ОЦЕНКА МАСС "ТЕМНОЙ" МАТЕРИИ В ГАЛАКТИКАХ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ СКОРОСТЕЙ "СВЕТЛОЙ"

А. В. Засов

Московский Университет, Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга
Университетский пр. 13, Москва, Россия
e-mail: zasov@sai.msu.ru

О существовании линий в спектрах, принадлежащих различным газам, было известно и до классических работ Густава Кирхгофа, раскрывших их физическую природу и происхождение. Но именно эти работы великого ученого заложили основу спектрального анализа, из которого вскоре выросла астрофизика и появилась возможность дистанционного исследования источников света и тех сред, через которые свет проходит на пути к наблюдателю. Анализ спектров позволил не только изучать физические свойства и химический состав излучающих (поглощающих) сред, но и исследовать характер движения вещества по лучу зрения (эффект Доплера). Однако никто не мог предположить, что по спектральным линиям космических объектов можно будет обнаружить и исследовать несветящуюся, "темную" материю, то есть измерять массу и плотность среды, излучение которой не поддается обнаружению. Разумеется, речь идет об анализе спектров видимых тел и оценках скоростей их движения в сложных гравитационных полях.

ВВЕДЕНИЕ

До середины XX века единственным примером обнаружения источника гравитационного поля по его воздействию на наблюдаемые тела было открытие Нептуна по особенностям движения Урана. Но в этом случае исходными являлись данные о видимом движении планеты, то есть использовался астрометрический подход, плюс, конечно, Закон Всемирного тяготения, без которого ни о каких оценках массы космических тел говорить не приходится. В случае галактик и их систем все поиски темной материи связаны с использованием эффекта Доплера, и лишь в последнее время начали привлекать эффекты гравитационного линзирования – сильного или слабого, не требующие анализа спектра.

История открытия и исследования темной материи в галактиках и скоплениях галактик, насчитывающая уже несколько десятилетий, хорошо описана в целом ряде публикаций и не является темой настоящей статьи, как и проблема природы темной массы. Здесь речь пойдет прежде всего о попытках измерения массы светлого и темного вещества внутри дисковых галактик на основе анализа спектров газа и звездного населения. Под словами "внутри галактик", будем подразумевать "внутри их наблюдаемых границ", то есть там, где еще заметно излучение звезд или газа, оставляя в стороне нерешенный вопрос о физической протяженности галактик как гравитационно связанных систем.

Научный бум, породивший целую лавину работ по скрытой массе внутри галактик, начался с появлением наблюдательных данных о скоростях вращения V галактических дисков на достаточно большом расстоянии R от центра, то есть с получением достаточно длинных кривых вращения $V(R)$. Все кривые вращения строятся по измерениям эффекта Доплера путем анализа спектра отдельных областей галактик в оптическом или радио диапазонах (в последнем случае, как правило, по линии водорода H I). В оптическом диапазоне для этого обычно используются либо классические дифракционные спектрографы с длинной щелью, либо сканирующие интерферометры Фабри–Перо с высокими порядками интерференции. Последние не имеют щели, и с их помощью можно оценивать доплеровский сдвиг спектральных линий сразу во многих тысячах точек по диску галактики, восстанавливая путем довольно сложной математической обработки данных двумерное поле лучевых скоростей, а из него – кривую вращения. Радионаблюдения уступают оптическим по угловому разрешению и пригодны для построения кривой вращения, только если в галактике есть достаточное количество газа на большом расстоянии от центра, в то время как оптические наблюдения могут давать оценки скоростей как газа, так и звезд, причем с высоким разрешением. Зато в галактиках, богатых газом, радиокривые вращения прослеживаются значительно дальше оптических, иногда – далеко за пределами видимых границ галактики.

Вопреки ожиданиям, оказалось, что кривые вращения, как правило, не падают на больших расстояниях от центра галактик, а выходят на почти плоский участок (на плато) или даже продолжают расти с R (рис. 1).

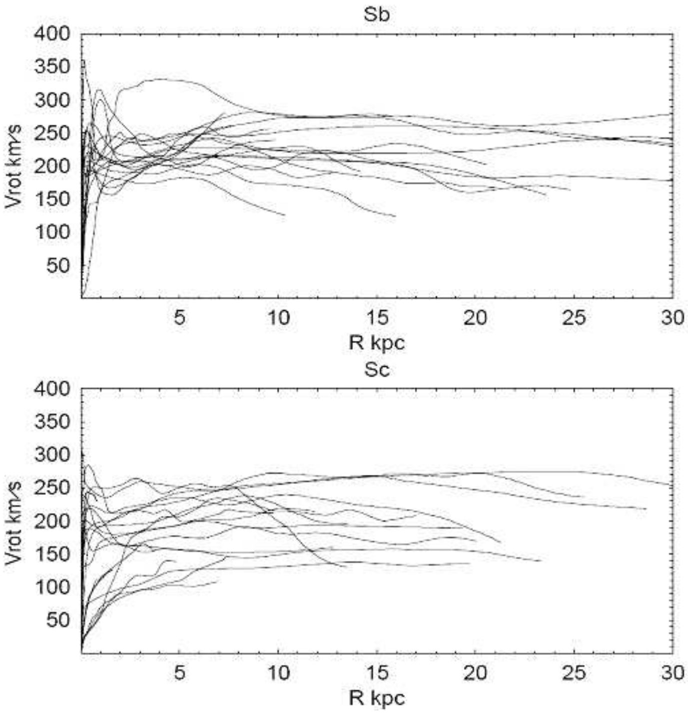

Рис. 1. Кривые вращения спиральных галактик (по [1])

Распространено заблуждение, что рост скорости вращения до больших R или выход кривой вращения на плато является если не доказательством, то по крайней мере решающим аргументом в пользу существования в галактиках темного гало с массой, сопоставимой или превосходящей массу видимого вещества. На самом деле это не так, и форма кривой вращения, какая бы она ни была, сама по себе ещё не говорит о "скрытой" массе. Причин здесь две. Первая связана с общим определением массы галактики, вторая – с ее разделением на массы отдельных компонентов. Рассмотрим их подробнее.

