикам. Не менее 97% по массе межзвездной среды приходится на водород (70–75%) и гелий (25–28%). Поэтому свойства межзвездного газа обычно характеризуют тем, в каком состоянии находится водород: нейтральный газ (HI), молекулярный газ (H_2), ионизованный газ HII и горячий газ (в этом случае многократно или полностью ионизованы даже атомы тяжелых элементов). Если горячий газ находится как в диске, так и за его пределами, то газ в остальных состояниях концентрируется вблизи плоскости диска.

Полное количество газа в диске галактики зависит от многих факторов, важнейшие из которых — звездообразование, сброс газа проэволюционировавшими звездами и аккреция на галактику извне. Состояние газа определяется в первую очередь источниками энергии, передаваемой газу. Этими источниками могут быть молодые звезды, сверхновые звезды и другие звезды, выбрасывающие