1. При переходе от измеренной скорости вращения или кривой вращения к массе обычно делается ряд предположений, выполняющихся лишь приблизительно, а иногда просто не выполняющихся. Поэтому вывод о темной материи, заполняющей галактику, далеко не во всех случаях очевиден. Так, обычно принимается, что диск галактики тонкий, распределение масс в галактике осесимметрично, а измеренная скорость вращения на любом R мало отличается от круговой скорости, спроектированной на луч зрения. Роль этих допущений не одинакова. К примеру, толщина диска слабо сказывается на форме кривой вращения, а особенности поля скоростей, не совместимые с осесимметричной моделью диска, могут быть выявлены и учтены. С отличием измеряемых скоростей от круговых связаны, пожалуй, наибольшие ошибки определения масс. Локальные некруговые движения обычно бывают обусловлены активностью молодых звезд в областях звездообразования, наличием контрастного бара в центральной области, активностью ядра или же связаны со взаимодействием галактик, возмущающих поле скоростей в наибольшей степени как раз на периферии дисков. Все это затрудняет интерпретацию результатов измерений.

2. Любая форма кривой вращения – растущая или падающая, и даже спадающая круче кеплеровского закона $V(R) \sim R^{-1/2}$ (что теоретически возможно, хотя наблюдается очень редко), на самом деле ничего не говорит о присутствии или отсутствии темного гало и может быть объяснена одним только диском, форма кривой вращения которого отражает лишь особенность распределения массы в нем. Чем вещество, составляющее диск, то есть звезды и газ, слабее концентрируется к центру, тем до больших расстояний от центра будет наблюдаться рост скорости вращения. Скорость вращения равновесного однородного диска в создаваемом им же самим гравитационном поле безудержно растет с R. Конечно, диски реальных галактик заведомо не однородны, их плотность падает с удалением от центра. Но и в этом случае с объяснением плато на кривой вращения тоже нет особой проблемы. Классический пример – так называемый диск Местеля. Это тонкий осесимметричный диск, поверхностная плотность $\Sigma(R)$ которого

падает от центра к периферии как K/R, где K – константа. Теоретически можно показать, что круговая скорость, которая в общем случае определяется радиальным градиентом гравитационного потенциала

$$V^2(R) = R \cdot \partial\Phi(R)/\partial R,$$

в случае диска Местеля зависит только от значения K, то есть не меняется с R. Кривая вращения галактики, представляющей собой диск Местеля, будет описываться горизонтальной линией – от нуля до бесконечности – безо всякого темного гало! Масса такого диска в пределах любого заданного радиуса R будет определяться выражением $M(R) = V^2R/G$, то есть так же, как и в случае сферически-симметричного распределения плотности. Иными словами, по кривой вращения диск Местеля нельзя отличить от сферически-симметричной галактики.

Что же в таком случае действительно можно рассматривать как прямое указание на невидимую массу в дисковых галактиках и, в частности, на массивное темное гало? В первую очередь, это расхождение между измеренной кривой вращения галактического диска и ожидаемой в предположении, что галактика состоит только из "светлого вещества", то есть из непосредственно наблюдаемых компонентов. К ним относится звездное население диска и балджа плюс межзвездная газопылевая среда, причем вклад последней, как правило, мал по сравнению со звездными. Наличие такого расхождения выявляется при сопоставлении кривой, вычисленной по распределению яркости (плотности) звездных и газовых компонентов, с наблюдаемой кривой вращения $V(R)$.

Заметим, что предлагаются и радикальные теории для объяснения плоских кривых вращения без привлечения дополнительной массы. Так, рассматриваются, хотя и без особого успеха, предположения о негравитационной, например магнитной, силе, действующей на дифференциально вращающийся газовый слой, или предполагается неньютоновский характер движения тел в области малых ускорений (теория MOND). Такие подходы, безусловно, имеют право на существование и должны проверяться, но исследователи встречаются с большими сложностями при попытке придать им универсальный характер. Стремление обойти вывод о наличии темной материи в галактиках подчас похоже на попытку объяснить загадку с помощью чуда.

КРИВАЯ ВРАЩЕНИЯ И "ТЕМНАЯ" МАССА

В абсолютном большинстве спиральных галактик основная масса видимого вещества приходится на звездный диск. Но радиальные профили яркостей дисков падают с расстоянием от центра галактики круче, чем у диска Местеля. Чаще всего на большом интервале R профиль яркости описывается экспоненциальным законом

$$I(R) = I_0 \exp(-R/R_0),$$

где I_0 – поверхностная яркость диска, экстраполированная на центр, а R_0 – радиальная шкала диска. Теоретически можно показать, что кривая вращения такого экспоненциального диска должна проходить через максимум на $R = 2.15R_0$ и плавно снижаться на больших R, что почти никогда не наблюдается у галактик, и заведомо не совместимо с постоянной или почти постоянной скоростью вращения их внешних областей. Это и дает основание предположить наличие темной массы. Как иллюстрация, на рис. 2 показана протяженная кривая вращения спиральной галактики M 33, полученная по наблюдениям нейтрального водорода (H I), в сравнении с ожидаемой кривой при отсутствии невидимой массы.

Как правило, в пределах нескольких килопарсек от центра кривые вращения не требуют предположения о скрытой массе и вполне объясняются массой звездных компонентов – диска и балджа. Но если вращение внутренней части галактики вполне можно объяснить видимым веществом, то чем дальше от центра, тем все большую роль должно играть гравитационное поле невидимой массы, чтобы обеспечить высокую скорость вращения диска. Правда, в некоторых случаях измерения кривых вращения массивных галактик действительно "доходят" до тех расстояний, где скорость вращения начинает медленно уменьшаться, но какой-либо общей закономерности относительно того, где это происходит, установить не удалось. В принципе, "нащупать" границу гало можно по анализу скоростей движения спутников галактик либо по слабому искажению форм далеких галактик, свет которых проходит сквозь гало и испытывает искривление в его гравитационном поле (эффект слабого микролинзирования). И тот, и другой подходы мало информативны для отдельно взятых галактик и дают оценки лишь на статистическом уровне. Есть основание считать, что темная материя массивных и достаточно изолированных галактик тянется на несколько сотен килопарсек (примерно на порядок дальше их оптических границ) и содержит массу, в несколько раз превышающую массу видимых компонентов. Однако от галактики к галактике ситуация может сильно меняться, причем в некоторых случаях масса гало оказывается совсем небольшой по сравнению с массой звездного диска. Хорошим примером является спиральная галактика NGC 157, скорость вращения которой быстро падает за пределами оптических границ [2].

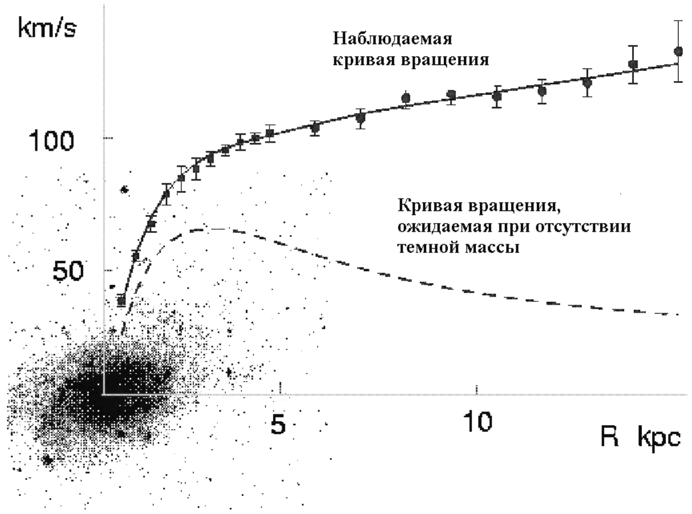

Рис. 2. Сравнение наблюдаемой кривой вращения для M 33 и кривой, ожидаемой в присутствии только звездного компонента

Заметим, что в случае эллиптических галактик, где нет массивных вращающихся дисков, наблюдения тем не менее также приводят к выводу о наличии темной массы, доминирующей на больших R. Это следует из построения самосогласованных динамических моделей галактик, базирующихся на измерении фотометрического профиля и оценках дисперсии скоростей звезд. А для эллиптических галактик с рентгеновскими газовыми коронами о невидимой массе дополнительно свидетельствует высокая температура газа, полученная по спектру рентгеновского излучения (миллионы Кельвинов), при которой гравитационное поле одних только звезд не смогло бы удерживать газ сколь-нибудь долгое время.

Однако, оценить количественно массу несветящегося вещества внутри галактик по кинематике газа или звезд оказалось задачей не просто сложной, но и подчас не выполнимой без дополнительных предположений. Для определенности, чтобы задача все же имела решение, приходится ограничить рассматриваемую область заранее оговоренным значением радиуса. В качестве последнего обычно берется условный оптический радиус галактики R_{25}, который приводится в каталогах внегалактических объектов. Этот радиус соответствует пороговому значению яркости галактики, равному 25-й зв. величине с квадратной секунды дуги, что примерно в 16 раз ниже яркости ничем не "подсвеченного" безлунного ночного неба. Но для галактик, отличающихся особенно низкой поверхностной яркостью, такая граница будет охватывать область, слишком близкую к ядру. В качестве предельного может быть взят также радиус, измеренный в единицах радиальной шкалы яркости R_0, поскольку он не зависит от средней поверхностной яркости галактики. Ниже условно будем принимать за оптическую границу диска предельный радиус $R = 4R_0$. Для нормальных галактик этот предел в среднем довольно близок к R_{25}.

Полную массу галактики в пределах выбранных границ оценить куда проще, чем массу ее различных компонентов по отдельности. Более-менее надежно, опираясь на законы излучения (тот же закон Кирхгофа!), оценивается масса газа – по радионаблюдениям линий излучения H I и молекулярного газа. Замечу, однако, что и здесь нет полной ясности: высказывалось предположение, что существенная доля молекулярного газа может оказаться неучтенной, если его температура очень низка и не превышает нескольких Кельвинов. К тому же, масса молекулярного газа оценивается по интенсивности радиоизлучения некоторых молекул (прежде всего, CO), которые представляют собой лишь малую добавку к молекулярному водороду, и оценка коэффициента перехода от интенсивности излучения к полному числу атомов газа на луче зрения представляет отдельную проблему.

Определить массу звездного населения еще сложнее, чем газа, для этого надо хорошо знать звездный состав галактики, что опять-таки требует анализа её абсорбционного спектра либо проведения фотометрии в различных спектральных областях. Но и этого недостаточно, поскольку априори неизвестно, как перейти от распределения яркости диска к распределению его плотности или от светимости диска к его полной массе.

Задача определения вклада различных компонентов галактики в общую кривую вращения по анализу

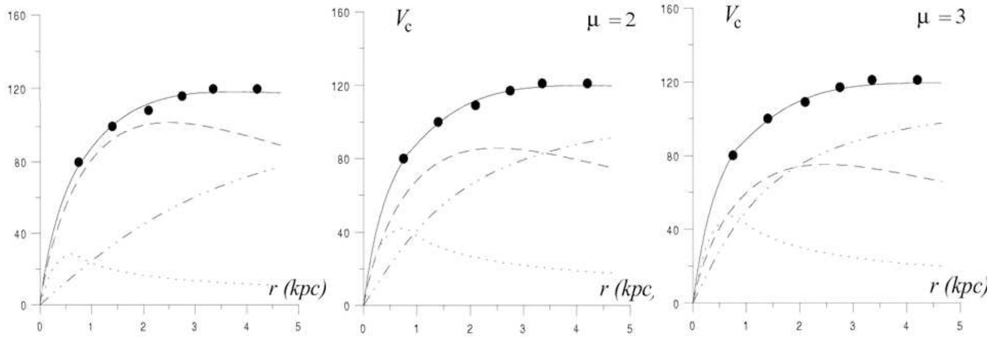

Рис. 3. Пример неоднозначности декомпозиции наблюдаемой кривой вращения NGC 6503 (точки) на составляющие, относящиеся к балджу, диску с фиксированной радиальной шкалой и гало (тонкие линии). Здесь μ – отношение массы недисковых компонентов к массе диска. Первый рисунок соответствует случаю, когда масса диска равна сумме масс балджа и гало

распределения их суммарного гравитационного потенциала относится к числу некорректных задач. Круговая скорость определяется через производную гравитационного потенциала по радиусу. Потенциалы отдельных компонентов суммируются аддитивно, поэтому если $\Phi_n(R)$ — распределение потенциала n-го компонента, то суммарный потенциал $\Phi(R) = \sum_n \Phi_n(R)$, или $\partial\Phi(R)/\partial R = \sum_n (\partial\Phi_n(R)/\partial R)$. Следовательно,

$$V(R) = \left(\sum_n V_n^2(R)\right)^{1/2}. \tag{1}$$

Иными словами, суммируются квадраты круговых скоростей, обусловленных отдельными компонентами, при этом наблюдаемая скорость вращения может быть представлена их самыми различными комбинациями. Поэтому без дополнительной информации о массах компонентов или распределении вещества в них задача не решается. Здесь на помощь приходит то обстоятельство, что вклад различных компонентов в общее гравитационное поле на разных расстояниях от центра галактики не одинаков. Так, балдж (если он есть в галактике вообще) доминирует во внутренней области галактики, диск – на расстоянии 2–3 R_0 от центра, а гало – во внешней области. Анализируя форму кривых вращения в галактиках, где гало доминирует, можно заключить, что она лучше всего описывается псевдоизотермической моделью распределения плотности, в которой радиальный профиль плотности гало на больших R асимптотически приближается к закону $\rho(R) \sim R^{-2}$ (он очень удобен для вычислений, хотя вряд ли справедлив для любой дисковой галактики). Это позволяет при достаточно длинной кривой вращения выделить составляющую, связанную с гало. Что касается других компонентов, то на практике при расчете их вклада в общий потенциал галактики помогает предположение, что в первом приближении их плотность распределена в соответствии с наблюдаемым распределением яркости.

Но даже при таком подходе мы все равно не получим единственного решения задачи по декомпозиции наблюдаемой кривой вращения на составляющие. В качестве примера, на рис. 3 представлена кривая вращения спиральной галактики NGC 6503 и ее возможные представления. Все три представленные варианты решения хорошо описывают наблюдаемую кривую вращения, но приводят к сильно различающимся оценкам массы диска и гало, несмотря на то, что один из параметров модели – радиальная шкала диска R_0 – здесь считается известным.

ДВА СПОСОБА УТОЧНЕНИЯ МАССЫ ДИСКА

Итак, для того, чтобы понять, требуется ли наличие темной массы для объяснения кинематических характеристик галактики, и если да, то какова эта масса и где она сосредоточена в галактике, необходимо найти метод независимой оценки массы диска, а затем сравнить полученное значение с интегральной динамической массой галактики и оценить таким образом количество недостающей (темной) массы. Таких методов известно несколько, но каждый из них базируется на своих предположениях, и поэтому не претендует на строгость и оставляет лазейку для сомнения. Здесь мы остановимся на двух подходах, наиболее универсальных в плане применения к большому числу объектов.

Метод 1 (фотометрический).
Метод базируется на измерении массы совокупности звезд галактики по наблюдаемому абсорбционному спектру (путем его моделирования) и интегральной светимости звездного населения, а в более простом и более широко используемом варианте – исходя из оценок интегральной светимости звездных компонентов в различных фотометрических полосах. В обоих вариантах находится такая модель звездного состава галактики, которая наилучшим образом объясняет наблюдаемый спектр или измеренные показатели цвета. Знание звездного состава позволяет оценить полную массу звезд галактики, если известна ее светимость в какой-либо области спектра (с учетом селективного ослабления света пылевой средой).

Прежде всего, нас интересует масса галактического диска, на долю которого приходится в абсолютном большинстве случаев основная часть звезд галактики, как и основная доля ее интегральной светимости. Очевидно, что чем больше светимость диска, тем больше суммарная масса его звезд. Вся проблема – в оценке коэффициента пропорциональности M_*/L между массой и светимостью: его величина зависит от вклада звезд различной массы и различного возраста в излучение галактики. С возрастанием относительного числа молодых звезд падает отношение M_*/L. Но одновременно меняется и цвет звездной системы, ее показатели цвета уменьшаются, поэтому должно иметь место определенное соотношение между этими параметрами. Из теории звездной эволюции известно, как меняется в течение жизни светимость и цвет звезд в зависимости от их массы и химического состава, поэтому модели эволюции звездного населения позволяют теоретически оценить M_*/L как функцию показателей цвета. Примечательно, что соотношение между ними очень слабо зависит от истории звездообразования в галактике (см., например, [3]).

Основным недостатком фотометрического метода является зависимость результата от принятой модели эволюции звездного населения, и особенно сильная зависимость – от того, каким задается распределение рождающихся звезд по массам, то есть от принимаемой начальной функции масс (НФМ). Обычно НФМ считается одинаковой для разных галактик, что, конечно, является упрощением. Определенно известны галактики, показатели цвета которых явно не вписываются в стандартные схемы эволюции звездного населения и не согласуются с ожидаемым соотношением "цвет – M_*/L" (см., например, [4]).

Метод 2 (динамический).
Метод основан на оценке верхнего предела локальных значений поверхностной плотности диска, который вытекает из условия его гравитационной устойчивости. К реальным галактикам при некоторых упрощающих предположениях он впервые был применен Боттема [5]. Вращающийся звездный диск, как и диск любой природы, состоящий из частиц, между которыми действует только сила тяготения, должен характеризоваться определенной дисперсией радиальных скоростей звезд, чтобы диск находился в равновесном гравитационно устойчивом состоянии. Если дисперсия скоростей звезд диска окажется очень низкой, то он начнет быстро динамически нагреваться. Поэтому нет спиральных галактик, диск которых состоял бы из звезд с такой же низкой дисперсией скоростей, как у облаков газа, то есть из звезд, имеющих практически круговые орбиты. Остановимся на этом методе чуть подробнее.

Звездный диск – это бесстолкновительная система, поскольку случайными сближениями звезд можно пренебречь из-за крайне малой вероятности таких событий. Казалось бы, если звезды не сближаются друг с другом настолько, чтобы заметно изменить свои траектории движения, то характер орбитального движения звезд должен быть законсервирован и определяться начальными условиями образования звезд. Но это не так. Вместо парных сближений могут действовать коллективные процессы, когда каждая звезда ощущает изменение гравитационного потенциала, связанного с положением всех остальных звезд, составляющих диск, то есть реагирует на диск, на совокупность остальных звезд, как на целое. Диск обычно описывается как некоторая массивная плоская система во внешнем гравитационном поле других подсистем галактики, в которой могут распространяться крупномасштабные колебания (их обычно отождествляют со спиральными волнами плотности) и развиваться неустойчивости на различных масштабах. Последние всегда приводят к динамическому разогреву диска до такого состояния, при котором он становится устойчивым к малым возмущениям. Если начальная дисперсия скоростей была мала, то есть если звезды диска двигались по практически круговым орбитам, то за время, равное нескольким периодам вращения диска, произойдет перестройка орбит звезд благодаря коллективным эффектам, и в результате динамического нагрева диск станет немного медленнее вращаться, а часть энергии вращения диска перейдет в энергию хаотичных движений, обеспечивающих его устойчивость.

Диск любой галактики состоит из звезд, образовавшихся в самое различное время, и более молодые звезды всегда обладают небольшой дисперсией скоростей. Но основная масса диска приходится на звезды, которые имеют возраст в несколько миллиардов лет. Дисперсия их скоростей составляет несколько десятков км/с, уменьшаясь от центральной области диска к периферии. Пример нашей Галактики показывает, что у старых звезд диска дисперсия скоростей слабо зависит, если зависит вообще, от возраста.

Исключение составляет небольшой процент самых старых звезд, образующих во многих галактиках, в том числе в нашей, так называемый "толстый" диск, более сильно динамически нагретый, но его влияние на устойчивость основного диска несущественно. Со временем дисперсия скоростей звезд может либо оставаться постоянной, либо возрастать, если действуют определенные механизмы увеличения кинетической энергии хаотических движений звезд, такие как поглощение галактикой пролетающих сквозь нее спутников.

Чем выше масса недисковых компонентов галактики – и в первую очередь темного гало – по сравнению с массой диска, тем слабее влияние собственного гравитационного поля диска на движение составляющих его звезд, и тем меньшая дисперсия скоростей звезд (при данном значении круговой скорости и поверхностной плотности диска) обеспечивает его устойчивость. Поэтому, получив на основе наблюдений кривую вращения галактики и радиальное распределение дисперсии скоростей старых звезд диска, можно оценить максимально возможную поверхностную плотность диска, которая требуется для устойчивого равновесия, а отсюда найти верхний предел его массы.

К сожалению, критерий устойчивости диска в общем виде не описывается аналитически. Строгое решение для предела устойчивости получено только для упрощенной модели тонкого вращающегося диска с медленно меняющимися вдоль радиуса параметрами и только для радиальных возмущений плотности (этим гравитационная неустойчивость для вращающегося диска отличается от "классической" джинсовской неустойчивости для бесконечной однородной среды, где все направления равноправны, а возмущения с длиной волны больше джинсовской всегда неустойчивы).

Чем больше угловая скорость осесимметричного диска и чем выше дисперсия скоростей составляющих его звезд, тем он устойчивее к гравитационным возмущениям. Критическое значение радиальной дисперсии скоростей, стабилизующей радиальные возмущения плотности с любой длиной волны для диска с поверхностной плотностью Σ на данном расстоянии от центра, составляет (по Тоомре)

$$C_{cr} = \frac{3.3G\Sigma}{\kappa}, \tag{2}$$

где κ – эпициклическая частота, определяемая через угловую скорость вращения диска Ω и ее радиальную производную (обычно κ в 1.5–2 раза превышает Ω). Диск устойчив к радиальным возмущениям, если параметр Тоомре $Q_T = \dfrac{C_r}{C_{cr}} > 1$. Положив $Q_T = 1$ и зная $\kappa(R)$, можно оценить предельную локальную плотность диска как функцию радиуса, при которой он может быть устойчивым.

Более сложные, но более близкие к реальности модели несколько меняют выражение для критической дисперсии скоростей. Так, учет конечной толщины диска делает его более устойчивым, а учет нерадиальных возмущений в плоскости диска, наоборот, понижает порог устойчивости. Хотя простого аналитического выражения для критерия устойчивости в общем случае не существует, численные модели N тел позволяют нащупать этот предел в зависимости от различных параметров галактики. Многочисленные модели предельно, или, как принято говорить, маржинально устойчивых дисков, состоящих из большого числа притягивающих друг друга точек-звезд, показали, что предел устойчивости дисков с типичным для галактик экспоненциальным радиальным распределением плотности достигается при значении Q_T, равном не единице, а чуть выше единицы в области, где доминирует диск, и 2–3 на его периферии, где доминирует гало (см., например, [6]).

Рассмотрим теперь, к каким выводам приводят оба описанных выше метода. Начнем с интегральных оценок отношения M_*/L для звездных дисков и интегрального отношения M/L для галактик в пределах их оптических границ. Массовые оценки отношения M/L можно получить, если использовать для оценки M интегральную ширину радиолинии W_{HI} нейтрального водорода (H I). Газ расположен вблизи плоскости диска и вращается вместе с ним, поэтому ширина линии излучения W_{HI}, обусловленная эффектом Доплера, тем выше, чем больше проекция скорости вращения на луч зрения. Учитывая угол наклона i оси диска к лучу зрения, можно записать:

$$M/L \ = \ \alpha \cdot W_{\mathrm{HI}}^2 R_0 / L \sin^2 i. \tag{3}$$

Коэффициент α слабо зависит от модели распределения вещества в галактике и примерно равен единице. Если массу оценивать в единицах массы Солнца, а светимость – в единицах светимости Солнца, то отношения массы к светимости в диапазоне B для абсолютного большинства галактик окажутся заключенными в пределах от 1 до 10. Более высокие значения $M/L_B > 10$ в пределах оптических границ встречаются очень редко и почти исключительно среди карликовых галактик или галактик низкой поверхностной яркости, где они изредка достигают нескольких десятков единиц, что говорит о преобладании темного гало в них. Так, в Каталоге близких галактик Караченцева и др. [7] среди примерно

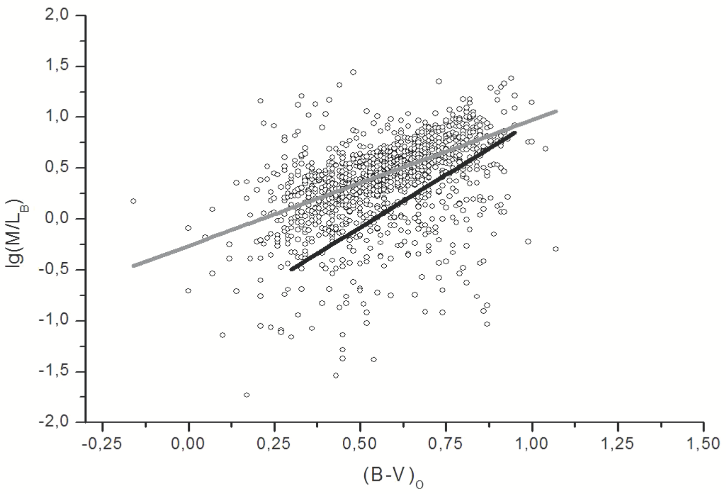

Рис. 4. Зависимость между интегральным показателем цвета галактик и отношением “масса–светимость” в пределах оптического радиуса R_{25}. Жирная линия – модельная зависимость для звездных систем с различным темпом затухания звездообразования (по Белл, де Джонг [3])

сотни галактик со светимостью не ниже $M_B = -16^m$, т. е. не относящихся к предельно слабым карликам, содержится всего две (!) галактики с $M/L_B > 10$.

На рис. 4 для большого числа (около 1300) галактик сопоставлены отношения M/L_B, полученные по приведенной выше формуле, с интегральными исправленными за поглощение показателями цвета галактик $(B-V)_0$ (по работе [4]). Жирной линией на рисунке показана зависимость, которая следует из эволюционного моделирования звездных систем по работе (Белл, де Джонг [3]). Верхний конец линии соответствует галактикам, содержащим лишь старые звезды, нижний – галактикам с интенсивным звездообразованием.

Несмотря на разброс точек на диаграмме, большая часть галактик образует четко выраженную последовательность, расположенную над теоретически рассчитанной зависимостью под углом к ней. Значительный “отскок” некоторых точек от общей зависимости во многих случаях может быть реальным, но часто он связан с ошибкой оценки массы по ширине линии, например, из-за сильных некруговых движений газа. Различие двух зависимостей (наблюдаемой и модельной) естественно объяснить наличием темной массы в галактиках, которая увеличивает M/L_B (для небольшой части карликовых галактик существенную роль может также играть масса газа). Из сравнения наклона двух прямых на диаграмме следует, что доля темной массы по отношению к массе звездного населения в пределах радиуса R_{25} систематически уменьшается от $M_{dark}/M_* \approx 3–5$ для голубых галактик с $(B-V)_0 \approx 0.3–0.5$ до ≤ 1.5 для наиболее красных галактик, практически не содержащих молодых звезд.

Таким образом, доля темной массы в галактиках статистически связана с ее звездным составом, а значит с характером эволюции звездного населения: для галактик, в которых мало молодых звезд, вклад темной массы оказывается в среднем меньше. Похоже, что такие галактики быстрее эволюционируют, расходуя запасы газа на звездообразование.

Но остается вопрос – как распределена темная масса внутри галактик? Располагается ли она в звездном диске, будучи менее сильно сконцентрированной к центру, чем обычные звезды, или же образует темное гало? Массы дисков, определенные фотометрическим методом, свидетельствуют о том, что они не содержат такого большого количества “светлого” вещества, которое требуется для объяснения скорости вращения на больших R. Но достаточно в моделях звездного населения изменить нижний предел масс звезд, как отношение M_*/L, а, следовательно, и модельная оценка массы диска изменятся – ведь маломассивные звезды дают большой вклад в общую массу и совсем небольшой – в светимость. Правда, для объяснения кривых вращения тогда надо предположить, что нижний предел масс звезд опускается по мере удаления от центра галактики, что выглядит довольно странно.

Получение радиального профиля дисперсии скоростей – задача несравненно более сложная, чем

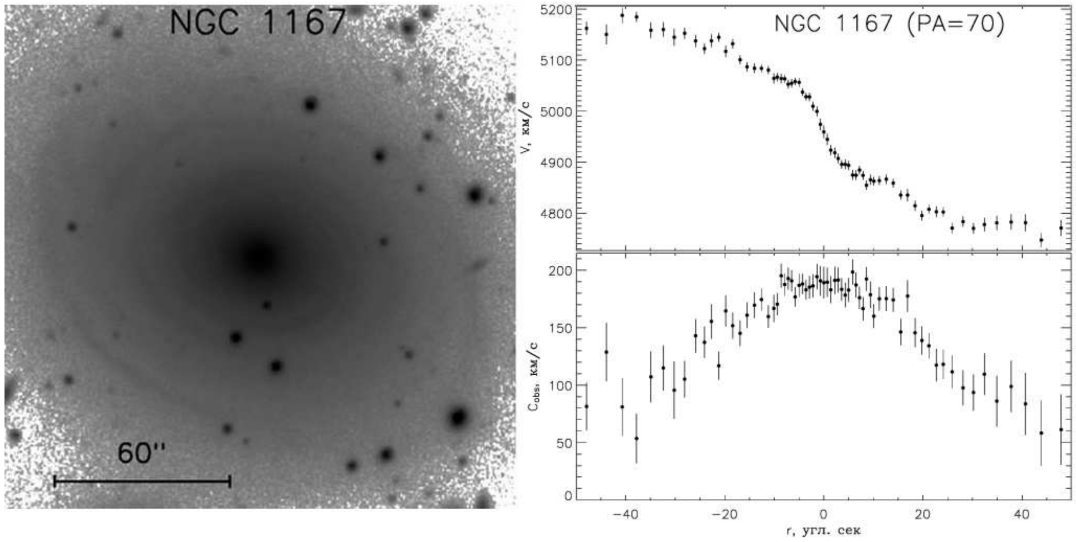

Рис. 5. Изображение NGC 1167 (контраст деталей усилен) и радиальный профиль скорости вращения и дисперсии скорости звёзд вдоль большой оси по наблюдениям на БТА [8]

измерение кривой вращения, и это связано с целым рядом причин. Во-первых, дисперсия скоростей звезд высока лишь для ядра галактики, а в диске она, как правило, в несколько раз меньше, и уже поэтому ее трудно измерить с хорошей точностью. Во-вторых, если скорость вращения оценивается по доплеровскому сдвигу линий, то дисперсия скоростей – по ширине профиля звездных линий, которую труднее измерить. Наконец, доплеровское уширение линий определяется не по эмиссиям, а по совокупности слабых абсорбционных линий в выбранном участке спектра путем их сравнения со спектром старых звезд или с модельными спектрами звездного населения галактик.

По указанным причинам существует не так много галактик, где дисперсии скоростей звезд удалось проследить до достаточно больших расстояний от центра. В России такие работы ведутся на 6-метровом телескопе БТА (САО РАН). Использование современной наблюдательной техники позволяет за время накопления света около двух часов получить спектр, по которому можно проследить радиальное изменение скорости вращения и дисперсии скоростей до расстояния в несколько радиальных шкал диска, хотя точность оценки для больших R, конечно, падает. Как пример, на рис. 5 показаны распределения скорости вращения и дисперсии скоростей диска вдоль большой оси линзовидной галактики NGC 1167 с тонкой псевдоспиральной структурой, полученные на БТА с помощью спектрографа с длинной щелью (по работе [8]). При наличии не одного, а двух или нескольких спектральных разрезов галактики с высоким отношением сигнал/шум, появляется возможность определить отдельно дисперсию скоростей звезд по каждой из трех осей: $C_r(R)$, $C_\phi(R)$, $C_z(R)$. А сравнение с модельными спектрами звездного населения позволяет оценить не только скорость вращения и дисперсию скоростей звездного диска, но и такие параметры, как характерный возраст и химический состав звезд [9]. К сожалению, эта процедура до сих пор выполнена лишь для очень небольшого числа галактик.

Если известна как кривая вращения звезд и/или газа, так и профили дисперсии скоростей, то можно, используя метод N тел, построить динамическую модель галактики, описывающую совокупность полученных из наблюдений данных, и выяснить, насколько далеко состояние звездного диска от предельно (маржинально) устойчивого для гравитационных и изгибных возмущений, и какова должна быть минимальная масса темного гало для обеспечения устойчивого равновесного состояния на всех R (см., например, [8]). Однако, если не ставить целью создание динамической модели всей галактики, имеет смысл упростить задачу, и рассмотреть условия устойчивости только для зоны вблизи $R \approx 2R_0$, где вклад диска в радиальный градиент гравитационного потенциала максимален. Для этого расстояния, как показывают численные эксперименты, параметр Q_T в уравнении (2), требуемый для устойчивости диска конечной толщины, слабо зависит от принятой модели и составляет 1.2–1.5 [6]. В предположении маржинальной устойчивости из (2) можно оценить максимальную поверхностную плотность диска на этом расстоянии и, зная из фотометрии или анализа кривой вращения значение радиальной шкалы R_0,

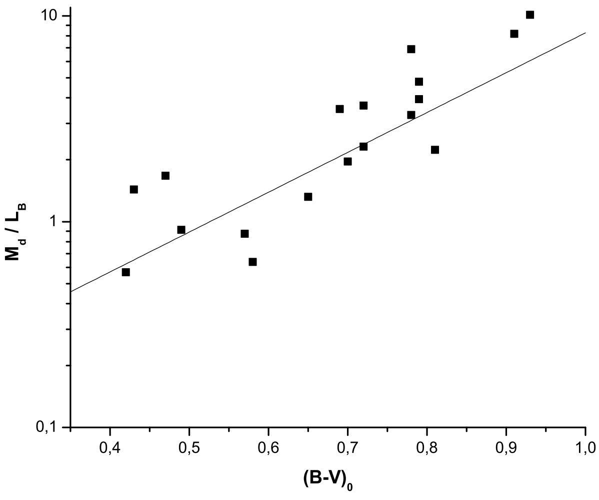

Рис. 6. Зависимость отношения массы диска M_d к светимости L_B, где масса M_d оценена для модели диска, маржинально устойчивого на $R \approx 2R_0$, от интегрального показателя цвета галактики (по [10])

определить верхний предел массы диска, решив тем самым задачу о возможном вкладе темного гало в кривую вращения. При этом, если диск динамически не перегрет и действительно близок к маржинально устойчивому состоянию (кстати, наиболее благоприятному для распространения в нем спиральных волн плотности), то полученная масса диска должна быть близка к массе, оцененной из фотометрической модели, то есть соответствовать светимости и цвету галактики.

На рис. 6 на основе опубликованных данных по дисперсии скоростей звезд спиральных галактик представлена диаграмма "цвет – отношение массы диска к светимости", где масса диска M_d найдена описанным выше способом – в предположении маржинальной устойчивости диска, т. е. по сути является верхним пределом массы M_* его звездной составляющей. Показатели цвета и светимости исправлены за селективное ослабление света в Галактике и за наклон галактических дисков к лучу зрения. Диаграмма построена по работе [10] с добавлением новых данных. Прямая линия – модельная зависимость для звездного населения с различным относительным содержанием звезд различного возраста по [3]. Точность определения интегральной массы M_m не очень высока и составляет в среднем 30–40% (0.10–0.20 в логарифмической шкале), с чем в значительной мере связан разброс точек на зависимости. Тем не менее, общее согласие между модельной зависимостью и полученными оценками очевидно: найденная масса дисков галактик соответствует ожидаемой, то есть согласуется с ее фотометрическим определением. Отсюда можно сделать вывод о том, что диски рассматриваемых спиральных галактик не содержат больших масс темной материи (иначе для их устойчивости потребовалась бы более высокая дисперсия скоростей) и действительно близки к состоянию маржинальной устойчивости. Последнее означает, что за миллиарды лет существования галактик механизмы динамического нагрева, связанные, например, с неизбежным поглощением небольших галактик или со взаимодействием с соседними системами, для многих галактик не были настолько эффективными, чтобы привести к сильному динамическому нагреву звездного диска. Исключения встречаются, но, как правило, среди линзовидных галактик (на рис. 6 они отсутствуют). Предположение о маржинальной устойчивости диска дает возможность оценить, хотя и грубо, вклад диска в массу галактики. Так, у рассматриваемых на рис. 6 галактик диск включает в себя от $\sim 30\%$ до более 80% полной массы в пределах оптических границ, остальное приходится на темное гало.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерения дисперсии скоростей звезд в дисках галактик приводят к выводу о том, что диски, как правило, близки к маржинально устойчивому состоянию, что позволяет разделить вклад звезд и темного гало в интегральную массу галактики. Однако этот вывод применим далеко не ко всем дисковым галактикам. Например, он не подходит к некоторым галактикам, диски которых уже давно сформировались и почти не содержат молодых звезд. Прежде всего, имеются в виду линзовидные галактики – бывшие спиральные галактики, по тем или иным причинам потерявшие запасы межзвездного газа. Анализ их абсорбционных спектров показал во многих (но не во всех!) случаях существенное превышение дисперсии скоростей звезд диска над минимальным значением, требующимся для их устойчивости. Это прямое свидетельство внешних воздействий или слияний галактики с более мелкими спутниками, при которых звездный диск "нагревался" и одновременно лишался основных запасов межзвездного газа. По данным Ноордермеера [11], исследовавшего вращение дисковых галактик ранних типов по движению звезд и газа, доля темной массы для них в пределах оптического радиуса может быть самой различной – от 10 до 90% , составляя в среднем 30–50%, то есть соотношение "темной" и "светлой" массы практически такое же, как и для спиральных галактик. Впрочем, линзовидные галактики не образуют однородной по свойствам группы, и сильно отличаются друг от друга как по физическим параметрам, так и по причинам потери основной массы холодного газа.

Таким образом, анализ кривых вращения с использованием данных фотометрии и критерия гравитационной устойчивости диска позволяет сделать определенные выводы как об особенностях эволюции галактик, так и о массе их темного гало. Подтверждается существование "темной" среды, на долю которой приходится существенная часть массы галактики. Она сосредоточена, в основном, за пределами звездного диска, в протяженном гало галактики. При этом относительная масса темного вещества в пределах нескольких фотометрических шкал диска не одинакова даже для галактик одного типа и в среднем выше у маломассивных галактик и галактик с большим процентом молодого звездного населения.

Проблема темной материи в галактиках еще далека от решения. Не ясно, например, какую форму имеет темное гало и какова его протяженность или эффективный размер в галактиках различных типов, не говоря уже об отсутствии ответа на фундаментальные вопросы о природе и составе несветящейся материи. Хотя большинство исследователей склоняются к выводу о том, что темная масса связана с теоретически предсказываемыми элементарными частицами, слабо взаимодействующими с обычным веществом, наличие большого количества барионной темной массы также пока нельзя исключить. Требует исследования и вопрос о влиянии массивного гало, из чего бы оно ни состояло, на эволюцию галактики как целого: на формирование спиральной структуры, на звездообразование и эволюцию газовой среды в диске. Измерения поля скоростей и дисперсии скоростей звездных дисков на больших расстояниях от центра не только даст возможность уточнить количество и пространственное распределение темной массы, но и позволит заглянуть в историю галактик, а также понять, как реагирует галактика на внешнее воздействие со стороны соседних систем или окружающего межгалактического газа. Во всех этих процессах наличие темной массы в галактике играет далеко не последнюю роль.

[1] *Sofue Y., Tutui T., Honma M., et al.* Central Rotation Curves of Spiral Galaxies // Astrophys. J. – 1999. – **523**, N 1.– P. 136–146.

[2] *Ryder S. D., Zasov A. V., McIntyre V. L., et al.* The peculiar rotation curve of NGC 157 // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 1998. – **293**, N 2. – P. 411–436.

[3] *Bell E. F., de Jong R. S.* Stellar Mass-to-Light Ratios and the Tully-Fisher Relation // Astrophys. J. – 2001. – **550**, N 1. – P. 212–229.

[4] *Сабурова А. С., Шалденкова Е. С., Засов А. В.* Спиральные галактики с "нетипичными" значениями отношения массы к светимости // Астрон. журн. – 2009. – **86**, № 9. – P. 861–863.

[5] *Bottema R.* The Stellar Kinematics of Galactic Disks // Astron. and Astrophys. – 1993. – **275**, N 1. – P. 16–36.

[6] *Хоперсков А. В., Засов А. В., Тюрина Н. В.* Минимальная дисперсия скоростей в устойчивых звездных дисках. Численные эксперименты // Астрон. журн. – 2003. – **80**, № 2. – P. 387–408.

[7] *Karachentsev I. D., Karachentseva V. E., Huchtmeier W. K., Makarov D. I.* A Catalog of Neighboring Galaxies // Astron. J. – 2004. – **127**, N 4. – P. 2031–268.

[8] *Засов А. В., Моисеев А. В., Хоперсков А. В., Сидорова Е. А.* Дисковые галактики ранних типов: структура и кинематика // Астрон. журн. – 2008. – **85**, № 2. – P. 99–114.

[9] *Chilingarian I. V., Novikova A. P., Cayatte V., et al.* NGC 6340: an old S0 galaxy with a young polar disc // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2009, in press (a-ph 0904.4606).

[10] *Засов А. В., Хоперсков А. В., Тюрина Н. В.* Дисперсия скоростей звезд и оценка массы галактических дисков // Письма в Астрон. журн. – 2004.– **30**, № 9. – P. 653–662.

[11] *Noordermeer E.* The distribution of gas, stars and dark matter in early-type disk galaxies. – **Thesis**, Rijksuniversiteit Groningen, 2006.